



Николай Константинович Абросимов
(1932–2011)

Н. К. Абросимов, Г. Ф. Михеев

**РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
СИНХРОЦИКЛОТРОНА
ПЕТЕРБУРГСКОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

**ГАТЧИНА
2012**

УДК 621.384.633.4

Абросимов Н. К., Михеев Г. Ф. Радиотехнические системы синхротрона Петербургского института ядерной физики / Под науч. ред. Г. А. Рябова. – Гатчина Ленинградской обл.: Издательство ФГБУ «ПИЯФ», 2012. – 340 с.

Научный редактор
кандидат технических наук *Г. А. Рябов*

Печатается по решению Ученого совета
Петербургского института ядерной физики
им. Б. П. Константинова от 15.11.2012 г.

ISBN 978-5-86763-301-1

© ФГБУ «ПИЯФ», 2012

От составителя

В апреле 2012 года исполнилось 80 лет со дня рождения Николая Константиновича Абросимова, бессменного руководителя Ускорительного отдела Петербургского института ядерной физики с 1957 по 2011 год и одного из непосредственных создателей крупнейшего в мире ускорителя – синхроциклотрона на энергию ускоренных протонов 1 ГэВ ПИЯФ.

Научно-технический совет Ускорительного отдела по инициативе Г. А. Рябова поручил мне собрать воедино и опубликовать научно-технические материалы из работ и лекций Н. К. Абросимова по теме «Радиотехнические системы синхроциклотрона Петербургского института ядерной физики».

В настоящем сборнике использованы некоторые главы из курса лекций Н. К. Абросимова, прочитанных им в 90-х годах для сотрудников Политехнического института, а также курс лекций по теме «Радиотехнические системы синхроциклотрона» для сотрудников Ускорительного отдела ПИЯФ. В сборник включены также некоторые материалы лекций, прочитанных Н. К. Абросимовым во время зимних школ, на которые ежегодно приезжают слушатели – физики и ускорительщики из всех научно-физических центров России и зарубежа, а также лекции, прочитанные им на научных семинарах Ускорительного отдела ПИЯФ. В книгу помещены также сведения о радиотехнических системах синхроциклотрона ПИЯФ, опубликованные Н. К. Абросимовым в научных сборниках, в материалах всесоюзных и международных конференций по ускорителям заряженных частиц, в препринтах ПИЯФ, в авторских свидетельствах и других его работах. В сборник включены и некоторые сведения из докторской диссертации Н. К. Абросимова «Создание и дальнейшее усовершенствование синхроциклотрона на энергию 1 ГэВ ПИЯФ РАН», защищенной им на Ученом совете Научно-исследовательского института физической аппаратуры им. Д. В. Ефремова (НИИЭФА) в 2004 году.

По существу, настоящий сборник является монографией и включает в себя следующие тематические разделы:

- синхроциклотрон 1 ГэВ ПИЯФ: общая характеристика ускорителя, этап строительства и запуск;
- принципы ускорения ионов в циклических ускорителях;

- высокочастотная ускоряющая система синхроциклотрона 1 ГэВ ПИЯФ;
- программа модернизации и усовершенствования синхроциклотрона.

Важно отметить, что приводимые в настоящем сборнике материалы являются лишь частью научного наследия Н. К. Абросимова и кроме радиотехнических аспектов ускорительной техники Николай Константинович занимался проблемами движения заряженных частиц в азимутально-неоднородных магнитных полях, проблемами оптики и транспортировки частиц, созданием μ - и π -мезонных каналов. Отдельными темами является вклад Н. К. Абросимова в разработку и создание в ПИЯФ медицинского комплекса адронной терапии и конструирование изохронного циклотрона Ц-80. Общий список научно-технических публикаций Н. К. Абросимова содержит приблизительно 230 наименований. Физики делятся на теоретиков и экспериментаторов, и только некоторые из них сочетают в себе и то и другое. Я считаю, что к этой редкой группе и принадлежал Николай Константинович, а перечисленный круг его научных интересов отражает темперамент этого выдающегося человека.

Настоящий сборник адресован широкому кругу читателей, но в первую очередь он будет интересен молодым физикам, продолжателям нашего дела. Сборник содержит широкий круг теоретических и практических сведений о синхроциклотроне ПИЯФ и будет полезен для инженерного персонала, работающего в Ускорительном отделе ПИЯФ и обслуживающего синхроциклотрон, в частности, при подготовке к сдаче квалификационного экзамена на право обслуживания такого сложного инженерного и физического сооружения, каким является синхроциклотрон ПИЯФ. Книга будет интересна и широкому кругу специалистов по ускорительной технике, т. к. содержит оригинальные сведения по радиотехническим системам ускорителя, увеличению надежности и улучшению качества его работы и, в частности, повышению интенсивности его пучка. Большинство новых технических решений защищены авторскими свидетельствами.

В сборнике приведены обширные ссылки на авторские публикации по рассматриваемым вопросам. Практически все эти публикации написаны Н. К. Абросимовым совместно со мной.

Николай Константинович был жизнерадостным и остроумным человеком. Многие из его высказываний запомнились коллегам и стали институтским фольклором. Некоторые его замечания я позволил себе включить в настоящую монографию.

*Г. Ф. Михеев, старший научный сотрудник
Лаборатории физики и техники ускорителей ПИЯФ*

От научного редактора

Материал настоящего сборника предназначен будущему поколению специалистов по ускорителям и, может быть, новым менеджерам-руководителям для лучшего понимания предмета, которым они будут руководить.

1–4 главы книги содержат общеизвестные, а часто и тривиальные сведения, но в процессе редактирования было решено их оставить для того, чтобы облегчить молодым сотрудникам восприятие материала и не обращаться к дополнительным учебникам и справочникам.

Последующие 5–7 главы содержат подробные и скрупулезно собранные по отчетам и разрозненным публикациям сведения о радиотехнических системах синхроциклотрона ПИЯФ и являются своего рода энциклопедией по высокочастотным системам.

Вкрапленные в текст лирические отступления Г. Ф. Михеева призваны дать представление о личности автора, оживить строго научный материал и облегчить его усвоение.

Николай Константинович Абросимов был всесторонним специалистом, он внес большой вклад не только в радиотехнические системы, но и в теорию движения частиц в ускорителях. По этим вопросам в разное время им было прочитано ряд курсов в Ускорительном отделе ПИЯФ и в ЛПИ. У составителя и редактора есть мечта подготовить и написать курс по динамике частиц, но это зависит во многом от востребованности такого труда и возможности уделить этому вопросу время и силы.

*Г. А. Рябов,
заведующий Лабораторией физики и техники ускорителей ПИЯФ,
кандидат технических наук*

Памяти Николая Константиновича Абросимова¹

24 февраля 2011 года ушел из жизни главный научный сотрудник Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова доктор технических наук Николай Константинович Абросимов – человек, отдавший всю свою сознательную жизнь служению науке.

Николай Константинович принимал активное участие в создании проекта синхроциклотрона ПИЯФ, участвовал непосредственно в строительстве и монтаже ускорителя, руководил работами по совершенствованию его конструкции и созданию трактов пучков различных частиц высоких энергий, генерируемых синхроциклотроном.

¹ Статья опубликована в газете: Гатчинская правда. 2011. 30 апреля. № 3–4 («Научные среды», ред. О. С. Волкова).

В 1959 году, после пуска реактора ВВР-М, была создана технологическая группа по реализации проекта нового ускорителя – синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ. Научным руководителем группы был назначен заведующий Циклотронной лабораторией Ленинградского физико-технического института им. А. Ф. Иоффе АН СССР (ФТИ) доктор физико-математических наук Д. Г. Алхазов, его заместителем – сотрудник Циклотронной лаборатории Н. К. Абросимов. В эту группу, по рекомендации академика А. П. Комара, был включен и я, как имеющий опыт работы по наладке и эксплуатации электронного синхротрона ФТИ на энергию 100 МэВ.

Следует отметить, что синхроциклотрон ПИЯФ был спроектирован на энергию протонов, пожалуй, максимально возможную для ускорителя такого типа. Масса протона, достигшего такой энергии, увеличивается более чем в два раза, что требует соответствующего изменения частоты высокочастотного ускоряющего напряжения на ускоряющем электроде. Такое перекрытие не может быть обеспечено простой геометрической емкостью вращающегося вариатора, что потребовало разработки специальной схемы вариатора, где перекрытие по емкости обеспечивается переменным последовательным включением элементов индуктивности с целью получения большей эффективной емкости вблизи резонанса с рабочей частотой. Конечно, это возможно лишь за счет увеличения напряжения в зазорах геометрической емкости.

Во время разработки проекта (1957–1959) в мире существовали три крупных синхроциклотрона с энергией протонов до 740 МэВ: Беркли, США; Дубна, СССР; ЦЕРН, Женева. У этих ускорителей вариаторы имеют простую конструкцию – чисто геометрическую емкость (переменный вращающийся конденсатор), и, по мере увеличения емкости до максимально возможной, напряжение на вариаторах уменьшается с понижением рабочей частоты системы, что позволило иметь относительно большое напряжение на дуанте (до 50 кВ) в 1/4-волновом режиме колебаний. На вариаторе частоты синхроциклотрона ПИЯФ напряжение в зазорах геометрической емкости с понижением частоты, наоборот, увеличивается и достигает значительно большей величины. Это привело к тому, что мы не смогли получить ускоряющее напряжение на дуанте более 20 кВ, что привело к значительному снижению количества захваченных в ускорение частиц.

Энергия протонов при пуске ускорителя в 1967 году достигла лишь 750 МэВ. Поэтому главной задачей, над которой пришлось работать в течение двух лет, было обеспечить проектную энергию – 1 ГэВ. При этом пришлось существенно изменить конструкцию вариатора частоты и систему обратной связи высокочастотного генератора. Вращающийся вариатор обратной связи был заменен стационарной системой двух фидеров

обратной связи (защищено авторским свидетельством на изобретение). Необходимый диапазон вариации частоты ускоряющего напряжения был получен, энергия протонов 1 ГэВ была достигнута.

Николай Константинович сформулировал ряд проблем, связанных с увеличением тока ускоренных частиц, которые также были решены.

- Была разработана оригинальная система фокусировки (специальный фокусирующий электрод в центральной области), позволившая увеличить до трех раз количество захваченных протонов в режиме ускорения. Система зарегистрирована в качестве изобретения.
- Была разработана и создана широкоапертурная система вывода внутреннего пучка протонов, позволившая вывести до 30 % внутреннего пучка, в то время как на вышеперечисленных ускорителях выводилось не более 10 %. При этом геометрические параметры выведенного пучка были значительно лучше (меньше поперечное сечение и бóльшая плотность тока пучка).
- При разработке системы растяжки во времени выведенного пучка была разработана оригинальная схема синхронизации частоты и фазы генератора растяжки с частотой и фазой генератора ускоряющей системы, которая позволила обеспечить переход частиц из основного режима ускорения в режим временной растяжки со 100%-ной эффективностью, в то время как на других ускорителях это происходило с потерей до 50 % частиц. Эта система также получила свидетельство на изобретение.

Таким образом, осуществление этих работ позволило получить выведенный ток пучка, не уступающий по величине другим ускорителям. При этом качество выведенного пучка было выше (меньшее поперечное сечение пучка, т. е. большая плотность и равномерная растяжка пучка во времени на весь обратный цикл хода частоты). Это было важно для физических работ, применяющих электронные детекторные системы.

Николай Константинович руководил работами по созданию трактов вторичных частиц: мезонных каналов, каналов нейтронных пучков, специальных медицинских протонных трактов.

Для получения нейтронов высокой энергии (до 1 ГэВ) было создано специальное устройство для сброса протонов на внутреннюю мишень, которая генерировала нейтроны, – ГНЕЙС. Надо отметить, что энергия протонов и соответствующая энергия нейтронов на нашем ускорителе близка к энергии частиц радиационного пояса Земли, что весьма важно для испытания аппаратуры на радиационную устойчивость в космических полетах. Сейчас, когда стало ясно, что ряд спутников вышел из строя из-за повышенной радиации при пересечении радиационного пояса Земли, это становится особенно ценным.

Для быстрого сброса протонов на внутреннюю мишень были применены ускоряющие пластины системы временной растяжки пучка с помощью подачи высоковольтного импульса напряжения до 80 кВ, причем схема была разработана так, чтобы эти режимы могли осуществляться одновременно без предварительных переключений (на этот способ также было получено авторское свидетельство).

Под руководством Николая Константиновича была организована группа по созданию пузырьковой водородно-дейтериевой камеры, на которой были выполнены первые эксперименты на пучках ускорителя, и, хотя в настоящее время камера не работает, записанная на пленке информация обрабатывается до сих пор и имеются интересные результаты исследований по физике рождения мезона в нуклон-нуклонном взаимодействии.

Следует отметить, что группа научных сотрудников, основной состав которой работал над созданием ПВДК, вошла в состав Лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники, где они успешно работают и в настоящее время над проблемами μ -катализа и изучением ядерных взаимодействий с поляризованными частицами с целью возможного применения этих процессов в холодном синтезе ядер.

В заключение хотел бы подчеркнуть, что Николай Константинович около 20 лет работал на посту заместителя директора института, отвечая за финансовую деятельность. Именно благодаря его эффективной работе в самое тяжелое время перестройки институт сумел не только выжить, но имел возможность, экономно расходуя выделенные средства, выполнять основные задачи научной программы.

Имя Николая Константиновича навечно останется в памяти сотрудников Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова.

Н. Н. Чернов,

*ведущий научный сотрудник Отделения физики высоких энергий ПИЯФ,
доктор технических наук, профессор*

Его любили и уважали¹

Николай Константинович был создателем и неизменным руководителем Ускорительного отдела на протяжении более 50 лет. Сначала это была скромная технологическая группа в лаборатории Д. Г. Алхазова, а затем она превратилась в отдел, включающий 150 человек, для обслуживания и развития ускорительного комплекса.

¹ Статья опубликована в газете: Гатчинская правда. 2011. 30 апреля. № 3–4 («Научные среды», ред. О. С. Волкова).

История создания нашего ускорителя носила драматический характер. Как всегда строительство запаздывало, проект устаревал, некоторые вопросы работы ускорителя оставались неясными, и по этим причинам комиссии из Академии наук под руководством В. П. Желепова и В. П. Дмитриевского предлагали остановить выполнение проекта из-за его неосуществимости. Академик Флеров предлагал переделать ускоритель под циклотрон тяжелых ионов. Тем не менее дирекция института и Ускорительный отдел решили взять на себя всю ответственность и довести строительство и наладку ускорителя своими силами. Был решен на уровне изобретений ряд вопросов ускорительной техники, в частности, создание высокочастотной системы, и ускоритель был запущен.

Наш ускоритель действительно уникальная машина. Это:

- самый большой в мире синхроциклотрон;
- самый большой в мире диапазон вариации частоты в высокочастотной системе – невозможно построить синхроциклотрон на более высокую энергию;
- уникальная электростатическая фокусирующая система в центре, позволившая повысить интенсивность пучка в 3-5 раз;
- оригинальная система медленного вывода пучка;
- рекордная по эффективности система вывода.

После запуска последовали работы по созданию экспериментального комплекса синхроциклотрона. Получены пучки протонов, пионов и мезонов. Создан центр протонной терапии, спектрометра ГНЕЙС, Лаборатории ИРИС и др. Все это позволило создать ускорительный комплекс, который является одним из активно действующих в стране уже в течение 40 с лишним лет. И все это сделано коллективом под руководством Н. К. Абросимова. Ускорительный комплекс является рукотворным памятником деятельности Николая Константиновича, и он еще долго будет служить людям.

Николай Константинович был уникальной личностью. Его характеризовал широкий и фундаментальный подход к решаемым проблемам. Не все, наверное, знают, что он обладал выдающимися математическими способностями и мог бы сделать карьеру как специалист в математической или теоретической физике. В отличие от академических ученых Николай Константинович не гнушался решением практических вопросов. С ним можно было обсудить как теорему Лиувилля, имеющую важное применение в теории ускорителей, так и технические и организационные проблемы. Он обладал педагогическим даром: создал курс по ускорителям и читал его в ЛПИ и в Ускорительном отделе. К сожалению, курс остался неопубликованным.

Будучи заместителем директора, он в трудные годы командовал финансами института и распределял жилую площадь. Ясно, что не все были довольны принимаемыми решениями, но у Абросимова не было личных врагов. Занимая высокий административный пост, он не стал бюрократом и оставался простым и доступным человеком. Его любили и уважали все, кто имел с ним дело.

*Г. А. Рябов,
заведующий Лабораторией физики и техники ускорителей ПИЯФ,
кандидат технических наук*

Краткая биография Николая Константиновича Абросимова

Нас было много на челне...

А. С. Пушкин. Арион

Николай Константинович Абросимов родился 28 апреля 1932 года в Ленинграде. Родители: отец – Константин Иванович, инженер на заводе им. И. В. Сталина, мать – Екатерина Петровна, инженер-конструктор на заводе «Электросила» им. С. М. Кирова.

В начале войны, в 1941 году, Николай Константинович вместе с матерью был эвакуирован в Свердловскую область, станция Егоршино. Отец погиб в блокадном Ленинграде при бомбежке.

В 1944–1945 годах одновременно с учебой в средней школе Николай Константинович работал слесарем на военном заводе. Вернулся в Ленинград в 1945 году и вновь работал слесарем на заводе «Электросила». Из воспоминаний Николая Константиновича:

«Представьте себе картину: мне 12-13 лет, а я уже слесарь на военном заводе. Что я там делал для фронта – не знаю, но четко помню, что, как только мастер участка выходил из цеха, я начинал мастерить пистолет и финский нож – мечту всех мальчишек военного времени».

В 1950 году Николай Константинович окончил среднюю школу и поступил, после сдачи вступительных экзаменов, на физико-механический факультет Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина – ЛПИ.

Это было начало атомного века и создания собственной атомной промышленности. Слова «Хиросима» и «холодная война» были на слуху, и учиться на физика-атомика было заманчиво и престижно. Я учился вместе с Николаем Константиновичем на одном курсе, на одной специальности. Тогда все было засекречено, нам преподавали «секретные»

курсы, конспекты этих лекций в прошнурованных тетрадях с печатями и грифом «секретно» мы обязаны были сдавать в Первый отдел под расписку после каждой прослушанной лекции. Лекции нам читали известные ученые тех времен: профессор А. Ф. Чудновский, профессор С. Е. Бре-слер, академик В. М. Тучкевич, член-корреспондент АН СССР Г. А. Грин-берг, академик А. П. Комар, академик Б. П. Константинов и другие.

В 1956 году Николай Константинович с красным дипломом окончил учебу по специальности «техническая физика» с присвоением квалификации «инженер-исследователь».

Идиотизм секретности имел для нас и положительную сторону – наша специальность была освобождена от обязательной учебы на военной кафедре. Где-то там, в министерстве Берии, посчитали: нечего отвлекать молодых физиков-атомщиков от учебы – пусть куют атомный щит нашей Родины. Представьте ситуацию: все группы на курсе ходят на лекции военной кафедры, сдают экзамены и отправляются в летние военные лагеря на сборы, а мы отдыхаем на даче! Забавно отметить, что большинство выпускников одновременно с дипломом об окончании института получили военные билеты с присвоением им воинского звания «младший лейтенант», а выпускники нашей специальности получили военные билеты и звание «солдат необученный». Но это был уже 1956 год – начало хрущевской оттепели. Имен наших отцов атомной и водородной бомбы мы еще не знали, хотя знали американских: Ферми, Оппенгеймера, Теллера. Не знали и о роли в нашем атомном проекте Л. Д. Ландау и И. Е. Тамма, хотя по их учебникам нам читались лекции и мы сдавали экзамены.

Выбирать место работы тогда было нельзя. По окончании института, в 1956 году, все выпускники курса были направлены на «атомные» предприятия – строить ускорители и реакторы, и большинство из них стали известными специалистами и учеными. Однако двое из них – сталинские стипендиаты – за хорошие успехи в учебе были направлены ассистентами на кафедры альма-матер: Николай Константинович – на кафедру математики, я – на кафедру физики.

В 1957 году мы оба с большим трудом и при содействии директора А. П. Комара перевелись на работу в Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе (ФТИ): Николай Константинович – в Циклотронную лабораторию профессора Д. Г. Алхазова, я – в Синхротронную лабораторию академика А. П. Комара.

В это время уже существовал филиал ФТИ в Гатчине, который в 1971 году был преобразован в самостоятельное учреждение – Ленин-

градский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова АН СССР (ЛИЯФ, позднее – ПИЯФ).

Заметим, что лаборатория А. П. Комара впоследствии выросла и стала основным отделом ПИЯФ – Отделом физики высоких энергий, руководимым членом-корреспондентом РАН А. А. Воробьевым. Сотрудники этого отдела были основными физиками-экспериментаторами на синхроциклотроне 1 ГэВ и выполнили на нем ряд уникальных экспериментов.

В 1957 году, сразу же после перехода на работу в ФТИ, Н. К. Абросимов был включен в состав государственной комиссии по подготовке проекта-задания на сооружение самого большого в мире синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ.

Место для строительства ускорителя и реактора ВВР-М выбирали в основном КГБ и военные, и лучшего места, чем уникальная историческая Орлова роща, они не нашли. Проектировали ускоритель в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова, где, между прочим, работали многие из выпускников нашего курса, а изготавливали синхроциклотрон на заводе «Электросила» и в мастерских НИИЭФА. Строили здания и сооружали синхроциклотрон силами военных стройбатов. Синхроциклотрон был запущен в 1967 году.

Все эти и последующие годы Николай Константинович – бессменный руководитель всех работ по сооружению и эксплуатации синхроциклотрона.

В ПИЯФ Николай Константинович прошел всю цепочку должностей: инженер, младший научный сотрудник, старший инженер, начальник службы, заместитель главного инженера синхроциклотрона, главный инженер синхроциклотрона. С 1979 года – заведующий Ускорительным отделом ПИЯФ. С 1986 по 2006 год – в течение двадцати лет – заместитель директора ПИЯФ по научной работе.

В тяжелые годы перестройки ему удалось успешно руководить ПИЯФ, сохранить коллектив института и его финансовую и научную независимость. Отметим, что в эти годы в институте продолжалась эксплуатация синхроциклотрона и строительство реактора ПИК.

Николай Константинович – автор около 150 научных публикаций и 8 авторских свидетельств на изобретение.

В 1989 году Николай Константинович защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка методов расчета магнитооптических систем для формирования пучков μ -мезонов и создание μ -мезонного канала синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР».

В 2004 году Николай Константинович защитил докторскую диссертацию по теме «Создание и дальнейшее усовершенствование синхротрона на энергию 1 ГэВ ПИЯФ РАН».

Н. К. Абросимов является инициатором и создателем в ПИЯФ медицинского протонного комплекса, а также сооружения изохронного циклотрона Ц-80 для производства изотопов и лечения больных.

Николай Константинович имеет правительственные награды, из них главные – орден Трудового Красного Знамени, медаль «За доблестный труд в Великой Отечественной войне», и еще 4 медали: «В память 250-летия Ленинграда», «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина», «За трудовую доблесть» и «Сорок лет победы в Великой Отечественной войне»; награжден дипломом и знаком «Почетный изобретатель СССР».

Не могу не отметить забавный случай из биографии Николая Константиновича. Несмотря на его многочисленные заслуги, ордена и почетные грамоты, ему вынесли строгий партийный выговор, правда, «без занесения» с формулировкой: «За поверхностную оценку политических и моральных качеств бывшего главного инженера Ускорительного отдела А. В. Куликова при рассмотрении его характеристики для поездки за границу». В 1985 году, во время служебной командировки в США, А. В. Куликов остался работать в Стенфордской лаборатории им. Лоуренса, на самом большом в мире линейном ускорителе протонов. А. В. Куликов внес большой вклад в сооружение синхроциклотрона и является соавтором Н. К. Абросимова во многих научных публикациях.

У Николая Константиновича есть дочь – Татьяна Николаевна 1960 года рождения. Внуки учатся и уже работают.

Жена Николая Константиновича – Людмила Анисимовна Колесникова – была заведующей информационно-общественным центром ПИЯФ, редактором тематического выпуска «Научные среды» газеты «Гатчинская правда». Она старейший член Союза писателей и журналистов Санкт-Петербурга, автор литературных и биографических публикаций, в частности об академике Б. П. Константинове и профессоре А. А. Ансельме. Людмила Анисимовна – член международных организаций: WIN – «Женщины в ядерной энергетике» (Швейцария), «Женщины Социал-демократического конгресса» (Россия).

В последние годы жизнь Николая Константиновича была осложнена тяжелой болезнью жены. Самоотверженно помогая ей, Николай Константинович продолжал работать в Ускорительном отделе.

24 февраля 2011 года после непродолжительной болезни Николай Константинович скончался в Гатчинской ЦРБ. Похоронен в Санкт-Петербурге, на Киновеевском кладбище, рядом с родителями.

Товарищи и сотрудники ПИЯФ уважали и любили Николая Константиновича за его человеческие качества и научные заслуги.

В день рождения Николая Константиновича, 28 апреля, – а это всегда между Пасхой и Днем космонавтики – наш отдел собирался в его кабинете и отмечал появление новорожденного. И вот к 80-летнему юбилею мы впервые без Николая Константиновича.

*Г. Ф. Михеев, старший научный сотрудник
Лаборатории физики и техники ускорителей ПИЯФ*

Введение

Некоторые сведения из истории развития ускорительной техники

Ускорители заряженных частиц, генерирующие пучки высокой энергии частиц, наряду с исследовательскими реакторами, которые создают мощные потоки нейтронов, составляют экспериментальную базу ядерной физики и физики элементарных частиц.

Одним из методов исследования свойств и внутреннего строения атомных ядер является облучение их потоком электронов, протонов или других частиц и последующий анализ продуктов, вызванных этим облучением ядерных реакций. Измеряя массы вылетевших продуктов ядерной реакции, их энергию, углы вылета по отношению к первичным частицам и другие параметры, можно сделать вывод о внутреннем устройстве и характеристиках исследуемых ядер. Чем выше энергия сталкивающихся частиц, тем более глубокие тайны микромира открываются в этих исследованиях.

Ускорители возникли как установки для физических исследований в области физики ядра и элементарных частиц, и их дальнейшее развитие почти целиком определялось требованиями бурно развивающейся ядерной физики. Первым ускорителем, построенным для ядерных исследований, был каскадный генератор с ускорительной трубкой на энергию протонов 0,7 МэВ, созданный в Англии Дж. Д. Кокрофтом и Э. Т. С. Уолтоном в 1932 году. С помощью этого ускорителя впервые была осуществлена искусственным путем ядерная реакция $p + \text{Li} \rightarrow 2\text{He}$. За эту работу авторы были удостоены Нобелевской премии. В том же году в Беркли (США) был построен первый резонансный циклический ускоритель – циклотрон на энергию протонов 1,2 МэВ, принцип действия которого был предложен в 1930 году Э. Лоуренсом. Впоследствии Лоуренс за развитие ускорительной техники также был удостоен Нобелевской премии. В 1940 году Д. Керстом (США) был построен первый циклический ускоритель электронов – бетатрон на энергию 2,3 МэВ.

В СССР первый циклотрон был построен перед Второй мировой войной в РИАН (Ленинград). В конце войны был создан циклотрон Института атомной энергии им. И. В. Курчатова (Москва) и циклотрон Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе (Ленинград). На них выполнялся ряд работ, в том числе и по созданию ядерного оружия.

Развитие фундаментальных и прикладных исследований атомного ядра требовало от ускорительной техники все более высоких энергий ускоряемых частиц и более высоких интенсивностей получаемых пучков. Это стимулировало поиск новых методов ускорения заряженных частиц и технических возможностей для создания все более крупных ускорителей. Каждый новый ускоритель являлся для своего времени уникальным инженерным сооружением, для создания которого требовалось решить целый ряд сложных научных и технических проблем. Мощным толчком для дальнейшего развития ускорительной техники явилось открытие В. И. Векслером и Э. М. Макмилланом в 1945 году принципа автофазировки, на котором основано целое направление ускорительной техники – резонансные ускорители. Через год, используя этот принцип, Ф. К. Говард и Д. Е. Барнс построили первый электронный синхротрон. Первый протонный синхротрон (Космотрон) на энергию 3 ГэВ был построен в США в 1953 году.

После Второй мировой войны начало развиваться новое направление ускорительной техники – линейные ускорители. Принцип линейного ускорителя был предложен еще в 1924 году Э. Изингом. Однако в то время в связи с низким уровнем развития радиоэлектроники метрового и дециметрового диапазона линейные ускорители казались бесперспективными. После окончания войны в связи с развитием радиолокации такая техника была создана, и это послужило толчком для интенсивного развития линейных ускорителей. В 1944 году Л. Альварец в США построил протонный линейный ускоритель на энергию 32 МэВ. В том же году в Стенфорде (США) был построен первый электронный линейный ускоритель.

В 1954 году Н. Кристофилосом и независимо от него Е. Д. Курантом, М. С. Ливингстоном и Х. С. Снайдерсом был предложен принцип знакопеременной (сильной) фокусировки, который открыл новую эру в ускорительной технике. При использовании этого принципа был построен ряд гигантских ускорителей в США, СССР и других странах. Так, в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН), расположенном в Швейцарии, был построен целый ряд протонных синхротронов со знакопеременной фокусировкой, самый большой из которых имеет энергию 450 ГэВ и диаметр кольца 2,2 км. В США, близ Чикаго, в Лаборатории им. Ферми, работает протонный синхротрон на энергию около 1 000 ГэВ, периметр кольца которого составляет около 10 км. Также был задуман и начал

строиться сверхгигантский протонный синхротрон-накопитель с энергией 20 ГэВ и диаметром кольца около 30 км (строительство было приостановлено решением правительства Клинтона в 2000 году).

В нашей стране, в Протвино, вблизи Серпухова, в 1967 году был запущен протонный синхротрон со знакопеременной фокусировкой на энергию 76 ГэВ. В Протвино был запланирован ускоритель на энергию 3 000 ГэВ с диаметром кольца свыше 6 км (строительство остановлено в годы перестройки).

В конце 50-х годов появилось еще одно направление ускорительной техники – накопительные кольца для экспериментов на встречных пучках. В 1961 году появились электронные накопительные кольца в Италии (2×250 МэВ) и США (2×500 МэВ). В 1971 году в ЦЕРН было построено первое накопительное кольцо для протонов (2×30 ГэВ). Там же был запущен электрон-позитронный коллайдер на энергию 55 ГэВ с диаметром кольца свыше 8 км. Имеется крупный электрон-позитронный коллайдер в Лаборатории КЕК, в Японии.

К ускорителям на сверхвысокие энергии относятся также накопительные кольца, обеспечивающие проведение экспериментов на встречных пучках электронов, позитронов, протонов и антипротонов. Дело в том, что при взаимодействии налетающей частицы с неподвижной мишенью львиная доля энергии частицы затрачивается на передачу энергии вылетающим в результате взаимодействия продуктам ядерных превращений и только небольшая часть этой энергии затрачивается непосредственно на саму ядерную реакцию. По мере роста энергии налетающих частиц ситуация еще более ухудшается, и, например, при энергии налетающей частицы 1 000 ГэВ на саму ядерную реакцию тратится только 30 ГэВ. Поэтому оказывается несравненно более выгодным проводить эксперименты не с неподвижными мишенями, а со встречными пучками частиц. В этом случае вся энергия ускоренных частиц используется непосредственно на ядерную реакцию.

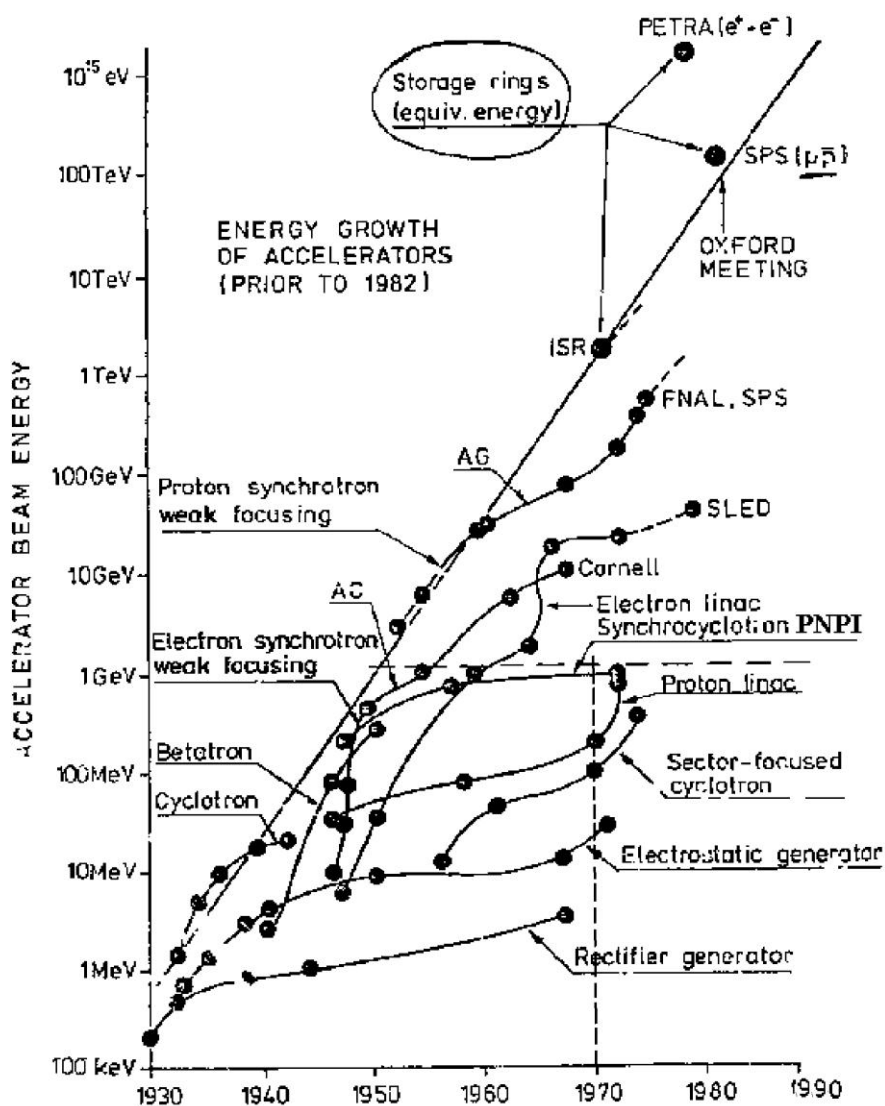
В ноябре 2009 года в ЦЕРН был запущен самый большой ускоритель – Большой адронный коллайдер (ЛНС). Протяженность кольцевой установки ЛНС ~ 27 км. Она расположена под землей на глубине ~ 100 м на границе Швейцарии и Франции, недалеко от Женевы.

Ускоренные в коллайдере пучки движутся в противоположных направлениях по двум кольцевым ускорительным «дорожкам», расположенным друг над другом. Энергия каждого из пучков ~ 7 ТэВ, а энергия их взаимодействия в системе центра масс сталкивающихся протонов составит 14 ТэВ.

Одним из важнейших направлений научной деятельности Отделения физики высоких энергий ПИЯФ является участие в экспериментах на ЛНС (эксперименты CMS, ATLAS, LHCb и ALICE) и в разработке

и изготовлении коллайдерных мюонных детекторов и детекторов переходного излучения. Руководитель программы член-корреспондент РАН директор ОФВЭ А. А. Воробьев¹.

На рис. 1 приведена схема, демонстрирующая прогресс в развитии ускорительной техники в мире и рост энергии ускоряемых пучков начиная с ее зарождения в 30-х годах и практически до конца XX века. Схема составлена крупнейшим теоретиком и практиком ускорительной техники М. С. Ливингстоном и носит название Livingston Chart. Схема демонстрирует экспоненциальный рост достигаемой на ускорителях энергии пучков (шкала энергии дана в логарифмическом масштабе). На схеме показано место синхроциклотрона ПИЯФ. Однако запущенный в 2009 году адронный коллайдер на энергию 14 ТэВ – LHC – находится в стороне от кривой Ливингстона.



¹ Участие в подготовке и проведении экспериментов на LHC ПИЯФ РАН. Гатчина, 2009. 54 с.

Рис. 1. Схема прогресса ускорительной техники
и рост энергии ускоряемых пучков

Наряду с физикой ядра и элементарных частиц ускорители находят применение в других областях науки, таких как физика твердого тела, химия, биология. В последнее время ускорители заряженных частиц начинают все более широко использоваться в промышленности и медицине. Так, электронные ускорители применяются для целей радиационной технологии в производстве различных полимеров, протонные ускорители используются для производства радиоактивных изотопов, которые находят применение в народном хозяйстве и медицине. Как протонные, так и электронные ускорители широко используются для лучевой терапии при лечении различных заболеваний, в том числе и рака.

В настоящее время ускорительная техника превратилась в мощную отрасль современной индустрии, использующую для своего развития самые современные достижения науки и техники.

Основные принципы ускорения заряженных частиц

Ускорение заряженных частиц основано на том, что ускоряемые частицы (протон или электрон) имеют положительный или отрицательный заряд и, следовательно, подвержены действию электрических и магнитных полей. На частицу, находящуюся в электромагнитном поле, действует сила Лоренца

$$\vec{F} = e\vec{E} + \frac{e}{c}[\vec{v}\vec{B}],$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля; \vec{B} – индукция магнитного поля; \vec{v} – скорость частицы; c – скорость света; e – заряд частицы. Из приведенной формулы видно, что сила, создаваемая статическим магнитным полем, всегда перпендикулярна направлению скорости частицы, следовательно, эта сила может изменить только направление скорости частицы, но не может изменить величину ее скорости, а тем самым и ее энергию.

Если частица с массой m , обладающая скоростью \vec{v} , попадает в однородное постоянное магнитное поле \vec{B} , силовые линии которого перпендикулярны скорости частицы, то частица в таком поле будет двигаться в плоскости, перпендикулярной магнитным силовым линиям, по окружности с радиусом R , где R определяется равенством магнитной и центростремительной сил,

$$R = \frac{mvc}{eB} = \frac{\sqrt{E^2 - E_0^2}}{eB}.$$

Здесь $E = mc^2 = E_0 + W$ – полная энергия частицы; W – кинетическая энергия; $E_0 = m_0c^2$ – энергия покоя частицы. Для протона $E_0 = 938,26$ МэВ, а для электрона $E_0 = 0,511$ МэВ. Период обращения частицы по указанной окружности будет

$$T = \frac{2\pi mc}{eB} = \frac{2\pi E}{eBc}.$$

Для заряженных частиц, движущихся в электрическом поле, справедливо соотношение

$$\frac{dE}{dt} = e\vec{v}\vec{E},$$

где $\frac{dE}{dt}$ – изменение энергии ускоряемой частицы в единицу времени.

Таким образом, для ускорения, т. е. для изменения энергии частицы, необходимо иметь электрическое поле, напряженность которого совпадает с направлением скорости частицы.

Классификация ускорителей

Классификация по параметрам

С точки зрения физика-экспериментатора, который является потребителем пучков заряженных частиц, ускоренных до высокой энергии, каждый ускоритель характеризуется следующими параметрами:

- сортом ускоряемых частиц;
- энергией ускоряемых частиц;
- интенсивностью получаемых пучков;
- энергетическим разбросом частиц в пучке;
- временной структурой пучка;
- геометрическими характеристиками пучка (иммитансом).

По сорту ускоряемых частиц ускорители делятся на два больших класса: электронные и протонные. К последним относятся также ускорители, ускоряющие дейтроны, альфа-частицы и тяжелые ядра. Конструктивное отличие этих классов ускорителей связано с различием массы покоя протона и электрона, что приводит к двум следствиям.

Первое из этих следствий заключается в следующем. Скорость ускоряемых частиц связана с их кинетической энергией W формулой

$$\beta = \frac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{E_0}{E_0 + W} \right)^2},$$

где E_0 – энергия покоя частицы. Из этой формулы видно, что электрон, имеющий энергию покоя $E_0 = 0,511$ МэВ, уже при кинетической энергии

в несколько МэВ является ультррелятивистской частицей, движущейся со скоростью, близкой к скорости света. При дальнейшем ускорении электрона его скорость практически не меняется, а увеличение энергии происходит только за счет увеличения его массы. С другой стороны, протон, имеющий энергию покоя, равную $E_0 = 938,26$ МэВ, становится ультррелятивистской частицей, движущейся со скоростью, близкой к скорости света, только при энергии в несколько ГэВ.

Таким образом, электронные ускорители, в отличие от протонных, имеют дело с частицами, движущимися с постоянной скоростью, почти равной скорости света. Протонные ускорители в диапазоне энергий до нескольких ГэВ ускоряют частицы, у которых скорость движения в процессе ускорения непрерывно изменяется. Поэтому конструкция протонных ускорителей при прочих равных условиях оказывается несколько более сложной, чем конструкция электронных ускорителей.

Второе следствие, вытекающее из разницы в массах электрона и протона, заключается в том, что в циклических ускорителях, в которых ускоряемые частицы за счет использования магнитных полей движутся по криволинейным траекториям, из-за наличия центростремительного ускорения частиц возникает электромагнитное излучение, носящее название синхротронного излучения. Мощность этого излучения обратно пропорциональна четвертой степени массы покоя частицы, поэтому в электронных циклических ускорителях имеется проблема восполнения потерь энергии ускоряемых частиц из-за синхротронного излучения, на что тратится очень большая энергия ускоряющих устройств. В протонных ускорителях такой проблемы нет.

Кроме первичных пучков частиц, непосредственно выводимых из ускорителя, в физических исследованиях широкое применение находят пучки вторичных частиц, получаемых при бомбардировке пучками первичных частиц различных мишеней. На протонных ускорителях это пучки нейтронов высокой энергии, пучки π - и K -мезонов, пучки гиперонов, антипротонов и т. д.

Для формирования вторичных пучков создают специальные тракты пучков, состоящие из магнитов, магнитных линз, сепараторов и т. п., с помощью которых осуществляется выделение из смеси частиц, вылетающих из мишени, нужной компоненты и транспортировка полученного пучка к физической установке. Пучки вторичных частиц, в свою очередь, могут являться источником пучков третьего поколения. Так, из пучков π -мезонов, образуемых в p -, N -соударениях, могут быть получены пучки μ -мезонов, которые образуются при распаде π -мезона на μ -мезон и нейтрино. Для этой цели необходимо сформировать пучок π -мезонов и направить его в специальное устройство – мезонный канал, с помощью которого образуемые при распаде π -мезона на лету μ -мезоны будут соби-

раться в единый пучок. Затем образовавшаяся смесь π - и μ -мезонов проходит через магнитный сепаратор, и выделенный пучок μ -мезонов транспортируется к физической установке.

По энергии ускоряемых частиц ускорители могут быть разделены на три группы: ускорители низких энергий, ускорители средних, или промежуточных, энергий и ускорители на высокие и сверхвысокие энергии. Каждая из этих групп тесно связана с присущей ей областью физических исследований.

Ускорители низких энергий имеют конечную энергию ускоренных частиц на уровне 10 МэВ, они связаны с исследованиями в области ядерной физики и широко применяются в промышленности и медицине. Характерной здесь является энергия, равная высоте кулоновского барьера в ядрах, которая составляет около 10 МэВ. Частицы с меньшей энергией не могут вызвать ядерной реакции и не могут использоваться для исследования ядер.

Ускорители средних энергий, к которым относятся ускорители с энергией ускоряемых частиц порядка нескольких сотен МэВ, также в основном связаны с исследованиями в области ядерной физики. Характерной здесь является пороговая энергия образования π -мезонов, которая при рождении π -мезонов в протон-ядерных взаимодействиях составляет величину около 200 МэВ. Поэтому протонные ускорители средних энергий часто используют как мезонные фабрики, которые обеспечивают получение интенсивных пучков π - и μ -мезонов. В настоящее время в мире работают три мезонные фабрики: изохронный циклотрон на энергию протонов 590 МэВ в Цюрихе (Швейцария), изохронный циклотрон, ускоряющий отрицательные ионы водорода, на энергию 520 МэВ в Ванкувере (Канада) и линейный протонный ускоритель на энергию 800 МэВ в Лос-Аламосе (США). Продолжается создание мезонной фабрики – линейного ускорителя на энергию 600 МэВ в ИЯИ, в Троицке (Московская обл.), чье строительство было приостановлено в 90-х годах в связи с перестройкой.

Ускорители на высокие и сверхвысокие энергии ускоряют протоны и электроны до энергии в несколько ГэВ и выше.

По временной структуре пучка ускорители делятся на импульсные и непрерывного действия. Импульсные ускорители часто оказываются неудобными для физиков, т. к. большинство детекторов ядерного излучения, используемых в эксперименте, имеют конечное мертвое время, в течение которого они не могут воспринимать новые частицы. Поэтому, для того чтобы не было просчетов, средние промежутки времени между приходом частиц на детектор не должны быть меньше его мертвого времени. В связи с этим использование импульсных ускорителей, у которых все выходящие частицы «приходят» в физическую установку в короткие промежутки времени, часто оказывается затруднительным. В ряде случа-

ев приходится снижать интенсивность пучка, что является крайне неэффективным. Поэтому практически во всех импульсных ускорителях приходится принимать особые меры для так называемой временной растяжки пучка.

Классификация по принципу действия

Электрические поля, используемые в ускорительной технике для ускорения частиц, можно условно разделить на три группы:

- электростатические (постоянные во времени);
- переменные во времени синусоидальные высокочастотные (ВЧ) электрические поля;
- вихревые электрические поля, создаваемые за счет изменения во времени магнитных полей.

Электростатические поля обладают свойством потенциальности, т. е. энергия, которую приобретает частица, проходя какой-либо участок поля, не зависит от пути, по которому двигалась частица, а определяется целиком только разностью потенциалов $U_1 - U_2$ между начальной и конечной точками пути:

$$\Delta W = e(U_1 - U_2).$$

Ускорители, в которых для ускорения частиц используются электростатические поля, носят название ускорителей прямого действия (УПД). Конечная энергия ускоряемых частиц, которая может быть достигнута в УПД, определяется имеющейся в наличии разностью потенциалов, т. е. в конечном итоге состоянием изоляционной техники. Пределом здесь является напряжение порядка 10–20 МВ. УПД состоят из двух основных частей: источника высокого напряжения и ускорительной трубки. В качестве источников высокого напряжения наиболее часто используются каскадный генератор или электростатический генератор Ван де Граафа.

Каскадный генератор – это выпрямитель с умножением напряжения (обычно такие генераторы строятся на напряжении порядка 1 МВ). Электростатический генератор Ван де Граафа обеспечивает ускоряющее напряжение порядка 10 МВ и более. В США и Англии имеются электростатические генераторы на напряжение 30 МВ. Генератор представляет собой изоляционную колонну, на конце которой установлен полый металлический шар. Внутри колонны установлен ленточный транспортер зарядов, с помощью которого шар может быть заряжен до высокого потенциала. Внутри колонны устанавливается также ускорительная трубка, а внутри шара – источник ионов (протонов). Все устройство для увеличения электрической прочности помещается под стальной колпак, в котором под давлением находится газ SF_6 (элегаз), обладающий высокой электрической прочностью.

В последнее время для ускорения тяжелых ионов или протонов стали использоваться так называемые тандем-генераторы, принцип работы которых заключается в следующем. На заземленном конце ускоряющей трубки ускорителя Ван де Граафа устанавливается ионный источник отрицательно заряженных ионов. Эти ионы проходят ускоряющую трубку до шара и ускоряются до энергии q_1U , где q_1 – заряд иона. Внутри шара ионы проходят через фольгу, где происходит их обдирка и они превращаются в положительно заряженные ионы с зарядом q_2 . Затем они поворачиваются с помощью магнита на 180° и вновь ускоряются, проходя ускоряющую трубку от шара до заземленного конца, и приобретают при этом энергию q_2U . Таким образом, полная энергия частицы оказывается равной $W = (q_1 + q_2)U$.

Переменные во времени ВЧ электрические поля уже не обладают свойством потенциальности, поэтому при использовании таких полей в ускорителях конечная энергия частиц, в принципе, ничем не ограничена. Пределы по конечной энергии частиц здесь определяются только техническими и экономическими соображениями.

Ускорители, в которых используются ВЧ электрические поля, носят название резонансных. Для того чтобы пояснить принцип работы этих ускорителей, введем условный термин «ускоряющая станция», или «ускоряющая ячейка». Под «ускоряющей станцией» будем понимать некоторое устройство, внутри которого тем или иным способом создается ВЧ электромагнитное поле. Вид и конструкция «ускоряющей ячейки» нам сейчас не важны, будем представлять ее в виде ящика с двумя отверстиями в противоположных стенках, через которые входит и выходит частица. Внутри «ящика» имеется ВЧ электромагнитное поле, вне «ящика» поля нет. Будем предполагать, что время пролета частицы через ускоряющую станцию мало по сравнению с периодом ВЧ-колебаний. Тогда приращение энергии, которое получит частица при прохождении ускоряющей станции, может быть записано в виде

$$\Delta W = eU_0 \cos \varphi,$$

где U_0 – амплитуда ускоряющего напряжения в станции, а φ – фаза электрического поля в момент прохождения частицы. В зависимости от φ приращение энергии частицы может изменяться в пределах от $-eU_0$ до eU_0 , и, следовательно, частица в зависимости от знака $\cos \varphi$ может либо ускоряться, либо замедляться. Приращение энергии частицы при прохождении одной ускоряющей станции обычно невелико – порядка десятков или сотен кэВ. Для получения более высокой энергии можно поступить двумя путями.

Первый путь состоит в том, что можно изготовить достаточно много однотипных ускоряющих ячеек и установить их в линию друг за другом

так, чтобы ускоряемая частица последовательно прошла через каждую ячейку. Конечная энергия частиц будет равна сумме энергий, полученных частицей в каждой ускоряющей ячейке,

$$W_k = e \sum_{i=1}^N U_i \cos \varphi_i .$$

По этому принципу строятся так называемые линейные ускорители.

Второй путь заключается в том, что для получения высокой энергии ускоряемых частиц можно обойтись одной ускоряющей ячейкой (или несколькими), но заставить частицу проходить эту ячейку многократно. Это возможно осуществить с помощью соответствующих магнитных полей, создаваемых одним или несколькими специальными магнитами. После каждого прохождения ускоряющей ячейки частица попадает в магнитное поле, движется в этом поле по замкнутой круговой траектории и, совершив в магнитном поле оборот на 360° , вновь проходит через ускоряющую ячейку. Ускорители, построенные по этому принципу, носят

название циклических. Конечная энергия частицы определяется в этом случае произведением приращения энергии за один оборот и количеством оборотов.

Третий вид электрических полей, используемых в ускорительной технике, – это вихревые магнитные поля, которые возникают при изменении магнитного потока в каком-либо железном или ферритовом сердечнике. Ускорители, в которых для ускорения частиц используются вихревые электрические поля, носят название индукционных. Существуют циклические индукционные ускорители, примером которых является хорошо известный бетатрон, и линейные индукционные ускорители.

Предельная энергия для синхроциклотронов

Бурное развитие физики ядра и элементарных частиц все время ставило перед ускорительной техникой все новые и новые требования к увеличению энергии и интенсивности ускоряемых пучков. В соответствии с этими требованиями развитие ускорительной физики и техники шло по двум путям: создание сильноточных ускорителей с большой интенсивностью ускоряемых пучков и создание ускорителей на высокие и сверхвысокие энергии.

Увеличение энергии частиц, ускоряемых в циклическом ускорителе, связано с увеличением $(Br)_{\max}$ ускорителя, где ρ – радиус кривизны траектории частицы, т. е. величина, пропорциональная размеру ускорителя, а B – максимальное значение индукции магнитного поля, которое может быть достигнуто в электромагните ускорителя. При использовании элек-

ромагнитов, магнитопроводы которых изготовлены из малоуглеродистой стали, величина B ограничена значениями порядка 15–18 кГс. При использовании безжелезных магнитов с обмотками из свехпроводящего кабеля B может достигать значений порядка 50 кГс. В таблице представлены величины ρ для различных энергий ускоряемых протонов при $B = 18$ и 50 кГс, рассчитанные по формуле

$$\rho = \frac{1}{eB} \sqrt{(E_0 + W)^2 - E_0^2}.$$

Таблица

Величины ρ для различных энергий ускоряемых протонов

W , ГэВ	ρ , м при $B = 18$ кГс	ρ , м при $B = 50$ кГс
1	3,14	1,13
5	10,86	3,90
10	20,18	7,26
50	94,3	33,9
100	186,9	67,3
500	927,7	334,0
1 000	1 854	667
10 000	18 520	6 667

Самый большой в мире электромагнит с круглым полюсом – это электромагнит синхроциклотрона ПИЯФ с диаметром полюса 6,85 м и весом 8 000 т, предназначенный для ускорения протонов до энергии 1 ГэВ. Так как вес электромагнита приблизительно пропорционален кубу диаметра полюса, то становится ясно, что создавать электромагниты с диаметром полюса больше 7 м становится невыгодным. В связи с этим ускорители с энергией частиц выше 1 ГэВ создаются на основе кольцевых малоапертурных магнитных систем, дающих значительный выигрыш в весе магнитов по сравнению с магнитами со сплошным круглым полюсом.

Система единиц, используемая в ускорительной технике

В научной литературе по ускорителям авторами разных стран используются разные системы единиц. Так, например, широко применяется в физике система единиц Гаусса, в которой механические величины измеряются в единицах CGS, электрические величины (заряд, разность потенциалов, сила электрического тока и напряженность электрического поля) – в системе CGS (E), а магнитные величины – в системе CGS (M).

Напряженность магнитного поля измеряется здесь в эрстедах (Э), индукция магнитного поля – в гауссах (Гс), магнитный поток – в максвеллах (Мкс).

На практике широко используется система СИ, в которой заряд измеряется в кулонах (Кл), разность потенциалов – в вольтах (В), сила тока – в амперах (А), напряженность электрического поля – в вольтах на метр (В/м), напряженность магнитного поля – в амперах на метр (А/м), индукция магнитного поля – в теслах (Тл) и магнитный поток – в веберах (Вб).

Имеют место соотношения:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Кл} &= 3 \cdot 10^9 \text{ CGS (E) заряда;} \\ 1 \text{ В} &= 3 \cdot 10^{-2} \text{ CGS (E) потенциала;} \\ 1 \text{ А} &= 3 \cdot 10^9 \text{ CGS (E) силы тока;} \\ 1 \text{ В/м} &= 3 \cdot 10^{-4} \text{ CGS (E) напряженности поля;} \\ 1 \text{ А/м} &= 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Э;} \\ 1 \text{ Тл} &= 10^4 \text{ Гс;} \\ 1 \text{ Вб} &= 10^8 \text{ Мкс.} \end{aligned}$$

В ядерной физике и ускорительной технике принято измерять энергию частиц во внесистемных единицах: мегаэлектронвольтах (1 МэВ = $1,6022 \cdot 10^{-6}$ эрг), гигаэлектронвольтах и тераэлектронвольтах, а импульс частицы, соответственно, в мегаэлектронвольтах на секунду (МэВ/с), гигаэлектронвольтах на секунду (ГэВ/с) и тераэлектронвольтах на секунду (ТэВ/с). В этом случае произведение pc , имеющее размерность энергии, также измеряется в мегаэлектронвольтах, гигаэлектронвольтах и тераэлектронвольтах.

Интенсивность пучков частиц измеряется обычно в частицах на секунду (част./с). Интенсивность пучков заряженных частиц можно измерять также в микроамперах или миллиамперах:

$$\begin{aligned} 1 \text{ мкА} &= 6,25 \cdot 10^{12} \text{ част./с;} \\ 1 \text{ mA} &= 6,25 \cdot 10^{15} \text{ част./с.} \end{aligned}$$

Приведем также часто встречающиеся в ядерной физике постоянные величины:

энергия покоя протона	$E_0 = m_p c^2 = 938,26 \text{ МэВ};$
масса покоя протона	$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг};$
энергия покоя электрона	$E_0 = m_e c^2 = 0,511 \text{ МэВ};$
масса покоя электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг};$
элементарный электрический заряд	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл};$
электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/В} \cdot \text{м};$
магнитная постоянная	$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{с/А} \cdot \text{м.}$

Николай Константинович как-то предложил дополнить Международную систему единиц СИ новой единицей. «Единица порядчности –

это Тамм», – такое определение ввел в науку известный генетик вавилонской школы Владимир Павлович Эфроимсон, получивший 10 лет лагерей за «лженауку» генетику.

Академик Игорь Евгеньевич Тамм (Нобелевская премия 1958 года), физик-теоретик, создатель водородной бомбы совместно с А. Д. Сахаровым и др. По учебнику И. Е. Тамма «Основы теории электричества» Николай Константинович сдавал экзамен по электродинамике на 3-м курсе физмеха Политехнического института.

Между прочим, у ускорительщиков есть собственная единица интенсивности – Векслер (1 протон в 1 сезон). История «введения» этой единицы связана с тем, что на синхроциклотроне 10 ГэВ в Дубне, научным руководителем которого был Векслер, не была получена проектная интенсивность.

Необходимо отдавать себе отчет, что основное назначение ускорителя на большие энергии, на создание которых требуются немалые интеллектуальные и финансовые затраты, – это фундаментальные исследования, относящиеся к познанию нашего мира. Именно ускорители позволяют нам увидеть и, возможно, понять, что это там, за горизонтом?



Рекомендуемая литература

1. Гринберг А. П. Методы ускорения заряженных частиц. М.–Л., 1950.
2. Ливингстон М. С. Ускорители. М., 1956.
3. Комар Е. Г. Ускорители заряженных частиц. М., 1964.
4. Яблоков Б. Н. Ускорители. М., 1962.

Глава 1

Этап строительства и запуска синхроциклотрона ПИЯФ. Программа развития ускорительного комплекса

1.1. История вопроса

В середине 50-х годов было принято правительственное решение о создании филиала Ленинградского физико-технического института им. А. Ф. Иоффе АН СССР (ФТИ), в который предполагалось перевести все исследования в области физики ядра и элементарных частиц. Местом расположения филиала был выбран город Гатчина Ленинградской области. В качестве основных базовых экспериментальных установок филиала ФТИ было решено построить модернизированный исследовательский реактор ВВР-М мощностью 10 МВт и самый крупный в своем классе синхроциклотрон на рекордную для этого типа ускорителей энергию ускоряемых протонов 1 ГэВ. Исследовательский реактор института был пущен в эксплуатацию в 1959 году, ускоритель – в 1970 году. После завершения строительства, в 1971 году, филиал ФТИ был преобразован в самостоятельный Ленинградский, теперь Петербургский, институт ядерной физики им. Б. П. Константинова (ПИЯФ).

С принятием правительственного решения о сооружении синхроциклотрона в Гатчине у института возникла задача разработать общую концепцию создания ускорителя и связанного с ним экспериментального комплекса и наметить программу физических исследований и прикладных работ, которые планировалось проводить на пучках нового ускорителя. Согласно этой концепции синхроциклотрон на энергию протонов 1 ГэВ должен был стать базовой экспериментальной установкой института, предназначенной для широкого использования в исследованиях структуры атомных ядер и механизма ядерных реакций, в изучении свойств и взаимодействий элементарных частиц, в исследованиях в области физики твердого тела, а также в области радиобиологии, радиацион-

ной медицины и прикладной физики. Ускоритель должен был также стать полигоном для отработки аппаратуры и методик регистрации ядерных излучений, предназначенных для использования на ускорителях высоких и сверхвысоких энергий как у нас в стране, так и за рубежом. Широкий диапазон исследований определил в качестве основного требования к ускорителю его универсальность и оснащенность различными трактами пучков. При этом основное внимание при создании ускорителя и его экспериментального комплекса должно было быть уделено созданию интенсивного внешнего протонного пучка с малым энергетическим разбросом, малым иммитансом и хорошими временными характеристиками. Кроме внешних протонных пучков необходимо было создать интенсивные пучки частиц второго поколения: π - и μ -мезонов и нейтронов. Экспериментальный комплекс ускорителя должен был быть оснащен удобными экспериментальными залами и надежной радиационной защитой.

1.2. Крупнейшие синхроциклотроны мира

В период разработки проекта и сооружения синхроциклотрона ситуация с протонными ускорителями средних (промежуточных) энергий складывалась следующим образом. В различных лабораториях мира в это время уже действовало порядка десяти синхроциклотронов. К наиболее крупным из них относились:

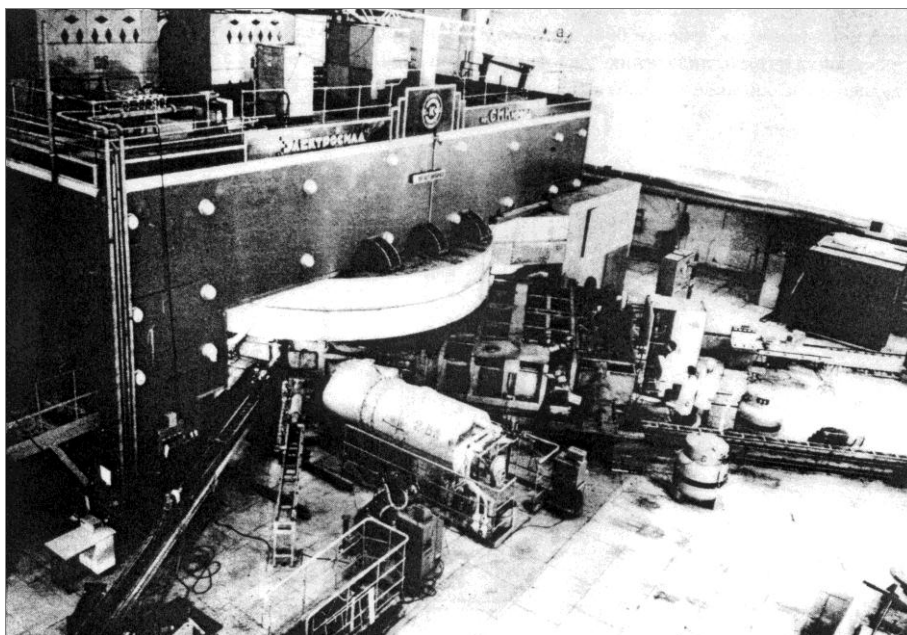
- 184-дюймовый синхроциклотрон Калифорнийского университета США на энергию протонов 740 МэВ^1 (один из первых синхроциклотронов);
- синхроциклотрон ЛЯП ОИЯИ в Дубне на энергию протонов 680 МэВ^2 (рис. 1.1а, б);
- синхроциклотрон ЦЕРН в Женеве (Швейцария) на энергию протонов 600 МэВ^3 (рис. 1.2а, б);
- аналогичный ускорителю ЦЕРН синхроциклотрон SREL в г. Ньюпорт (США) на энергию протонов 600 МэВ^4 .

¹ Brobeck W. M., Lawrence E. O. et al. // Phys. Rev. 1947. V. 71, No. 7. P. 449.

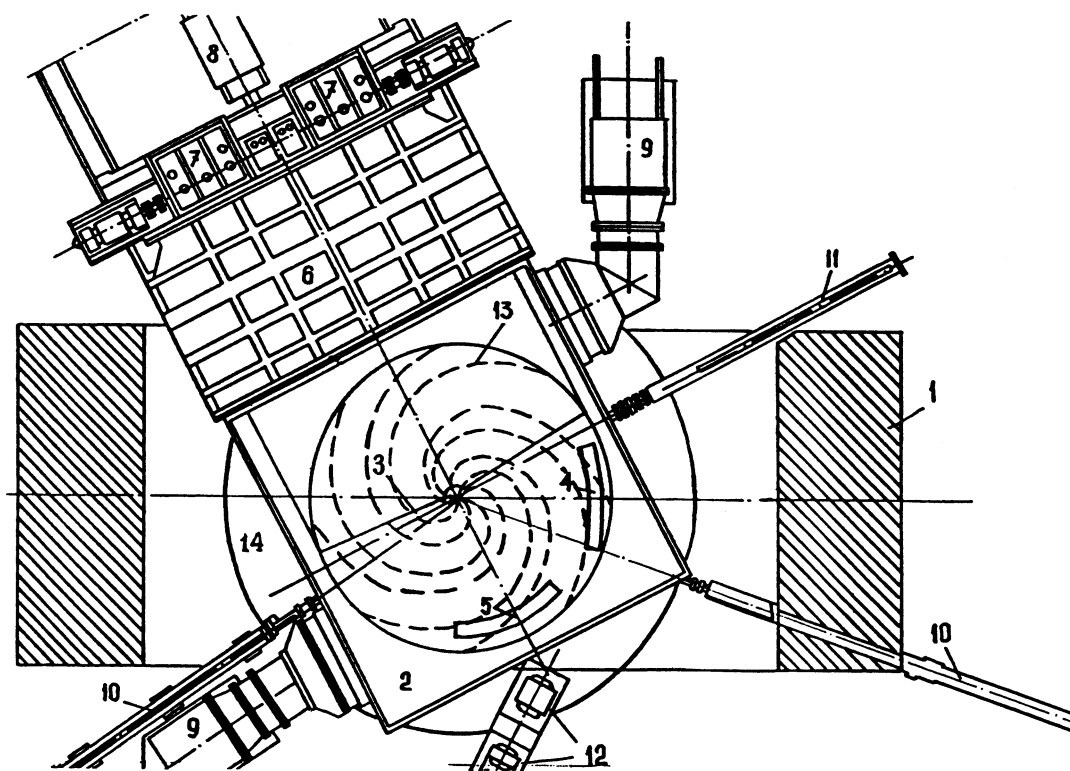
² Ефремов Д. В., Мещеряков М. Г., Джелепов В. П. и др. // АЭ. 1956. № 4. С. 5.

³ Gentner W. et al. // Philips Technical Review. 1961. V. 22. P. 141.

⁴ Cyclotrons-1978, 8 Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, FM-11. Indiana, USA, 1978.

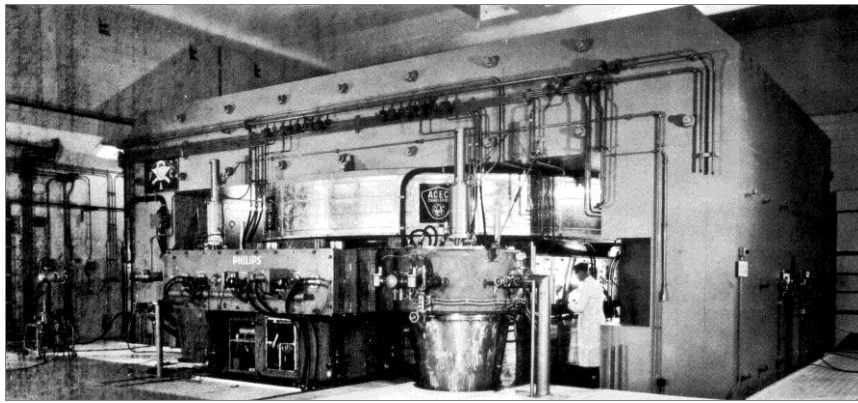


а)

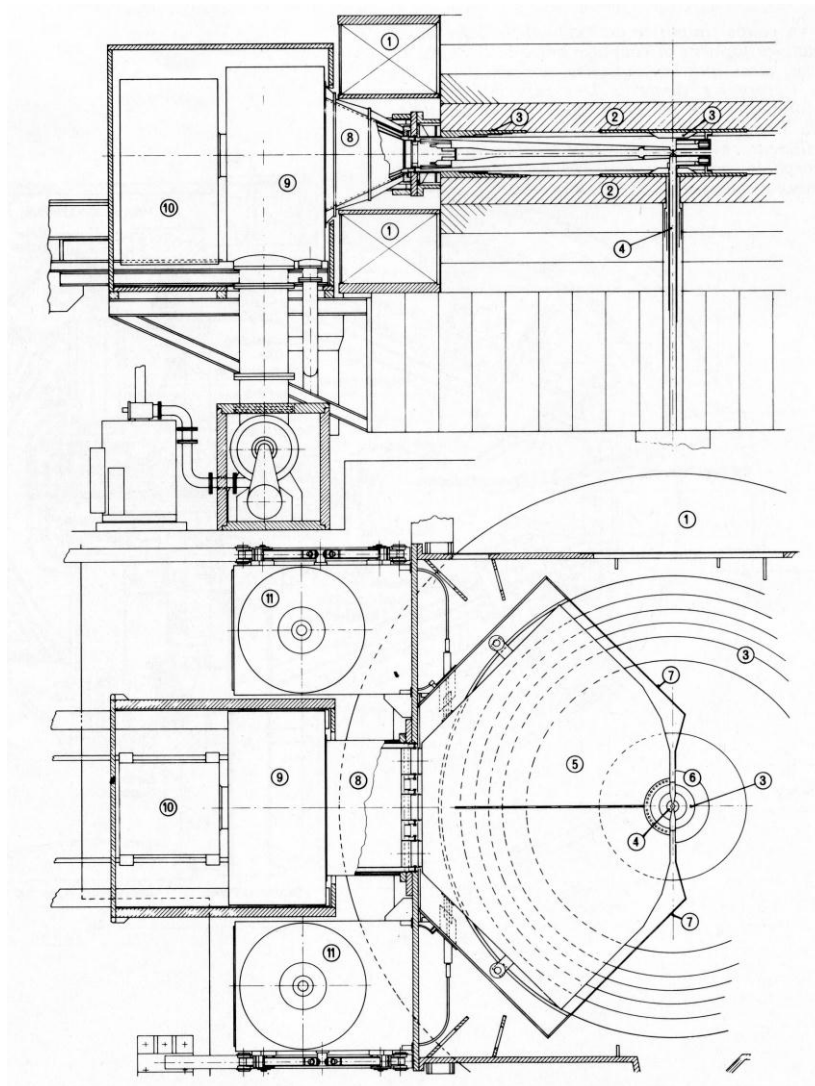


б)

Рис. 1.1. Синхроциклотрон (фазотрон) 680 МэВ (ОИЯИ, Дубна):
 а) общий вид (после его реконструкции в фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля); б) схема синхроциклотрона. 1 – электромагнит; 2 – вакуумная камера; 3 – спиральные секторные накладки; 4 – выводной канал; 5 – С-электрод системы временной растяжки пучка; 6 – переходный отсек от дуанта к вариатору частоты; 7 – вариатор частоты; 8 – окончательный каскад генератора ВЧ для питания дуанта; 9 – вакуумный насос; 10, 11 – диагностические и мишенные пробники; 12 – фокусирующие линзы выводного тракта протонного пучка



а)



б)

Рис. 1.2. Синхроциклотрон 600 МэВ (ЦЕРН, Женева):

а) общий вид (до реконструкции его вариатора частоты камертонного типа и перехода на вращающийся многолопастный вариатор); б) схема синхроциклотрона. 1 – катушки электропитания магнита; 2 – полюсные наконечники; 3 – шиммирующие накладки; 4 – ионный источник; 5 – дуант; 6 – малый антидуант; 7 – антидуантная рамка; 8 – переходный патрубок от дуанта к вариатору; 9 – кожух вариатора частоты; 10 – оконечный каскад генератора ВЧ для питания дуанта; 11 – вакуумные насосы

В 1975 году был запущен еще один крупный синхроциклотрон на энергию протонов 570 МэВ Лаборатории НЕВИС (США)¹.

Основным недостатком этих ускорителей была относительно малая интенсивность ускоряемого пучка, составляющая величину порядка 1 мкА, что было связано в первую очередь с малой амплитудой ускоряющего напряжения и недостаточной вертикальной фокусировкой в центральной области ускорителя, где действуют дефокусирующие силы пространственного заряда пучка. Другим недостатком этих ускорителей был слишком малый коэффициент вывода пучка из ускорительной камеры, находящийся на уровне порядка 5 %, что также было связано с малой амплитудой ускоряющего напряжения и обусловленным этим обстоятельством малым шагом орбит на последних радиусах, где начинается вывод пучка. В связи с этим, с целью повышения интенсивности пучка, в ЛЯП ОИЯИ² и в ЦЕРН³ начали разрабатываться проекты реконструкции работающих там синхроциклотронов, направленные на увеличение амплитуды ускоряющего напряжения за счет коренной перестройки ВЧ-систем, улучшения вертикальной фокусировки в центральной области ускорителя и повышение эффективности вывода пучка из ускорительной камеры. В это же время начало развиваться новое направление ускорителей средних энергий – мезонные фабрики, основанные на базе изохронных циклотронов или сильноточных протонных линейных ускорителей с интенсивностью пучка в сотни мкА. Началась разработка проектов изохронных циклотронов в Виллигене (Швейцария) на энергию 590 МэВ⁴ и в Ванкувере (Канада) на энергию 520 МэВ⁵. В Лос-Аламосе (США) началась разработка мезонной фабрики на основе линейного протонного ускорителя на энергию 800 МэВ⁶. Аналогичный проект на энергию протонов 600 МэВ стал разрабатываться в ИЯИ РАН, в городе Троицке (Московская обл.)⁷.

В этой ситуации перед нами встала задача разработки общей концепции создания синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ и связанного с ним экспериментального комплекса, с тем чтобы по отдельным

¹ Cyclotrons-1978, 8 Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, FM-9. Indiana, USA, 1978.

² Глазов А. А. и др. // АЭ. 1969. Т. 27. С. 1.

³ Proposal for the Improvement of the 600 MeV Syncro-Cyclotron. MSC Internal Report 67-5, 1967.

⁴ Willax H. A. // Proc. of the Int. Cyclotron Conf. CERN 63-19, 1963. P. 386.

⁵ Haddock R. P. et al. // Тр. Междунар. конф. по ускорителям высокой энергии. М., 1964. С. 568.

⁶ Knapp E. A. et al. // Proc. of 1966 Linear Acc. Conf. Los Alamos (LA-3609), 1966. P. 83.

⁷ Мурун Б. П. // Тр. III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1973. Т. 1. С. 234–248.

направлениям обеспечить его конкурентоспособность среди реконструируемых синхроциклотронов и вновь сооружаемых мезонных фабрик. В табл. 1.1 представлены параметры крупных синхроциклотронов до реконструкции, в табл. 1.2 и 1.3 представлены параметры крупных синхроциклотронов и мезонных фабрик после реконструкции.

Таблица 1.1

Параметры крупных синхроциклотронов до реконструкции

Место установки	Энергия, МэВ	Диаметр полюса, м	Интенсивность пучка внутри камеры, мкА	Интенсивность выведенного пучка, част./с	Год пуска
ЛЯП ОИЯИ, Дубна, Россия	680	6	2,3	$4 \cdot 10^{11}$	1956
ЦЕРН, Женева, Швейцария	600	5	1,3	$5,7 \cdot 10^{11}$	1957
LBI, Калифорния, США	740	4,7	0,8	$6 \cdot 10^{11}$	1946
SREL, Ньюпорт, Вирджиния, США	600	5	2,5	$6 \cdot 10^{11}$	1965

Таблица 1.2

Параметры крупных синхроциклотронов после реконструкции

Место установки	Энергия, МэВ	Диаметр полюса, м	Интенсивность пучка внутри камеры, мкА	Интенсивность выведенного пучка, част./с	Год пуска после реконструкции
ЛЯП ОИЯИ, Дубна, Россия	660	6	$4 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{13}$	1984
ЦЕРН, Женева, Швейцария	600	5	1,3	$5,7 \cdot 10^{11}$	1975

Параметры мезонных фабрик после реконструкции

Место установки	Энергия, МэВ	Тип ускорителя	Интенсивность, мкА	Год пуска
PSI, Виллиген, Швейцария	590	Изохронный циклотрон	1 000	1974
TRIUMF, Ванкувер, Канада	520	Изохронный циклотрон Н ⁻ -ионов	400	1974
LAMPF, Лос-Аламос, США	800	Линейный ускоритель	1 000	1972
ИЯИ, Троицк, Россия	600	Линейный ускоритель	500	—

Тип ускорителя и энергия ускоряемых протонов были определены правительственным постановлением и обсуждению не подлежали. Ускоритель задумывался как экспериментальная база для фундаментальных и прикладных исследований во вновь сооружаемом Институте ядерной физики АН СССР в Гатчине. Поэтому, для того чтобы определить основные параметры сооружаемого ускорителя, необходимо было сформулировать задачи, которые можно было бы решать на его пучках. Этому предшествовала большая работа, которая была проведена в физических лабораториях ФТИ и его гатчинском филиале.

Использование синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ включало в себя следующие направления:

- исследования в области ядерной физики;
- исследования в области физики элементарных частиц;
- исследования в области физики твердого тела с использованием ядерно-физических методов;
- исследования явления μ -катализа реакций термоядерного синтеза;
- исследования в области утилизации отходов ядерной промышленности;
- использование ускоренных протонов для медицинских целей;
- испытания радиационной стойкости изделий электронной промышленности, предназначенных для использования в космической технике;
- отработка регистрирующей аппаратуры и методик для использования в исследованиях на отечественных и зарубежных ускорителях на высокие и сверхвысокие энергии.

1.3. Программа физических исследований на синхроциклотроне ПИЯФ

В институте был проведен анализ тенденций развития физики ядра и элементарных частиц, который показал, что, хотя на мезонных фабриках интенсивность протонного пучка значительно выше, чем на синхроциклотронах, за счет более высокой энергии ускоряемых протонов, при наличии хорошей моноэнергетичности и специфичной временной структуры пучка, в целом ряде направлений исследований, не требующих высокой интенсивности пучка, синхроциклотрон с энергией протонов 1 ГэВ может найти достойное применение в современных экспериментальных исследованиях. Энергия протонов 1 ГэВ даже при не очень высокой интенсивности пучка является наиболее оптимальной для исследования структуры ядер и распределений ядерной материи методом упругого и квазиупругого рассеяния. Эта область энергий является идеальной для описания многократного рассеяния теории Глаубера – Ситенко¹, что в сочетании с хорошей моноэнергетичностью пучка и достаточно высоким коэффициентом временного заполнения пучка делает синхроциклотрон на энергию протонов 1 ГэВ полезным в современных ядерных исследованиях. При энергии 1 ГэВ спин-спиновые члены амплитуды протон-нуклонного взаимодействия при малых углах рассеяния относительно малы, что упрощает анализ экспериментальных данных и уменьшает неопределенность в параметрах исследуемых ядер.

Синхроциклотрон на энергию протонов 1 ГэВ может иметь большие перспективы, в частности, для получения и исследования короткоживущих нейтронно-дефицитных ядер, удаленных от полосы бета-стабильности, которые, в силу их малых периодов полураспада и небольших сечений образования, не могли быть исследованы существовавшими в то время экспериментальными методами. Наибольший интерес для понимания природы ядерных сил вызывает вопрос о свойствах ядер на границе бета-стабильности и возможности обнаружения у этих нуклидов протонной и двухпротонной радиоактивности, испускания запаздывающих протонов, запаздывающего деления и других экзотических видов распада, которые энергетически невозможны для нуклидов вблизи дорожки бета-стабильности².

В области физики элементарных частиц синхроциклотрон на энергию протонов 1 ГэВ может эффективно использоваться для исследования протон-протонного и пион-протонного взаимодействий³. При этом ис-

¹ Белостоцкий С. Л. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 17. С. 101–102.

² Berlovich E. Y. et al. // Proc. EMIS-8 Conf. Sweden, 1973. P. 349.

³ Гордеев В. А. и др. // ПТЭ. 1976. Вып. 2. С. 25.

следования пион-протонного взаимодействия могут быть проведены в области энергий π -мезонов вплоть до 750 МэВ, недоступных на других синхроциклотронах и мезонных фабриках. В результате этих исследований можно будет получить новые точные данные, которые восполнят пробел в мировом банке данных. Эти данные послужат основой для проведения соответствующего фазового анализа пион-нуклонного рассеяния и позволят уточнить фундаментальные константы, связанные с π -, N -резонансами. Для реализации этой возможности необходимо создать на базе синхроциклотрона π -мезонный канал высокой энергии, формирующий пучок π -мезонов, вылетающих из мезонообразующей мишени под нулевым углом. Большой интерес представляют также исследования η -мезонов¹, образующихся при взаимодействии протонов с ядрами.

Синхроциклотрон с энергией протонов 1 ГэВ в силу специфической временной структуры пучка может быть успешно использован для создания импульсных нейтронных пучков, необходимых для измерения сечений взаимодействия нейтронов с ядрами с помощью нейтронной время-пролетной спектроскопии. Большое практическое значение для ядерной промышленности имеют измерения энергетической зависимости полных сечений деления урана и трансурановых элементов протонами. Эти данные необходимы для создания управляемых ядерных систем (ADS) и трансмутации ядерных отходов. Для обеспечения этих работ необходимо создание пучка протонов с переменной энергией от 200 до 1 000 МэВ. Пучки μ^- -мезонов низкой энергии необходимы, например, для исследования явления $dd\mu^-$ -, $pd\mu^-$ - и $dt\mu^-$ -катализа реакций термоядерного синтеза в различных смесях изотопов водорода, а также процессов мюонного захвата. Пучки μ^+ -мезонов необходимы для исследований магнитных фазовых переходов в магнетиках и сверхпроводниках с использованием μ SR-метода. Для формирования пучков μ -мезонов, образующихся при распаде π -мезонов на лету, необходимо создание специализированного μ -мезонного канала.

Медицинское использование протонного пучка синхроциклотрона могло быть осуществлено в двух направлениях:

- 1) протонно-лучевая терапия;
- 2) разработка методов получения радиофармацевтических препаратов, меченных радиоактивными ядрами, для диагностики различных заболеваний.

¹ Lopatin I. V. et al. // Proc. Int. Conf. on Physics with GeV-Particle Beams. August 22–25, 1994. Julich, Germany. P. 120.

Энергия протонов 1 ГэВ представляет интерес также и для исследования радиационной стойкости изделий электронной техники, используемой для космических исследований, и военной техники.

Исходя из опыта эксплуатации действующих синхроциклотронов и основываясь на прогнозе дальнейшего развития физики ядра и элементарных частиц, основные требования к синхроциклотрону ФТИ (ПИЯФ) на стадии разработки проекта были сформулированы следующим образом:

- достаточно высокая интенсивность ускоряемого протонного пучка, на уровне нескольких мкА;
- высокоэффективная система вывода протонного пучка из ускорительной камеры с эффективностью вывода не менее 30 %;
- малый иммитанс и малый энергетический разброс протонов в выведенном пучке;
- система временной растяжки как внутреннего, так и внешнего протонного пучка с коэффициентом временного заполнения пучка не менее 50 %;
- система однооборотного сброса протонного пучка на внутреннюю мишень для получения импульсного пучка испарительных нейтронов, необходимого для создания на его базе нейтронного спектрометра по времени пролета;
- комплекс стационарных трактов протонных пучков разного назначения и пучков вторичных частиц: нейтронов и π - и μ -мезонов;
- хорошие эксплуатационные характеристики и стабильность работы ускорителя.

Для эффективного использования синхроциклотрона в разных направлениях фундаментальных и прикладных исследований экспериментальный комплекс синхроциклотрона должен включать в себя:

- экспериментальный зал для размещения экспериментального оборудования с целью проведения научных и прикладных исследований на пучках синхроциклотрона;
- выведенный из ускорительной камеры протонный пучок полной интенсивности для исследования структуры атомных ядер и прикладных исследований;
- малый радиационный фон и наличие эффективной радиационной защиты в экспериментальном зале, в месте установки аппаратуры для физических исследований;
- пучки π -мезонов обоих знаков зарядов в широком диапазоне энергий;
- μ -мезонный канал для получения чистых пучков μ -мезонов обоих знаков заряда;

- медицинский протонный комплекс для целей протонной терапии;
- лабораторию для исследования в линию с протонным пучком короткоживущих изотопов, удаленных от полосы бета-стабильности;
- нейтронный спектрометр по времени пролета.

Дальнейшая многолетняя эксплуатация синхроциклотрона ФТИ (ПИЯФ) подтвердила правильность сформулированных выше исходных требований к ускорителю. Реализация этих требований обеспечила широкое и эффективное использование синхроциклотрона ПИЯФ на энергию протонов 1 ГэВ в научных и прикладных исследованиях, проводимых институтом в области физики ядра и элементарных частиц, в физике твердого тела, медицины и других направлениях¹.

Ведущая роль в разработке физической программы на синхроциклотроне ПИЯФ и дальнейшей ее успешной реализации принадлежит члену-корреспонденту РАН, профессору А. А. Воробьеву.

1.4. Этап строительства и запуска синхроциклотрона ПИЯФ

Разработка, сооружение, наладка и ввод в эксплуатацию синхроциклотрона (1970) были произведены филиалом ФТИ и Научно-исследовательским институтом электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова (НИИЭФА) [1, 2]. Конструкция и компоновка основных узлов синхроциклотрона по техническому заданию филиала ФТИ были разработаны в НИИЭФА при участии сотрудников филиала ФТИ. Была разработана конструкция электромагнита и ускорительной камеры, выбрана схема, и разработана конструкция ряда узлов ВЧ-системы, а также ряд вспомогательных систем: вакуумная система, система электропитания и водоохлаждения узлов ускорителя, электромагниты и линзы для создания трактов пучков. От НИИЭФА в разработке проекта непосредственное участие принимали Е. Г. Комар, И. Ф. Малышев, Б. В. Рождественский, И. М. Ройфе, Е. В. Середенко, А. Т. Чесноков, Н. А. Моносзон, И. В. Гусев и В. И. Перегуд.

Формирование магнитного поля ускорителя, разработка ряда узлов ВЧ-системы, создание системы вывода пучка из ускорительной камеры, системы временной растяжки пучка, электростатической фокусировки в центральной области ускорителя, а также создание экспериментального комплекса синхроциклотрона и системы разводки и транспортировки пучков было осуществлено филиалом ФТИ. Дальнейшее усовершенство-

¹ Основные направления научной деятельности Отделения физики высоких энергий ПИЯФ РАН: сб. Гатчина, 1996–2010 гг.

вание ускорителя после его ввода в эксплуатацию осуществлялось силами филиала ФТИ.

Николай Константинович Абросимов с 1959 года являлся одним из руководителей работ филиала ФТИ по разработке и сооружению синхроциклотрона ПИЯФ, а с 1971 по 2011 год являлся заведующим Ускорительным отделом ПИЯФ, который осуществляет эксплуатацию и дальнейшее усовершенствование ускорителя и его экспериментального комплекса. Ведущими участниками работ по созданию синхроциклотрона от ФТИ были Д. Г. Алхазов, Д. М. Каминкер, А. П. Комар, Н. К. Абросимов, Н. Н. Чернов, А. В. Куликов, Г. А. Рябов, В. А. Елисеев, С. П. Дмитриев, Г. Ф. Михеев. На более поздних этапах к этой работе подключились Ю. Т. Миронов и В. И. Шалманов.

Проект здания синхроциклотрона и его технологических систем по техническому заданию филиала ФТИ был разработан в Ленинградском проектно-институте (теперь – ГУП ГИ ВНИПИЭТ), проект систем электропитания и нестандартного электротехнического оборудования разработали НИИЭФА и ГПИ «Тяжпромэлектропроект». Строительство синхроциклотрона было начато в 1957 году силами военных строителей, и уже в 1964 году были построены все здания ускорительного комплекса и закончен монтаж основного оборудования и систем электропитания. Изготовление нестандартного оборудования синхроциклотрона осуществлено на заводе ЛЭЗ ЛЕО «Электросила».

Сооружение самого крупного в мире синхроциклотрона потребовало решения целого комплекса научно-технических проблем, сложность которых была обусловлена в первую очередь высокой проектной энергией ускоряемых протонов – 1 ГэВ, которая для ускорителя типа синхроциклотрон является, по-видимому, предельной. К числу этих проблем следует отнести создание

- самого большого в мире электромагнита со сплошным полюсом с магнитной жесткостью на последнем рабочем радиусе $57 \text{ кГс} \cdot \text{м}$, что соответствует конечной энергии протонов 1 ГэВ;
- распределения азимутально-симметричного магнитного поля с точностью 10^{-4} ;
- ВЧ резонансной системы синхроциклотрона с рекордным перекрытием по частоте ускоряющего напряжения, равным 2,3;
- высокоэффективной (с коэффициентом вывода 30 %) системы вывода пучка из ускорительной камеры;
- высокоэффективной системы временной растяжки пучка;
- импульсного дефлектора для однооборотного сброса пучка внутри камеры на нейтронообразующую мишень;

- оригинальной трехэлектродной электростатической фокусирующей системы для центральной области ускорителя, обеспечивающей повышение интенсивности ускоряемого пучка до 3,5 мкА;
- системы разводки и транспортировки пучков;
- экспериментального комплекса синхроциклотрона для проведения на пучках ускорителя научных и прикладных работ.

Решение этих проблем потребовало поиска принципиально новых подходов к созданию ряда узлов и систем ускорителя. Многие из найденных в ходе разработки ускорителя технических решений были защищены авторскими свидетельствами.

Сложной технической проблемой было создание электромагнита синхроциклотрона и формирование в зазоре электромагнита заданного распределения магнитного поля, необходимого для обеспечения устойчивого движения протонов при их ускорении до конечной энергии 1 ГэВ. Электромагнит синхроциклотрона, разработанный НИИЭФА, является самым большим в мире электромагнитом со сплошным полюсом. Диаметр полюсных наконечников магнита – 6,85 м, зазор между полюсами (без шиммов) – 0,5 м, индукция магнитного поля в центре – 1,9 Тл, внешние габариты магнита – $16,5 \times 7,8 \times 10 \text{ м}^3$, масса магнитопровода – 7 800 т, мощность электропитания – 1 МВт.

Формирование магнитного поля синхроциклотрона было проведено сотрудниками филиала ФТИ в 1964–1965 годах. При этом основное внимание было обращено на получение достаточно малых амплитуд бетатронных колебаний, отсутствие резонансов бетатронных колебаний и увеличение вертикальной фокусировки в центральной области ускорителя, что потребовало разработки и изготовления специального комплекса измерительной аппаратуры на базе автоматизированного ЯМР-магнитометра и термостатированных датчиков Холла, а также создания автоматизированной координатной системы для перемещения датчиков в зазоре электромагнита. В связи с большим объемом измерений процесс измерений параметров поля был полностью автоматизирован. Такая система автоматизации измерений была создана в нашей стране впервые.

Наиболее серьезная проблема заключалась в создании ВЧ-системы синхроциклотрона с перекрытием по частоте, равным 2,3, что явилось следствием высокой для этого типа ускорителей конечной энергии ускоряемых протонов 1 ГэВ. Такое перекрытие не было достигнуто нигде в мире, и для решения этой проблемы потребовался поиск принципиально новых решений как для выбора конструктивной схемы резонансной системы, так и для выбора схемы вариатора частоты.

Конструкция ВЧ-системы была разработана в НИИЭФА. Она включала в себя полуволновую резонансную систему синхроциклотрона,

состоящую из дуанта и подсоединенных непосредственно к хвостовой части дуанта двух вращающихся вариаторов частоты. Рекордное перекрытие по частоте ускоряющего напряжения, равное 2,3, было достигнуто за счет соответствующего выбора формы дуанта и способа подключения вариаторов частоты к дуанту. Для увеличения перекрытия по емкости в схеме вариаторов частоты использовались дополнительные статорные пакеты, подключенные к дуанту через дополнительные индуктивности. Большая сложность ВЧ-системы и невозможность в связи с этим определения всех необходимых параметров системы расчетным путем потребовали проведения работ по доводке системы до проектных параметров на соответствующих макетах. С целью ускорения и удешевления работ доводка изготовленной на заводе ЛЭЗ ЛЕО «Электросила» ВЧ-системы до проектных параметров была осуществлена на реальной системе на месте ее монтажа в Гатчине. Работы были проведены в 1967–1970 годах, в ходе которых была тщательно проанализирована принципиальная схема и конструкция резонансной системы, и на основе проведенного анализа в конструкцию системы были внесены необходимые изменения, которые позволили довести систему до проектных параметров. Для увеличения коэффициента перекрытия по емкости были внесены изменения в конструкцию индуктивных элементов вариаторов частоты. С целью обеспечения устойчивого возбуждения ВЧ-системы во всем рабочем диапазоне частот и подавления поперечных мод колебаний дуанта была разработана статическая двухфидерная система связи лампового блока генератора с резонансной системой. По материалам этих разработок оформлено два авторских свидетельства.

Ведущая роль в проведении работ по наладке ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона принадлежит Н. К. Абросимову, А. В. Куликову, Н. Н. Чернову, С. П. Дмитриеву, Г. Ф. Михееву, А. Г. Котову, В. К. Волкову, С. А. Королеву и др. От НИИЭФА активно участвовал Е. В. Середенко.

Не менее сложные проблемы были решены при создании вакуумной ускорительной камеры с объемом около 35 м^3 и рабочим вакуумом $2 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. ($1,5 \cdot 10^{-8}$ Па). Верхней и нижней крышками камеры являются полюса магнита. Боковые стенки из алюминиевого сплава съемные, и на них устанавливаются механизмы камеры. Камера имеет откачиваемый отсек, в котором закреплен дуант и установлены заземленные части вариаторов частоты. Камера откачивается 4 высоковакуумными паромасляными насосами типов ВА-40 и ВА-8-4. Общая скорость откачки составляет 36 000 л/с. Форвакуумная откачка обеспечивается 7 насосами типа ВН-7 Г. Для уменьшения времени откачки до рабочего вакуума в дальнейшем были установлены дополнительно насосы типа ВН-6.

Следующей по важности проблемой явилось создание системы эффективного вывода протонного пучка из ускорительной камеры. Обычно на всех синхроциклотронах, запущенных до 1970 года, для вывода пучка из ускорительной камеры использовались регенеративные системы вывода. Эффективность вывода этих систем не превышала 5-6 %. В связи с этим путем расчета на ЭВМ большого количества траекторий в выводной системе был проведен анализ потерь пучка в процессе вывода. Расчеты проводились с учетом экспериментально измеренного реального распределения частиц внутреннего пучка на последних радиусах по амплитудам и фазам радиальных и вертикальных бетатронных колебаний. На основе этого анализа была разработана и осуществлена широкоапертурная регенеративная система вывода, оптическая ось которой выбрана не из условия прохождения по ней равновесной частицы, как это делалось раньше, а из условия прохождения частицы, находящейся в максимуме плотности частиц в фазовом пространстве. С тем чтобы исключить влияние выводной системы на движение протонов внутри ускорительной камеры, система была тщательно заэкранирована с помощью магнитных экранов. В результате после запуска ускорителя была получена рекордная для того времени эффективность вывода протонов, составляющая 30 %.

Огромный объем работ по шиммированию магнитного поля синхроциклотрона и системы вывода его пучка был выполнен группой молодых сотрудников Ускорительного отдела в составе Г. А. Бублика, В. А. Елисеева, И. А. Петрова, И. И. Ткача, возглавляемой Г. А. Рябовым.

Осуществление высокого коэффициента вывода пучка из ускорительной камеры коренным образом изменило концепцию создания на синхроциклотроне ПИЯФ пучков π - и μ -мезонов. В связи с этим мы смогли отказаться от мезонных мишеней, традиционно устанавливаемых внутри ускорительной камеры, и полностью перейти без потери интенсивности на более эффективные внешние мезонообразующие мишени.

По завершении комплекса работ по наладке узлов ускорителя в 1970 году был осуществлен ввод синхроциклотрона в эксплуатацию [3–5]. Акт приемки в эксплуатацию синхроциклотрона ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР от 27 февраля 1970 года подписала государственная комиссия, в состав которой входили председатель член-корреспондент АН СССР В. П. Джелепов, член-корреспондент АН СССР директор ФТИ АН СССР В. М. Тучкевич, доктор физико-математических наук заместитель директора ФТИ АН СССР Д. М. Каминкер, главный инженер синхроциклотрона ФТИ АН СССР Н. К. Абросимов, доктор технических наук директор НИИЭФА Е. Г. Комар и др. Акт утвержден вице-президентом АН СССР академиком М. Д. Миллионщиковым. С этого времени ускоритель начал работать на физический эксперимент от 4 000 до 6 000 часов в год. С

вводом синхроциклотрона в эксплуатацию было завершено создание первой очереди ускорительной базы ПИЯФ, на основе которой было обеспечено на длительную перспективу проведение фундаментальных и прикладных исследований по планам института в различных областях физики, медицины и радиационной технологии.

1.5. Программа усовершенствования синхроциклотрона ПИЯФ и развитие его экспериментальной базы

После пуска синхроциклотрона в эксплуатацию параллельно с интенсивной работой на физический эксперимент на нем проводилась программа усовершенствования, которая была направлена на увеличение интенсивности и качества пучка, создание новых трактов пучков, а также улучшение эксплуатационных характеристик ускорителя и повышение надежности его работы. В процессе сооружения и наладки синхроциклотрона, параллельно с работами по его пуску, в институте разрабатывалась программа научных и прикладных исследований на пучках ускорителя и создавалось соответствующее экспериментальное оборудование.

В 1972 году была введена в эксплуатацию разработанная в ПИЯФ система временной растяжки пучка с использованием C -электрода, которая позволила увеличить макроскопический коэффициент временного заполнения пучка с 1,4 до 50 %. В системе используется $3/4$ -волновая резонансная линия с ферритовым вариатором частоты. В отличие от аналогичных систем временной растяжки пучка, используемых на других ускорителях, на синхроциклотроне ПИЯФ была введена система синхронизации напряжения на C -электроде по частоте и фазе с ускоряющим напряжением на основном дуанте. Это позволило обеспечить практически 100%-ный переход частиц из режима ускорения основным дуантом в режим ускорения с помощью C -электрода. Результаты этой работы защищены авторским свидетельством.

В 1973 году был создан и введен в действие совмещенный с системой временной растяжки пучка импульсный дефлектор для однооборотного сброса протонного пучка на внутреннюю нейтронообразующую мишень. В качестве вертикального дефлектора был использован C -электрод, у которого верхняя и нижняя пластины были разъединены. С помощью этого дефлектора был получен импульсный пучок испарительных нейтронов с энергетическим спектром от нескольких эВ до 1 МэВ и длительностью импульса 7–30 нс. Впоследствии на основе этого пучка в ПИЯФ был создан нейтронный спектрометр по времени пролета ГНЕЙС с базой 40 м.

В 1974 году на синхроциклотроне были установлены разработанные и изготовленные в ПИЯФ модернизированные вариаторы частоты. При

этом была значительно повышена надежность работы ускорителя и сокращено время, необходимое для проведения ревизии ВЧ-системы. После установки новых вариаторов время работы ускорителя на физический эксперимент было доведено до уровня 6 000 часов в год.

В 1977 году на синхроциклотроне была осуществлена программа повышения интенсивности ускоряемого протонного пучка за счет увеличения вертикальной фокусировки в центральной области ускорителя, где ограничение интенсивности определяется силами пространственного заряда пучка. С этой целью в центральной области ускорителя была установлена разработанная в ПИЯФ новая трехэлектродная электростатическая фокусирующая система, с помощью которой интенсивность внутреннего пучка была доведена до 3,5 мкА. Интенсивность выведенного из ускорительной камеры пучка составила при этом 1 мкА. Это значительно расширило экспериментальные возможности синхроциклотрона. На новую фокусирующую систему было получено авторское свидетельство.

Параллельно с работами по сооружению и дальнейшему усовершенствованию синхроциклотрона ПИЯФ проводились работы по созданию экспериментального комплекса ускорителя [6], оснащенного эффективной радиационной защитой, который включает в себя систему трактов пучков и ряд экспериментальных установок общего пользования. В течение 1974–1980 годов на синхроциклотроне ПИЯФ были созданы:

- 3 тракта протонных пучков: один для комплекса протонной терапии, второй для Лаборатории ИРИС и третий для экспериментальных установок по исследованию упругих и неупругих взаимодействий протонов с ядрами;
- 2 тракта для формирования π -мезонных пучков высоких и низких энергий;
- комбинированный π -мезонный канал на внешней мишени;
- тракт поляризованных протонов и высокоэнергетический нейтронный тракт;
- медицинский комплекс протонной терапии;
- нейтронный спектрометр по времени пролета ГНЕЙС;
- Лаборатория ИРИС для систематических исследований ядер, далеких от полосы бета-стабильности.

Для оснащения протонных трактов пучков были разработаны измерители профиля пучка на основе полупроводникового перехода Ge-GeS, созданы дистанционно управляемые коллиматоры протонного пучка и магниты-корректоры. Создание этих трактов и установок значительно расширило экспериментальные возможности ускорителя и программу научных и прикладных работ, выполняемых на его пучках.

В 1975 году на синхроциклотроне ПИЯФ совместно с ЦНИРРИ Минздрава СССР был создан комплекс протонной лучевой терапии, предназначенный для лечения различных заболеваний головного мозга, в частности аденом гипофиза и артериовенозных аневризм (подробно о комплексе протонной лучевой терапии рассказано в главе 2).

Как одно из ответвлений μ -мезонного канала был создан π -мезонный канал низких энергий, на котором были сформированы пучки π -мезонов низкой энергии и пучки так называемых поверхностных μ^+ -мезонов, образованных в результате распада π^+ -мезонов, остановившихся в мезонообразующей мишени. Исследование свойств поверхностных μ^+ -мезонов послужило началом целой серии физических экспериментов по точному измерению времени жизни π^+ - и K^+ -мезонов. Для расчета и оптимизации пучков частиц второго и третьего поколений в институте были разработаны основанные на методе Монте-Карло ЭВМ-программы МЕЗОН и ОПТИМУМ.

В 1975 году на синхроциклотроне была создана установка ИРИС, предназначенная для систематического исследования короткоживущих нейтронно-дефицитных ядер, далеких от полосы бета-стабильности. Установка включает в себя экспериментальный зал с мишенной комнатой и лабораторный корпус. В экспериментальном зале ИРИС установлен магнитный масс-сепаратор, работающий в линию с протонным пучком ускорителя. Протонный пучок подается в мишенную комнату по протонному тракту, который имеет длину 60 м и оборудован 16 магнитными элементами, обеспечивающими транспортировку протонного пучка полной интенсивности с малыми потерями.

В последующие годы программа усовершенствования синхроциклотрона ПИЯФ была продолжена. Основные усилия здесь были сосредоточены на модернизации трактов пучков и оснащении их системами диагностики и управления пучком. Существенной перестройке подверглись тракт протонного пучка главного зала, тракт протонного пучка Лаборатории ИРИС, где при длине тракта 60 м была обеспечена пропускная способность более 90 %, а также медицинский протонный тракт. Появился ряд новых трактов пучков: протонный пучок малой интенсивности для испытания и калибровки проволочных ионизационных камер и специальный метрологический сертифицированный пучок для радиационных испытаний материалов и изделий, обеспечивающий облучение изделий размером от 1 до 25 см при неоднородности дозовых полей в пределах $< 5\%$ и примеси нейтронов $< 1\%$.

Начиная с запуска в эксплуатацию в 1970 году, синхроциклотрон ПИЯФ постоянно эксплуатировался на физический эксперимент по $\sim 5\,500\text{--}6\,000$ часов в год, а с 1985 года – по ~ 3000 часов в год [7–9].

Публикации

1. **Абросимов Н. К.** Синхроциклотрон ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР на энергию протонов 1 ГэВ // АЭ. 1969. Т. 27, № 6. С. 584–585.
2. **Абросимов Н. К. и др.** Разработка физических и инженерных основ, наладка и пуск синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ ЛИЯФ АН СССР: отчет НИИЭА – ФТИ, 09.12.1971.
3. **Абросимов Н. К., Алхазов Д. Г., Дмитриев С. П., Елисеев В. А., Каминкер Д. М., Куликов А. В., Рябов Г. А., Чернов Н. Н., Гусев И. В., Комар Е. Г., Малышев И. Ф., Моносзон Н. А., Перегуд В. И., Рождественский Б. В., Ройфе И. М., Середенко Е. В., Чесноков А. Т.** Синхроциклотрон ФТИ АН СССР на энергию протонов 1 ГэВ // Тр. VII Междунар. конф. по ускорителям частиц высоких энергий. Ереван, 1970. Т. 1. С. 317–323.
4. **Абросимов Н. К., Алхазов Д. Г., Дмитриев С. П., Елисеев В. А., Каминкер Д. М., Куликов А. В., Миронов Ю. Т., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А., Чернов Н. Н., Шалманов В. И., Комар Е. Г., Малышев И. Ф., Моносзон Н. А., Перегуд В. И., Рождественский Б. В., Ройфе И. М., Середенко Е. В.** Ленинградский синхроциклотрон на энергию протонов 1 ГэВ // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 9. С. 1769–1775.
5. **Абросимов Н. К., Воробьев А. А.** Синхроциклотрон Ленинградского института ядерной физики им. Б. П. Константинова АН СССР // Вестник АН СССР. 1972. № 11. С. 42.
6. **Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Елисеев В. А., Куликов А. В., Миронов Ю. Т., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А., Чернов Н. Н.** Современное состояние синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ в Гатчине // Тр. VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1981. Т. 2. С. 75–79.
7. **Abrossimov N. K., Dmitriev S. P., Eliseev V. A., Mikheev G. F., Riabov G. A., Chernov N. N.** History and Present Status of PNPI Synchrocyclotron // PNPI XXXV. Main Scientific Activities 1971–1996. High Energy Physics. Gatchina, 1998. P. 6–17.
8. **Abrossimov N. K., Dmitriev S. P., Eliseev V. A., Ivanov E. M., Mironov Yu. T., Mikheev G. F., Riabov G. A.** Status Report of 1 GeV PNPI Synchrocyclotron. PNPI Research Report 1994–1995. Gatchina, 1996. P. 262–266.
9. **Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Елисеев В. А., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А.** История создания и современное состояние синхроциклотрона ПИЯФ РАН // ПИЯФ XXV. Основные направления научной деятельности. Отделение физики высоких энергий. Гатчина, 1996. С. 6–18.

Глава 2

Современное состояние ускорительного комплекса ПИЯФ

Синхроциклотрон – уникальная установка России

Гатчинский синхроциклотрон знают во всем физическом мире благодаря многим выдающимся исследованиям, выполненным на пучках этого ускорителя. Это рассеяние на малые углы (ИКАР), дифракционное и квазиупругое рассеяние на ядрах, гатчинский метод исследования экзотических атомов, гатчинский метод исследования времени жизни мезонов, работы по мюонному катализу, получение и исследование ядер, удаленных от полосы стабильности (ИРИС), исследование пион-нуклонных и нуклон-нуклонных взаимодействий, исследование магнитных свойств вещества (μ SR-метод) и ряд других исследований. Эти работы стали возможными благодаря некоторым уникальным особенностям нашего ускорителя: удачный диапазон энергий (1 ГэВ), монохроматичность и хорошая временная структура пучка, высокая надежность ускорителя. Мировую известность получили работы по протонной терапии: многие сотни спасенных жизней – лучшая иллюстрация успеха этого направления. В ходе подготовки и проведения экспериментов родились многие методы и, главное, родился и возмужал коллектив физиков и инженеров, которым теперь по плечу участие практически в любых международных программах. Почти все наши кандидаты и доктора наук защитили диссертации по материалам работ, выполненных на синхроциклотроне. Надежная работа ускорителя (до 6 500 часов в год), его постоянная модернизация – это результат самоотверженного творческого труда сотрудников Ускорительного отдела, их высокой профессиональной квалификации. Синхроциклотрон и сегодня остается основной базой нашего отделения. Его возможности еще далеко не исчерпаны. Ускоритель занесен в число уникальных установок России и особо поддерживается Министерством науки и технологий Российской Федерации. Мы должны сделать все возможное, чтобы ускоритель продолжал активно

работать, обеспечивая физические исследования, лечение больных и тестирование оборудования для международных экспериментов.

Из обращения директора ОФВЭ ПИЯФ РАН члена-корреспондента РАН, профессора А. А. Воробьева к сотрудникам Ускорительного отдела в связи с 30-летием запуска синхроциклотрона, 6 ноября 1997 года

2.1. Комплекс зданий синхроциклотрона ПИЯФ, размещение оборудования и радиационная защита

На рис. 2.1 показан общий вид комплекса зданий синхроциклотрона ПИЯФ 1 ГэВ, на заднем плане – комплекс зданий реактора ПИК.



Рис. 2.1. Общий вид комплекса зданий синхроциклотрона ПИЯФ

На рис. 2.2 приведена схема расположения экспериментальных установок синхроциклотрона.

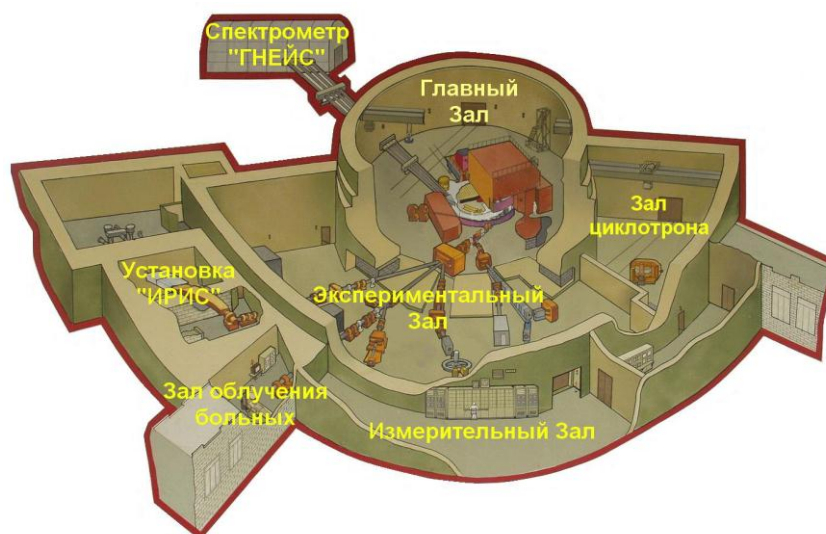


Рис. 2.2. Схема расположения экспериментальных установок синхроциклотрона

На рис. 2.3 показан общий вид синхроциклотрона ПИЯФ, а на рис. 2.4 – вид на синхроциклотрон со стороны вывода его протонного пучка с энергией 1 ГэВ.



Рис. 2.3. Общий вид синхроциклотрона ПИЯФ 1 ГэВ: слева – генератор ВЧ, справа – нейтроноводы



Рис. 2.4. Вид на синхроциклотрон ПИЯФ со стороны вывода протонного пучка (видна система фокусирующих линз тракта вывода пучка)

Комплекс включает в себя два здания, расположенных друг от друга на расстоянии около 200 м. Общий план комплекса зданий синхроциклотрона представлен на рис. 2.5. Здания соединены подземным кабельным туннелем. В основном здании комплекса (корпус № 2) располагается синхроциклотрон, экспериментальный зал, где размещены экспериментальные установки, измерительные залы и ряд лабораторных помещений.

К экспериментальному залу примыкает лабораторная пристройка, в подвале которой размещены: форвакуумные насосы, теплообменники, насосы системы охлаждения и часть электротехнического оборудования систем электропитания магнитов и линз. К основному зданию позднее были пристроены: корпус протонной терапии, корпус Лаборатории короткоживущих нейтронно-дефицитных изотопов ИРИС, здание Лаборатории спектрометра ГНЕЙС и вычислительный центр. В правой части экспериментального зала в настоящее время планируется соорудить изохронный циклотрон на энергию протонов 80 МэВ. Главный и экспериментальные залы имеют подвалы, в которых размещается вспомогательное оборудование и проходят кабельные трассы и трубопроводы системы охлаждения электромагнитов и квадрупольных линз. Во втором здании (корпус № 2а) расположен машинный зал для размещения оборудования систем электропитания ускорителя и трактов пучков, пульт управления синхроциклотроном и корпус Лаборатории физики и техники ускорителей с макетным залом. В состав комплекса входят также отдельно стоящие градирня и насосная второго контура системы оборотного водоохлаждения оборудования синхроциклотрона.

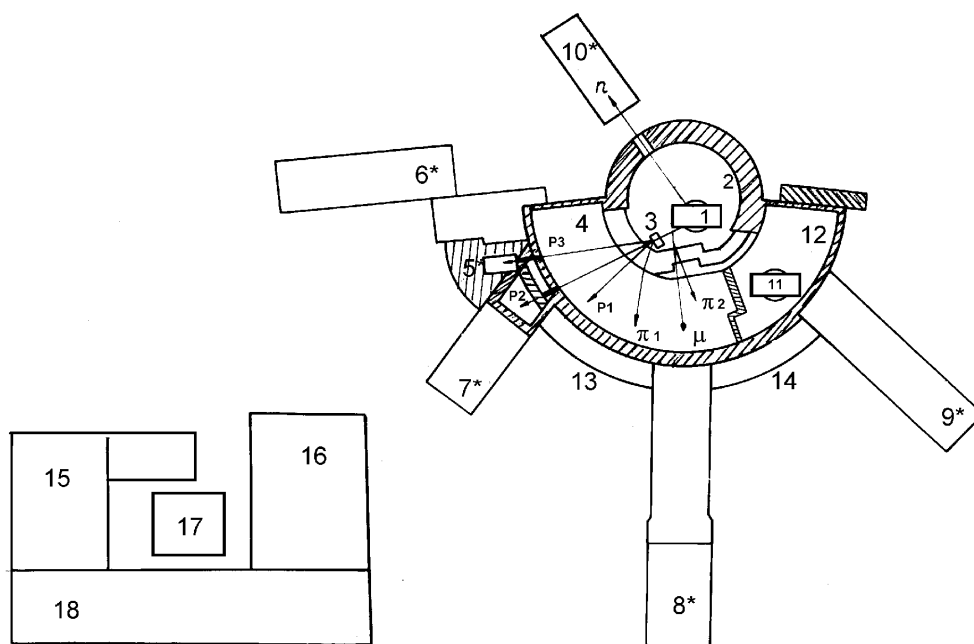


Рис. 2.5. План комплекса зданий синхроциклотрона ПИЯФ.

1 – синхроциклотрон; 2 – главный зал; 3 – разводящий электромагнит СП-40; 4 – экспериментальный зал; 5 – мишенная комната ИРИС; 6 – Лаборатория ИРИС; 7 – корпус протонной терапии; 8 – лабораторная пристройка; 9 – вычислительный центр; 10 – здание ГНЕЙС; 11 – изохронный циклотрон (в стадии строительства); 12 – зал циклотрона; 13, 14 – измерительные залы; 15 – макетный зал; 16 – машинный зал систем электропитания и пульт управления; 17 – трансформаторная подстанция; 18 – лабораторный корпус

При сооружении синхроциклотрона особое внимание было уделено созданию эффективной радиационной защиты экспериментальных залов, где размещаются исследовательские установки, и помещений, в которых во время работы ускорителя находится персонал [1].

Синхроциклотрон размещен в круглом зале (главный зал) диаметром 32 м и высотой 17 м, окруженном защитными бетонными стенами толщиной от 5 до 8 м. Зал оборудован 100-тонным турельным подъемным краном. Бетонный потолок главного зала для уменьшения отраженного излучения имеет толщину 2 м. К главному залу примыкает экспериментальный зал, имеющий форму полукольца шириной 25 м. Экспериментальный зал отделен от главного защитной 8-метровой стеной, выполненной из тяжелого ($\gamma = 4,2 \text{ т/м}^3$) бетона, в которой на всем протяжении стены, захватывающей по азимуту около 120° , имеется горизонтальная технологическая щель высотой 0,8 м. В щели установлены коллиматоры для транспортировки протонных и мезонных пучков. Остальное пространство технологической щели заполнено защитными чугунными блоками. Толщина чугунной защиты – 4 м. Управление экспериментальными установками и магнитными элементами трактов пучков осуществляется из двух примыкающих к экспериментальному залу измерительных залов. Измерительные залы и лабораторная пристройка отделены от экспериментального зала защитной стеной толщиной 4 м. Наружные стены экспериментального зала имеют толщину 2 м, а бетонный потолок – 1,5 м. Все проемы в защитных стенах оборудованы защитными чугунными дверями толщиной 1 м.

В районе примыкания к экспериментальному залу корпуса протонной терапии радиационная защита усилена дополнительной стеной из чугунных блоков. Защитные стены мишенной комнаты Лаборатории ИРИС, в которую выводится протонный пучок полной интенсивности, имеют толщину: по пучку – до 12 м бетона и поперек пучка – до 6 м бетона.

В связи с тем что при работе синхроциклотрона существенная часть ускоренного протонного пучка рассеивается в ускорительной камере, в главном зале, где размещен ускоритель, создается радиационный фон сложного состава. Фон заряженных адронов с энергией свыше 20 МэВ составляет величину от 10^4 до 10^7 част./см²·с. Фон тепловых нейтронов находится на уровне 10^6 п/см²·с. Имеется высокий уровень фона гамма-излучения. Основной вклад в дозу радиации за защитными стенами синхроциклотрона дают нейтроны широкого энергетического диапазона – от долей электронвольта до энергии, приблизительно равной энергии ускоряемых протонов¹.

¹ Комочков М. М., Сычев Б. С. // Сб. докладов совещания по дозиметрии и физике защиты на ускорителях. Дубна, 1969. С. 15.

Глобальная радиационная защита синхроциклотрона ПИЯФ, представленная на рис. 2.6, 2.7, при выбранной толщине и конфигурации стен обеспечивает эффективное ослабление по всем азимутам всех видов ионизирующих излучений как непосредственно от ускорителя, так и от вторичных источников, в том числе от наиболее проникающей компоненты радиационного поля – нейтронов высокой энергии.

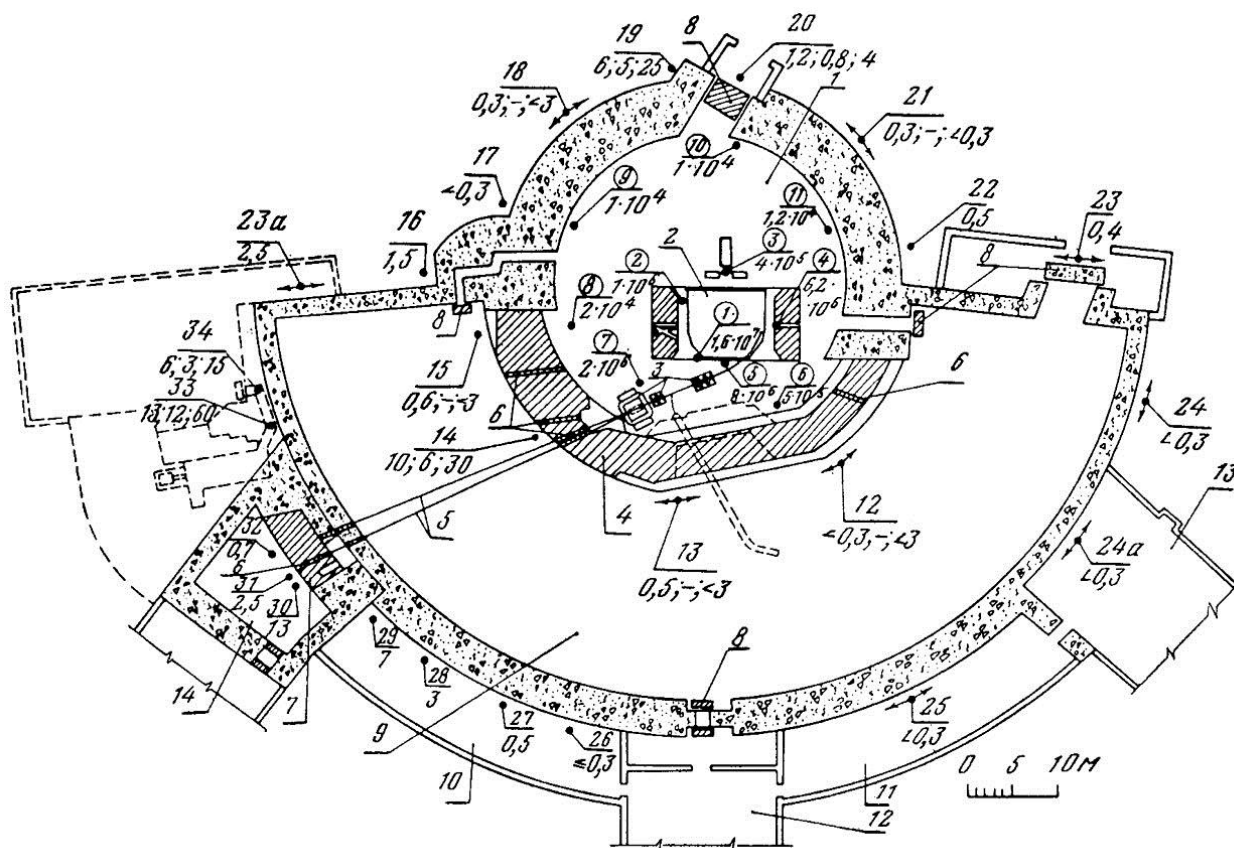


Рис. 2.6. Радиационная защита синхроциклотрона ПИЯФ (план).

1 – главный зал ускорителя; 2 – синхроциклотрон; 3 – фокусирующие линзы и поворотный магнит; 4 – сборно-разборная защита из чугунных блоков; 5 – протонные пучки; 6 – коллиматоры; 7 – гаситель из чугунных блоков; 8 – защитные двери; 9 – экспериментальный зал; 10, 11 – левый и правый измерительные залы; 12–14 – пристройки (лабораторная, вычислительного центра, протонной терапии)

Введение в состав радиационной защиты синхроциклотрона сборно-разборной части на участке между главным и экспериментальными залами ускорителя обеспечило, с одной стороны, достаточно низкий радиационный фон в экспериментальном зале, а с другой стороны, технологическую гибкость при проводке пучков и размещении экспериментального физического оборудования. Все протонные пучки для ослабления фона обратного рассеяния в область экспериментального зала обеспечены гасителями пучка, вынесенными за стену экспериментального зала.

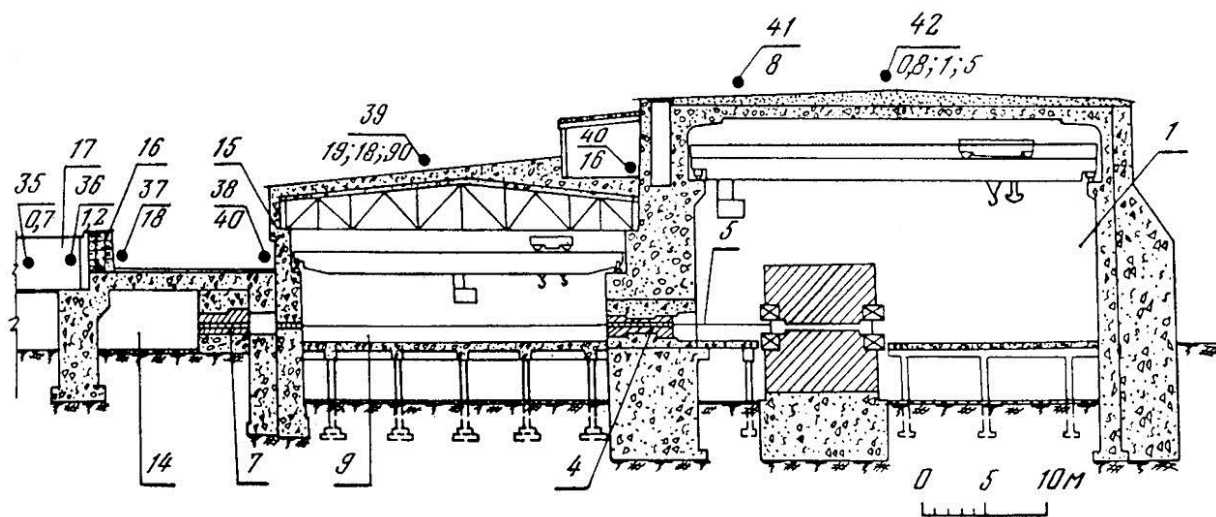


Рис. 2.7. Радиационная защита синхроциклотрона ПИЯФ (разрез).

15 – участок защиты толщиной 0,95–1,2 м; 16 – «теньевая» защита из бетонных блоков; 17 – лабораторные помещения медико-биологической пристройки. Прочие обозначения соответствуют рис. 2.6. Измерения в точках 1–2 и 40–42 выполнены при токе выведенного протонного пучка 0,1 мкА. Пучок полностью рассеивается в зале ускорителя. Результаты измерений в точках 22–34 и 35–39 приведены к условиям, когда на пути пучка в экспериментальном зале находится мишень из алюминия толщиной 30 г/см^2 при токе пучка 0,1 мкА. Числа вблизи точек измерений обозначают: числитель – номер точки; первое число в знаменателе – мощность эквивалентной дозы в мбэр/ч или плотность потока адронов с энергией $E > 20 \text{ МэВ}$ (выделено кружком); второе и третье число – мощность эквивалентной дозы и плотность потока нейтронов с энергией $E > 20 \text{ МэВ}$

Такая конструкция обеспечила низкофоновые условия при проведении прецизионных экспериментов. Согласно регламенту работ, для уменьшения фона в экспериментальном зале при работе ускорителя все коллиматоры в стене между главным и экспериментальными залами, кроме рабочего коллиматора, должны быть закрыты. Первоначально процедура по открытию-закрытию коллиматоров диаметром 15 см и длиной 4 м делалась вручную, и эта операция была ответственна за 60 % дозовых нагрузок на персонал ускорителя. В связи с этим были разработаны дистанционно управляемые промежуточные гасители, которые полностью заменили заглушки коллиматоров, что облегчило эксплуатацию трактов и уменьшило радиационную нагрузку на персонал [2]. Измерение фона в экспериментальном зале показало, что защитная стена между главным и экспериментальными залами обеспечивает достаточную кратность ослабления радиационного фона практически на всех направлениях.

Радиационный фон в помещениях, где работает персонал ускорителя и исследовательских групп, и радиационный фон снаружи здания ускорителя ниже допустимого уровня. Все радиационно опасные работы ведутся по специальному регламенту. Жесткий регламент радиационно опасных работ в сочетании с индивидуальной дозиметрией с помощью термолюминесцентных, прямопоказывающих и ядерно-эмульсионных (нейтронных) дозиметров позволяет эксплуатировать синхроциклотрон, не выходя за рамки требований НРБ-99 и ОСПОРБ-99. В настоящее время среднегодовая доза («стоимость» эксплуатации синхроциклотрона) не превышает 250 мЗв (25 бэр) при индивидуальной средней дозе 3 мЗв (0,3 бэр) и «дозовая стоимость» 1 часа пучкового времени не превышает, по данным за последние 3 года, величины 0,15 мЗв (0,015 бэр).

2.2. Пучки синхроциклотрона ПИЯФ

Эффективность использования для научных и прикладных исследований современных ускорителей в значительной мере зависит от ассортимента, параметров и организации созданных на его базе пучков частиц. На протонных ускорителях средних и промежуточных энергий, кроме протонных пучков, непосредственно выводимых из ускорителя, важное место по масштабам применения принадлежит пучкам частиц второго поколения, образующихся в результате взаимодействия первичного протонного пучка с соответствующей мишенью. К таким пучкам относятся пучки нейтронов разной энергии и пучки положительных и отрицательных π -мезонов. Широкое применение находят также пучки третьего поколения, к которым принадлежат пучки положительных и отрицательных μ -мезонов.

Схема трактов пучков синхроциклотрона ПИЯФ представлена на рис. 2.5. Здесь P1, P2, P3 – пучки протонов, $\pi 1$ и $\pi 2$ – пучки π -мезонов, μ – пучок сепарированных μ -мезонов, n – импульсный пучок нейтронов.

Для сохранения качества первичного и вторичных пучков транспортировка всех пучков осуществляется в вакуумных трубах, что значительно уменьшает рассеяние частиц пучка на воздухе. Все пучки проводятся на высоте 1,3 м над уровнем пола.

С целью создания низкофоновых условий в области экспериментальных установок предпринят ряд мер. Сам ускоритель, как основной источник излучений, помещен в отдельный зал с мощными защитными стенами. Протонный и вторичные пучки выходят из зала ускорителя через узкие коллиматоры диаметром 15 см. Все радиационно опасные процедуры, создающие повышенный фон, такие как коллимация протонного пучка и его взаимодействие с толстой мишенью полного поглощения, осуществляются только в зале ускорителя. Мишени для вторичных пуч-

ков – мезонов и нейтронов – также располагаются в зале ускорителя за толстой защитной стеной.

При принятой организации работы предусмотрено два основных регламента: либо протонный пучок с помощью разводящего магнита и системы квадрупольных линз выводится в экспериментальный зал, либо протонный пучок фокусируется на расположенную в главном зале мезонообразующую мишень, которая является источником π -мезонов для двух мезонных каналов – π^1 -канала и μ -мезонного канала.

Высокий коэффициент вывода пучка протонов из ускорительной камеры позволил по-новому подойти к формированию пучков вторичных частиц синхроциклотрона, что дало возможность полностью отказаться от использования внутренних мезонообразующих мишеней. Проведенные оценки показали, что при эффективности вывода $\geq 30\%$ интенсивность пучков на внутренней мишени, с учетом более высокой интенсивности внутреннего пучка и многократности прохождения, и на внешней мишени примерно одинакова, т. е. внутренняя мишень не дает преимуществ в интенсивности и в то же время имеет массу недостатков в ее использовании. Единственной внутренней мишенью на синхроциклотроне ПИЯФ является мишень нейтронного спектрометра ГНЕЙС для сброса протонного пучка на нейтронообразующую мишень, расположенная внутри камеры ускорителя, выше (или ниже) средней плоскости зазора. В качестве дефлектора для сброса протонного пучка на мишень используются пластины С-электрода системы временной растяжки и вывода протонного пучка.

Протонные пучки

Синхроциклотрон ПИЯФ ускоряет протоны до фиксированной энергии 1 ГэВ с максимальной интенсивностью выведенного пучка $6 \cdot 10^{12}$ р/с (1 мкА). Кроме интенсивности и энергии важными параметрами протонного пучка являются его временная структура и монохроматичность. Макроструктура пучка синхроциклотрона может изменяться от 1,4 до $\sim 80\%$ с помощью системы временной растяжки, что значительно повышает эффективность использования ускорителя в экспериментах с использованием электронных методов регистрации.

Для ряда экспериментов, проводимых на протонном пучке синхроциклотрона, большое значение имеет микроструктура выведенного пучка. В течение макроимпульса пучок выводится из ускорителя отдельными микроимпульсами длительностью 7–10 нс, повторяющимися через 77,5 нс, что соответствует частоте ускоряющего напряжения, которая в области вывода равна 13,3 МГц. Для некоторых экспериментов, использующих времяпролетную методику, важно иметь малую протяжен-

ность микроимпульса, определяющую длительность стартового импульса для времяпролетных экспериментов. Чрезвычайно удобной оказывается большая длительность между микроимпульсами – 77,5 нс, позволяющая наблюдать в промежутке между ними распад короткоживущих частиц. Были получены режимы настройки системы медленного вывода, позволяющие получить длительность микробанча ~ 7 нс с отсутствием фона частиц между микроимпульсами на уровне $\sim 10^{-6}$. Это дало, в частности, возможность провести прецизионные измерения времени жизни π^+ - и K^+ -мезонов.

Энергетический разброс выведенного протонного пучка является важной характеристикой, определяющей возможность проведения прецизионных спектрометрических измерений на пучке ускорителя. При энергии протонного пучка 1 ГэВ энергетическая неоднородность выводимого пучка составляет величину $\sim 1\%$, т. е. 10 МэВ. Однако компьютерное моделирование поведения пучка в процессе вывода и последующие эксперименты на ускорителе показали, что энергия пучка в пределах одного макроимпульса плавно изменяется в процессе вывода в соответствии с распределением внутреннего пучка по амплитудам бетатронных колебаний. Поэтому если фиксировать момент вывода пучка и учесть динамику изменения его фазового объема в процессе ускорения, то мгновенный разброс энергии пучка составит всего 0,03 %. Таким образом, была осуществлена эффективная монохроматизация выведенного протонного пучка по времени вывода¹, что позволило использовать спектрометр с разрешением 0,1 % и провести целый цикл работ по исследованию распределения ядерного вещества в легких ядрах. Этот способ эффективной монохроматизации пучка в синхроциклотроне был защищен авторским свидетельством².

Начальная часть протонного тракта, расположенная в главном зале ускорителя, представлена на рис. 2.8. Весь тракт в зале ускорителя можно разбить на три части. Первая часть – от выходного окна ускорителя до мезонообразующей мишени. Здесь находится триплет линз типа 10K50-2000, два магнита-корректора пучка, два профилометра пучка, вакуумный коллиматор и мишенное устройство для получения пучков π -мезонов. В первой части протонного тракта осуществляется измерение параметров пучка, выходящего из ускорителя, его коллимация, корректировка по горизонтали и вертикали и фокусировка на мезонообразующую мишень. Вторая часть – от мезонообразующей мишени до разводящего электромагнита СП-40. В этой части находятся дублет линз типа 20K50 для фокусировки протонного и мезонного пучков и профилометр пучка.

¹ Белостоцкий С. Л. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 17. С. 101–102.

² А. с. № 582709 / Г. Д. Алхазов, С. Л. Белостоцкий. Бюл. № 18, 1979. С. 294.

Третья часть тракта – от входа в разводящий магнит до выхода в экспериментальный зал.

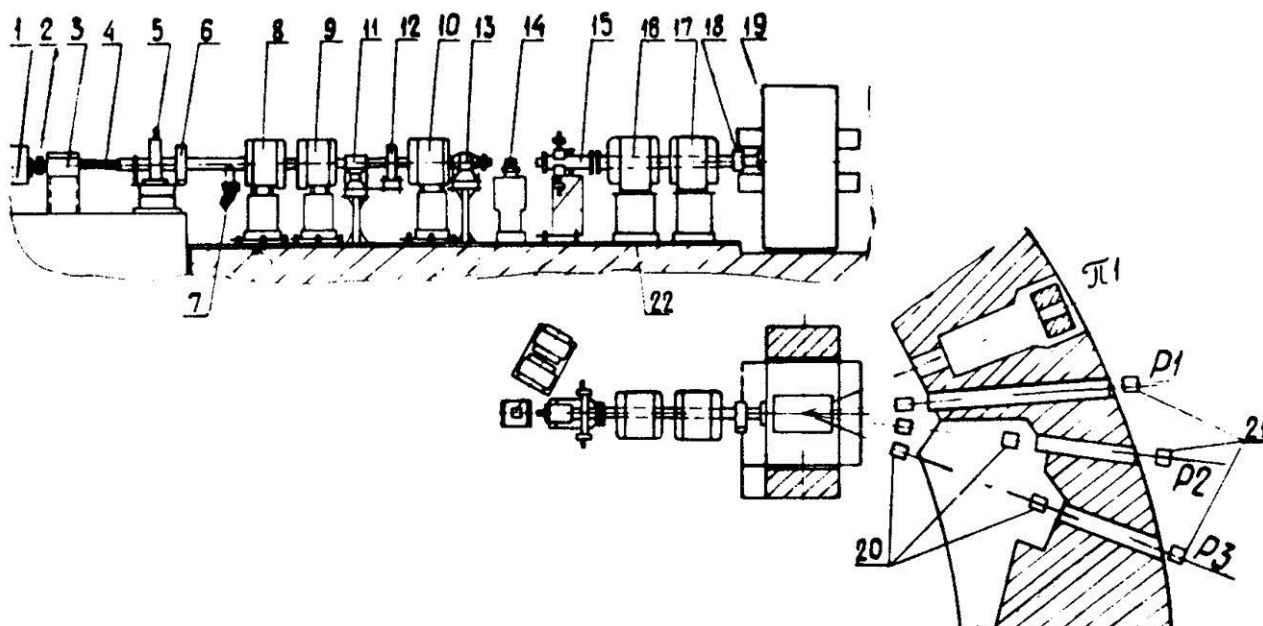


Рис. 2.8. Протонный тракт главного зала.

1 – выводное окно камеры; 2 – ионизационная камера-монитор; 3 – горизонтально фокусирующая линза; 4 – сильфон; 5 – мишень пневмопочты; 6, 12, 18 – профилометры; 7 – откачка вакуумного тракта; 8, 9, 10 – триплет линз 10K50-2000; 11 – Z-корректор; 13 – X-корректор; 14 – мезонная мишень; 15 – вакуумный коллиматор; 16, 17 – дублет линз 20K50; 19 – разводящий электромагнит СП-40; 20, 21 – гасители пучка; 22 – фундаментные плиты

Коллимация протонного пучка осуществляется с помощью вакуумного коллиматора, состоящего из четырех горизонтально и вертикально передвигаемых пластин с длиной по пучку 200 мм и поперечными размерами 90×50 мм². Каждая из четырех пластин передвигается отдельно в диапазоне от -5 до $+45$ мм от геометрической оси пучка и, кроме того, может поворачиваться от оси пучка на $\pm 5^\circ$. Управление коллиматором осуществляется от ЭВМ.

Протонный пучок полной интенсивности может быть направлен с помощью разводящего магнита типа СП-40 через один из трех коллиматоров P1, P2, P3 в экспериментальный зал. Пучок полной интенсивности должен быть доведен до глушителя пучка, чтобы обеспечить малый фон и нормальную радиационную обстановку в помещениях.

Пучок P1 предназначен для физических исследований в экспериментальном зале. По условиям радиационной безопасности в экспериментальном зале возможно использовать только достаточно тонкие мишени с потерей не более 10^{10} р/с. Как правило, для экспериментов на прямом

протонном пучке обычно бывает достаточно интенсивности порядка 10^6 – 10^8 p/c, что не создает значительных радиационных проблем.

По направлению P2 можно выводить пучок с интенсивностью меньше 10^9 p/c в корпус протонной терапии. Для целей протонной терапии создан специализированный тракт медицинского протонного пучка с малым размером пучка в фокусе. Пучок выводится в специально построенный для этих целей корпус протонной терапии, в котором имеется глушитель пучка, обеспечивающий его полное гашение.

Через коллиматор P3 пучок полной интенсивности выводится в корпус ИРИС для генерации и последующего исследования короткоживущих изотопов, далеких от полосы бета-стабильности.

Основные параметры протонных пучков синхроциклотрона ПИЯФ приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Параметры протонных пучков синхроциклотрона ПИЯФ

Частицы	Энергия, МэВ	$\Delta E/E$, %	Интенсивность, c^{-1}	Канал	Примечания
p	1 000	$3 \cdot 10^{-4}$	10^{10}	P1	Спектрометрический пучок
p	1 000	1	10^8	P2	Медицинский пучок диаметром 3–5 мм
p	1 000	1	$6 \cdot 10^{12}$	P3	Пучок ИРИС

Тракты пучков синхроциклотрона ПИЯФ созданы на базе магнитов и квадрупольных линз, разработанных в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова. Всего тракты пучков синхроциклотрона ПИЯФ включают в себя около 50 магнитных элементов: дипольных магнитов и квадрупольных линз. Для стабилизации токов в магнитных элементах в институте была разработана автоматизированная система управления трактами транспортировки пучков синхроциклотрона, обеспечивающая стабильность тока питания магнитных элементов на уровне 10^{-4} . Управление токами в магнитных элементах производится либо вручную, либо через ЭВМ.

Для Лаборатории ИРИС был создан тракт транспортировки протонного пучка длиной 60 м, обеспечивающий 90%-ную пропускную способность. Для фиксации геометрического положения элементов тракта с точностью лучше 1 мм около каждого тракта создана геодезическая сеть и квадрупольные линзы оборудованы геодезическими марками. Каждый тракт оснащен специально разработанными небольшими магнитами-корректорами для настройки положения пучка на оптическую ось тракта. Тракты пучков оснащены системами диагностики – мониторами

интенсивности на основе калиброванных ионизационных камер и профилометров. Для измерения геометрических размеров пучка был разработан измеритель профиля пучка на основе полупроводникового перехода Ge-GeS [3–4], с помощью которого контролируется прохождение протонного пучка вдоль тракта. Оригинальность разработанного прибора подтверждена авторским свидетельством на изобретение [5].

Мезонные пучки

Большой интерес для программы физических исследований представляют пучки π - и μ -мезонов. В настоящий момент на синхроциклотроне ПИЯФ от 30 до 50 % времени работы ускорителя отводится на эксперименты на мезонных пучках. Основные параметры мезонных пучков синхроциклотрона ПИЯФ приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Параметры мезонных пучков синхроциклотрона ПИЯФ

Частицы	Импульс, МэВ/с	$\Delta P/P$, %	Интенсивность, с^{-1}	Канал	Примечания
π^+	450	6	10^6	$\pi 1$	ахроматич. канал
π^-	450	6	$3 \cdot 10^5$		
π^-	250	2,5–12	$10^5 - 5 \cdot 10^6$	$\pi 2$	ахроматич. канал
π^+	250	2,5–12	$3 \cdot 10^5 - 10^7$		
μ^+	29	12	$3 \cdot 10^4$		
μ^-	160	10	$9 \cdot 10^4$	μ	—
μ^+	170	10	$3 \cdot 10^5$		

Как уже упоминалось, все π - и μ -мезонные пучки синхроциклотрона ПИЯФ образуются на внешней мезонообразующей мишени, расположенной в зале ускорителя, что дает возможность проведения нескольких экспериментов одновременно.

$\pi 1$ -канал

Канал отбирает от мишени пионы, рожденные под углом 0° , поэтому на нем получают пучки π -мезонов вплоть до энергии 750 МэВ, что значительно выше, чем энергия пионных пучков на мезонных фабриках. Эта область более высоких энергий представляет значительный интерес для анализа многочисленных данных, полученных на мезонных фабриках.

Максимальная интенсивность π -мезонов соответствует импульсу $p = 450$ МэВ/с и достигает 10^6 част./с для π^+ -мезонов и $3 \cdot 10^5$ част./с для π^- -мезонов. Такие интенсивности являются предельными для электронных методов регистрации. И только в прецизионных экспериментах с тонкими мишенями мезонные фабрики имеют преимущество. Канал $\pi 1$ построен по ахроматической схеме с полевой линзой в виде триплета линз. Имеется возможность регулировать импульсное разрешение в пучке путем введения импульсного коллиматора.

μ -мезонный канал

Значительным этапом в развитии исследований на мезонных пучках синхроциклотрона явилось создание μ -мезонного канала. Интерес к пучкам μ -мезонов связан с большими возможностями, которые представляют эти пучки для исследований в области ядерной и атомной физики, физики твердого тела, химии и пограничных с ними областей. В частности, важной областью применения поляризованных пучков μ^+ -мезонов является их использование для исследования внутренних магнитных полей в веществе методом вращения спина μ^+ -мезона (μSR -метод). μ -мезонные пучки часто применяются в исследованиях явления μ -катализа в реакциях термоядерного синтеза, исследованиях взаимодействия лептонов с адронами и ядрами, изучении μ -мезоатомов и μ -мезомолекул.

Для получения пучков сепарированных μ -мезонов на синхроциклотроне ФТИ была использована известная схема, применявшаяся на синхроциклотронах^{1,2} и мезонных фабриках³.

Тракты транспортировки и расположение μ -мезонного канала в экспериментальном зале ускорителя представлены на рис. 2.9. Расчет и оптимизация параметров μ -мезонного канала проводились как аналитическими методами, так и с помощью разработанных в институте программ МЕЗОН и ОПТИМУМ [6, 7], осуществляющих моделирование и оптимизацию параметров пучков частиц второго и третьего поколений по методу Монте-Карло.

¹ Демьянов А. В. и др. Препринт ОИЯИ 9-8270. Дубна, 1974. С. 15.

² Beger H. et al. // Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications. Zurich, 1975. P. 49.

³ Petitjean C. SIN, Jahresbericht. 1975. P. 1319.

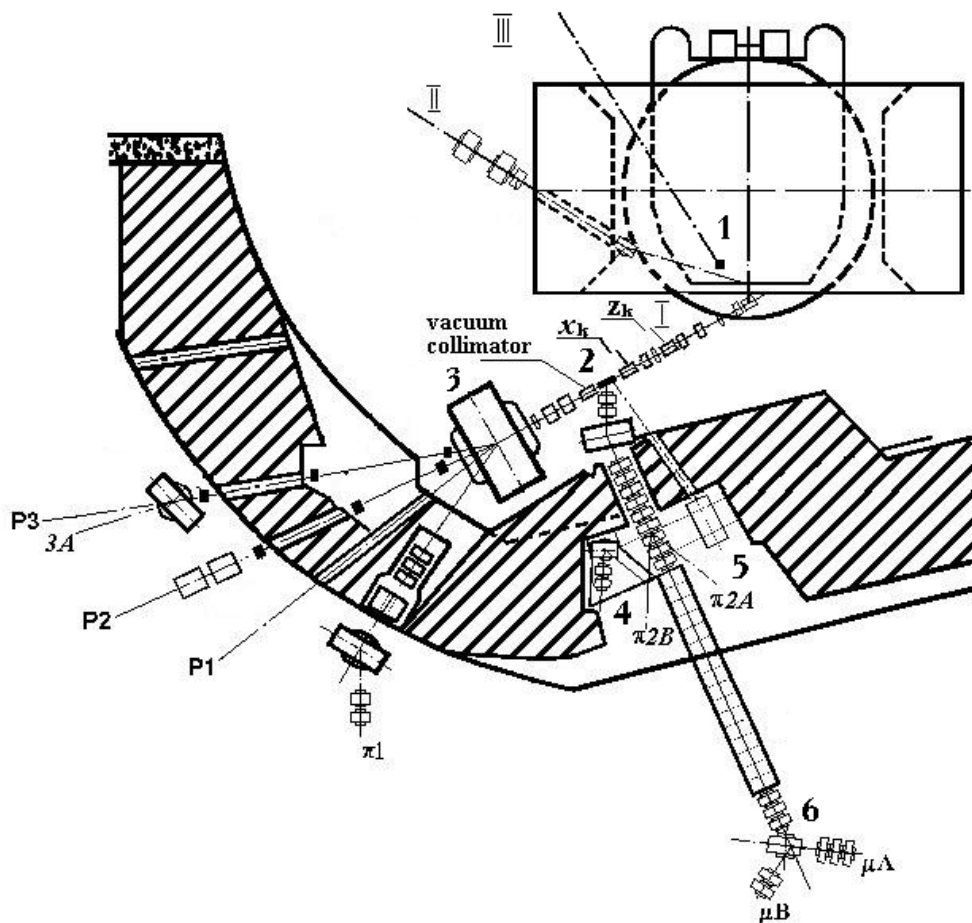


Рис. 2.9. Тракты транспортировки пучков синхроциклотрона ПИЯФ. I – основной протонный пучок $6 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$; II – второй параллельный пучок протонов 10^{10} с^{-1} ; III – нейтронный пучок; 1 – нейтронообразующая мишень; 2 – мезонообразующая мишень; 3 – разводящий магнит СП-40; 4 – платформа со вторым магнитом $\pi 2$ -канала; 5 – подвижная часть канала; 6 – μ -мезонный канал; P1, P2, P3 – направления протонных пучков; $\pi 1$ – π -мезонный канал высоких энергий; $\pi 2A$, $\pi 2B$ – направления вывода мезонных пучков низких энергий; μA , μB – направления вывода пучков μ -мезонов; Z_k – вертикальный магнит-корректор; X_k – горизонтальный магнит-корректор

Мезонообразующая мишень канала расположена в главном зале ускорителя таким образом, чтобы обеспечить одновременную работу двух мезонных каналов от одной мишени. Угол отбора π -мезонов в канал составляет 60° . Входная часть канала, формирующая исходный пучок π -мезонов, состоит из двух линз типа 20K25A и магнита-анализатора типа СП-56 с модифицированным прямоугольным полюсом 85×40 см. Угол поворота в магните – 26° . В качестве пролетной части канала использован квадрупольный канал, образованный 26 линзами с апертурой 20 см и эффективной длиной 38,4 см. Общая длина пролетной части – 14,3 м. Магнит-анализатор выходной части канала, созданный на базе

электромагнита СП-053 с прямоугольным полюсом 60×35 см, направляет пучок μ -мезонов по двум направлениям на две стационарные установки. Угол поворота пучка в выводном анализаторе составляет 60° , что позволяет получить достаточное импульсное разрешение для формирования пучков сепарированных μ -мезонов без примеси π -мезонов.

Канал обеспечивает пучки сепарированных μ -мезонов обоих знаков в диапазоне импульсов 29–150 МэВ/с с интенсивностью на уровне 10^4 – 10^5 част./см²·с. С вводом в действие μ -мезонного канала на синхротроне ПИЯФ начались исследования явления μ -катализа реакций термоядерного синтеза и исследования в области физики твердого тела с помощью метода вращения спина μ -мезона.

π 2-канал низкой энергии

При создании на синхротроне μ -мезонного канала была предусмотрена возможность использования его входной части для создания π -мезонного канала малых энергий (канал π 2). Схема и расположение в экспериментальном зале комбинированного π 2-канала показаны на рис. 2.9, 2.10.

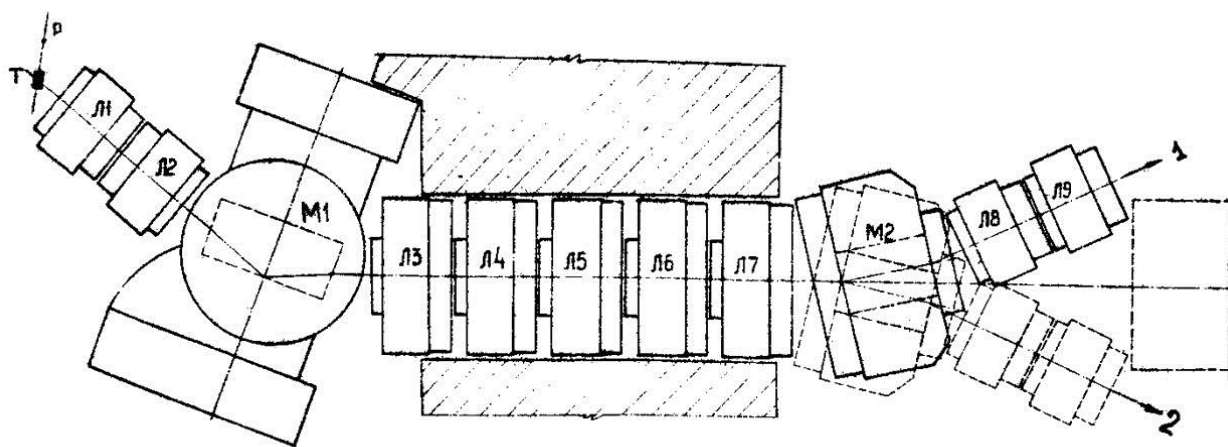


Рис. 2.10. π 2-канал для получения π -мезонов низкой энергии.

Магнит М1 и линзы Л1–Л7 – входная часть μ -мезонного канала; магнит М2 и линзы Л8 и Л9 – сменная часть π -мезонного канала; 1 и 2 – направления вывода π -мезонного пучка

Входная часть μ -мезонного канала с первым анализатором и 5 первых линз распадной части μ -мезонного канала могут быть использованы как короткий тракт π -мезонов низкой энергии – π 2-канал. При работе π 2-канала в режиме π 2-канала 5 линз пролетной части μ -мезонного канала, установленных на подвижной тележке, откатываются в сторону,

а на их место на рельсах подкатывается другая тележка с магнитом и дублетом линз. В качестве второго анализатора используется магнит типа СП-053 и дублет линз 20К25А-1000. Угол поворота во втором магните выбран 26° , исходя из условия симметрии схемы канала. Для обеспечения работы двух стационарных установок второй магнит и дублет линз могут поворачиваться на воздушной подушке. Канал может работать в режиме максимальной интенсивности, когда включены все 5 линз между магнитами, и в ахроматическом режиме, когда средние 3 линзы образуют полевую линзу. Диапазон $\Delta p/p$ регулируется с помощью коллиматора. Основные параметры π^2 -канала: угол отбора π -мезонов – 60° , длина канала – 8 м, возможна работа на две стационарные установки, основной диапазон импульсов – 50–350 МэВ/с, импульсный захват с помощью коллиматора может изменяться от 2,5 до 12 %. Интенсивность пучка π^\pm -мезонов указана в табл. 2.2.

Для ряда задач, например для исследования остановок в газообразных веществах и пленках, необходимо иметь высокую плотность остановок. Радикальным средством повышения плотности остановок является понижение импульса μ -мезонов. Однако понижение импульса в μ -канале, созданном по классической схеме, приводит к резкому снижению интенсивности пучка.

Методом, позволяющим повысить плотность остановок \sim в 100 раз, является создание пучка поверхностных μ^+ -мезонов от распада π^+ -мезонов, остановившихся в мезонообразующей мишени [8]. Энергия $\pi \rightarrow \mu$ -распада очень мала – ~ 4 МэВ, поэтому пробег μ -мезона распада в меди составляет всего $\sim 0,3$ мм. Таким образом, источником μ^+ -мезонов от распада остановившихся π^+ -мезонов будет служить тонкая поверхностная пленка мишени, обращенная к каналу. Основные особенности пучка поверхностных μ^+ -мезонов: высокая плотность остановок, высокая степень поляризации, близкая к 100 %. Пучок поверхностных μ^+ -мезонов был создан в ПИЯФ на канале π^2 . Параметры пучка поверхностных μ^+ -мезонов с импульсом $p = 28$ МэВ/с приведены в табл. 2.2.

Исследование свойств поверхностных μ^+ -мезонов послужило началом целой серии физических экспериментов по точному измерению времени жизни π^+ - и K^+ -мезонов. Здесь сыграла свою положительную роль временная микроструктура пучка синхротрона. В результате на спектре положительно заряженных частиц в течение 77 нс между микробанчами пучка можно наблюдать экспоненциальный спад интенсивности μ^+ -мезонов, что соответствует убыванию остановившихся в мишени π^+ - или K^+ -мезонов в результате распада. По этой схеме была проведена серия прецизионных измерений экспоненты распада, что позволило из-

мерить время жизни π^+ - и K^+ -мезонов с наилучшей в мире точностью¹. Результаты этих измерений вошли в справочник по свойствам элементарных частиц².

2.3. Экспериментальные комплексы и установки на синхроциклотроне ПИЯФ

На базе синхроциклотрона ПИЯФ создан большой современный комплекс экспериментальных установок, позволяющий решать широкий круг задач в области ядерной физики и физики элементарных частиц как для фундаментальных, так и прикладных исследований, в том числе для исследований в области медицины и лечения больных.

Медицинский протонный комплекс ПИЯФ – ЦНИРРИ³

Лучевая терапия является одним из важнейших методов лечения онкологических и других заболеваний. Сегодня во всем мире в медицинскую практику активно внедряется новый вид лучевого лечения онкологических и многих других тяжелых заболеваний – протонная лучевая терапия. Это в первую очередь связано с тем обстоятельством, что с помощью протонных пучков высоких энергий относительно просто можно формировать дозные поля, строго соответствующие геометрии онкологического очага или другого новообразования в любых частях тела пациента. Данное преимущество протонных пучков позволяет использовать для подавления новообразований гораздо большие дозы облучения, не нанося заметного вреда прилегающим к облучаемой зоне здоровым тканям. В России аналогичные работы были начаты практически одновременно с зарубежными и проводятся в ИТЭФ (Москва), ОИЯИ (Дубна) и ПИЯФ.

Первоначально центры протонной и ионной терапии создавались на ускорителях, созданных для проведения физических исследований. Однако в последние годы за рубежом стали создаваться специализированные центры протонной и ионной терапии с пропускной способностью приблизительно 1 000 больных в год. В настоящее время уже функционируют 3 таких центра ионной терапии (США и Дания) и 6 находятся в стадии сооружения. В России в настоящее время находится 3 центра протонной терапии: на синхроциклотроне ЛЯП ОИЯИ⁴, на протонном

¹ *Коптев В. П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 61. Вып. 11. С. 856.*

² *Phys. Rev. D. 1 July 2002. V. 66. Third Series, Part 1: Review of Particle Physics.*

³ В настоящее время – РНЦРХТ (Российский научный центр радиационно-хирургических технологий).

⁴ *Джелепов В. П. Протонные пучки высоких энергий и лучевая терапия злокачественных опухолей / Под ред. В. П. Джелепова и А. И. Рудермана. Дубна, 1975.*

синхротроне ИТЭФ¹ и на синхроциклотроне ПИЯФ, где используется предложенный нами совместно с ЦНИРРИ метод облучения протонами с энергией 1 ГэВ в сочетании с ротационной техникой облучения^{2,3}. По состоянию на 1 января 2000 года в мире курсы протонной терапии прошли более 26 000 пациентов, из них около 4 500 в России (ИТЭФ – 3 200, ОИЯИ – 130, ПИЯФ – ~ 1 400).

Методика облучения протонами

Обычно для целей протонной лучевой терапии применяются протоны с энергией 70–200 МэВ, длина пробега которых в биологических тканях соответствует глубине залегания облучаемых новообразований. Для формирования глубинных дозных полей используется эффект увеличения ионизационных потерь протона в конце пробега (пик Брэгга). С целью усиления этого эффекта разработана техника многопольного облучения с разных направлений, при которой интегральная доза на поверхностные ткани распределяется на большой площади.

Первоначально на синхроциклотроне ПИЯФ, энергия протонов в котором фиксирована и равна 1 ГэВ, предполагалось использовать протонный пучок, предварительно замедленный в полиэтиленовом замедлителе до энергии около 200 МэВ. Однако проведенные оценки показали, что параметры полученного таким способом пучка из-за страгглинга и многократного рассеяния протонов в веществе замедлителя не удовлетворяли бы требованиям протонной терапии. В связи с этим был сделан упор на развитие метода облучения напролет узкими пучками протонов с энергией 1 ГэВ в комбинации с ротационной техникой облучения. Протоны с такой энергией легко проходят сквозь облучаемый объект, производя равномерную ионизацию вдоль своего пути. При этом, разумеется, пропадает эффект увеличения ионизации в зоне облучения за счет пика Брэгга. Однако этот недостаток компенсируется малым рассеянием протонов в веществе. Поэтому если сформировать узкий, с резкими границами пучок протонов на входе облучаемого объекта, то он остается практически таким же узким и в зоне облучения внутри объекта. В результате применения облучения напролет в сочетании с двухосевым плавным вращением объекта облучения относительно неподвижного горизонтального пучка протонов можно обеспечить очень высокое отношение дозы (до 200/1) в зоне облучения к дозе на поверхности объекта. Основные

¹ Хорошков В. С. и др. // Радиационная медицина: сб. ст. М., 1972.

² Карлин Д. Л. и др. // Медицинская радиология. 1975. № 7. С. 13.

³ Коннов Б. А. и др. // Тр. II Всесоюзного совещания по применению ускорителей в народном хозяйстве. Л., 1976. Т. 2. С. 38.

преимущества метода: возможность формирования дозных полей с очень высоким краевым градиентом, что позволяет концентрировать поглощенную энергию облучения в очаге поражения при минимальных радиационных нагрузках на окружающие ткани. Типичное дозное поле представлено на рис. 2.11а, б.

Первый протонный медицинский тракт на синхроциклотроне ПИЯФ был создан в 1973 году силами сотрудников ПИЯФ и ЦНИРРИ. На этом тракте были проведены экспериментальные исследования, которые позволили обосновать возможность эффективного клинического использования указанного метода. Предложенный метод прошел фантомное и клиническое апробирование и получил одобрение Комитета по новой медицинской технике Министерства здравоохранения СССР.

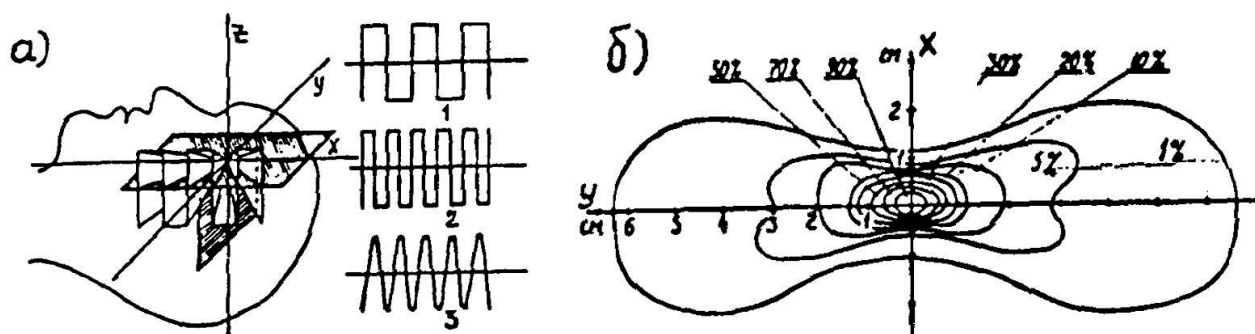


Рис. 2.11. Формирование дозного поля при ротационном методе облучения: а) схема вращения головы пациента вокруг осей X и Z , проходящих через изоцентр. Пучок протонов направлен вдоль оси Y . 1, 2 – траектории пучка на поверхности головы пациента при последовательных вращениях стола пациента и прибора-фиксатора; 3 – при одновременных вращениях стола пациента и прибора-фиксатора; б) распределение дозных полей для пучка протонов с размерами $X = 6$ мм, $Z = 6$ мм при 50 % изодозы. Изодозы: 1 – 90 %; 2 – 50 %; 3 – 20 %; 4 – 5 %

С 1975 года и по настоящее время протонный пучок синхроциклотрона ПИЯФ систематически успешно используется для облучения различных участков головного мозга при лечении заболеваний центральной нервной системы и гипофиза (аденомы гипофиза, артериовенозные аневризмы головного мозга, эпилепсия, офтальмопатия, диабетическая ретинопатия и др.) [9–22]. Схема протонного медицинского тракта представлена на рис. 2.12.

Значительный запас интенсивности протонного пучка, выведенного из ускорительной камеры, позволил использовать простейшую схему тракта.

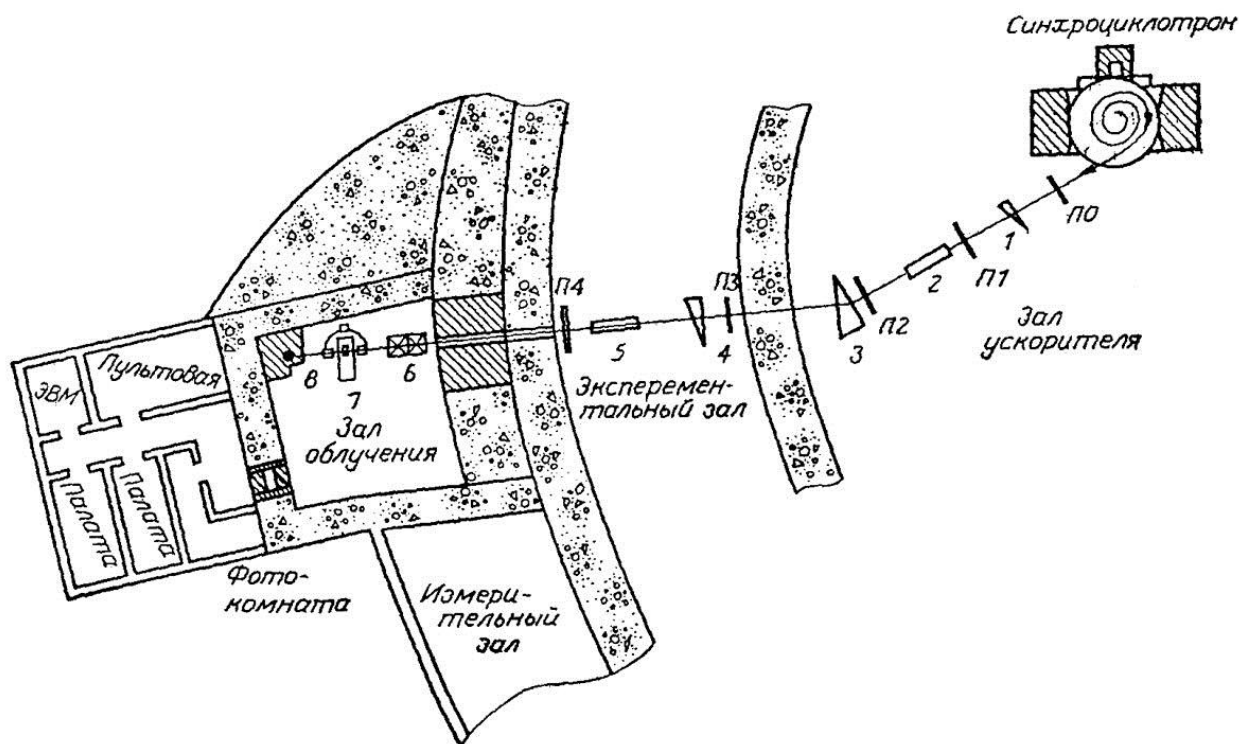


Рис. 2.12. Оптическая схема протонного медицинского тракта синхроциклотрона ПИЯФ.

1, 4 – магниты-корректоры; 2 – коллиматоры; 3 – отклоняющий магнит СП-40; 5 – противоореольный коллиматор; 6 – дублет квадрупольных линз; 7 – стол облучения больного; 8 – глушитель протонного пучка

При выходе из зала ускорителя пучок отклоняется поворотным магнитом СП-40 на угол 5° , что обеспечивает очистку пучка от нейтронов и других вторичных частиц, рожденных при коллимации пучка в зале ускорителя. В зал облучения пучок попадает через экспериментальный зал синхроциклотрона, где установлен противоореольный коллиматор диаметром 20 мм, и через две защитные бетонные стены толщиной 4 м. В зале облучения пучок гасится в чугунной защите. Общая длина тракта – 70 м. На всем протяжении тракта пучок движется в вакуумном ионопроводе.

Минимальные размеры пучка в месте облучения пациента в горизонтальной и вертикальной плоскостях составляют $4 \times 6 \text{ мм}^2$ (ширина на полувисоте). Сходимость пучка к месту облучения составляет $0,6^\circ$. Дозное распределение в тканезквивалентном веществе характеризуется резким краевым градиентом. Спад уровня дозы с 90 до 10% происходит на расстоянии 2-3 мм. Мощность дозы в месте облучения пациента ($50 \text{ Гр} \cdot \text{мин}^{-1}$) обеспечивается при интенсивности пучка $5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$. Путем регулирования интенсивности ускорителя мощность дозы может плавно изменяться в широких пределах. Доза на органы внутри грудной клетки не превышает $3 \cdot 10^{-5}$ от дозы в очаге.

Измерения состава пучка показали, что относительный вклад нейтральных частиц меньше 10^{-4} . Относительный вклад вторичных заряженных частиц также меньше 10^{-4} . В непосредственной близости от оси пучка относительный уровень фона протонов, рассеянных на воздухе и выходном окне вакуумного тракта, составляет $2 \cdot 10^{-4}$. Вклад остальных частиц приблизительно в 100 раз меньше.

Установка для ротационного облучения

Улучшение соотношения между дозой в очаге облучения и дозой на поверхности происходит за счет двух моментов: использования сходящегося пучка и ротационной методики облучения. Учитывая, что частота макроимпульсов пучка ≈ 50 Гц, процесс облучения можно считать непрерывным. Это дает возможность использовать ротационную методику облучения, состоящую во вращении облучаемого объекта относительно двух осей, проходящих через точку облучения. Схема установки для ротационного облучения представлена на рис. 2.13.

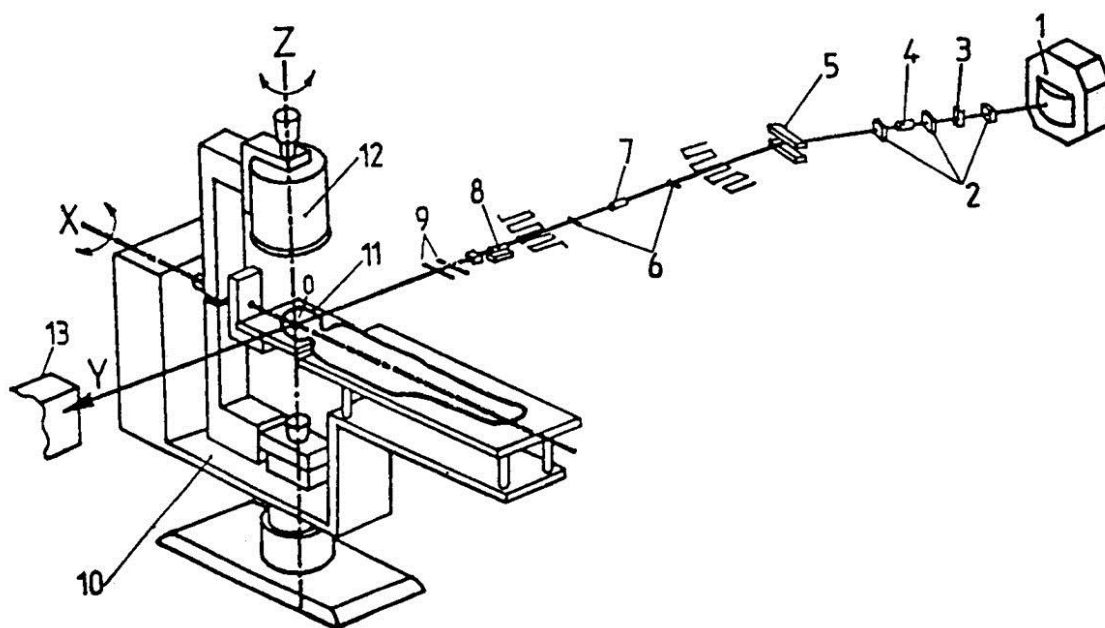


Рис. 2.13. Схема установки для облучения пациентов.

1 – синхроциклотрон; 2, 6 – профилометры; 3 – магнит-корректор; 4 – коллиматор; 5 – отклоняющий магнит СП-40; 7 – противоореольный коллиматор; 8 – дублет квадрупольных линз; 9 – профилометр зала облучения; 10 – стол для подвижного облучения; 11 – фиксатор головы пациента; 12 – рентгеновский центратор; 13 – глушитель пучка

Установка представляет собой подвижный стол, на который укладывается пациент. Стол совершает медленные маятникообразные качания в горизонтальной плоскости на угол $\pm 40^\circ$, и одновременно с этим перед-

няя часть стола, на которой фиксируется голова больного, совершает медленные маятникообразные качания на угол $\pm 30^\circ$. Для совмещения пучка, оси вращения установки и очага облучения разработана система из рентгеновского центратора. Система фиксации головы пациента производится с помощью индивидуально изготовленной маски. Движение установки производится автоматически по программе, вводимой с ЭВМ. На рис. 2.14 представлено распределение дозных полей при облучении гипофиза в операциях гипофизэктомии¹.

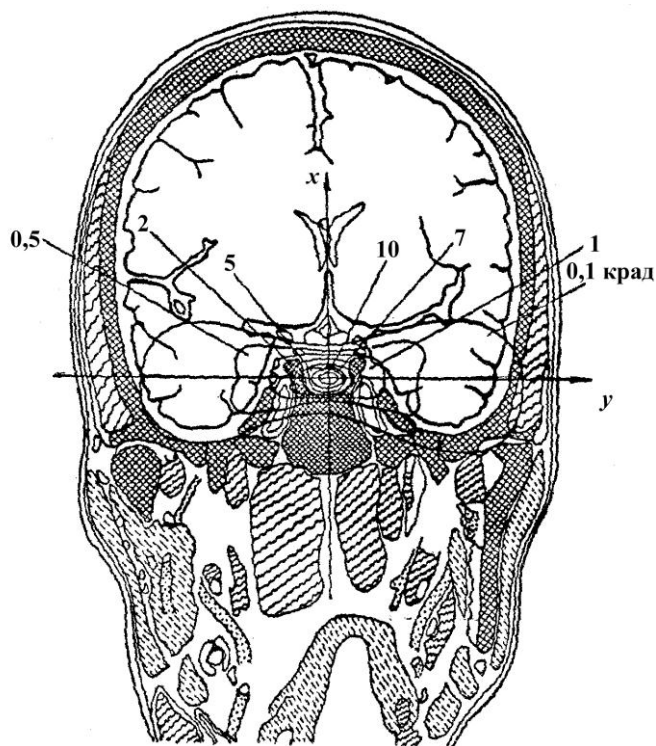


Рис. 2.14. Распределение дозных полей при облучении гипофиза. Цифрами показаны изодозы: 1 – 1 %; 5 – 5 %; 10 – 10 %

Система автоматизированного контроля параметров пучка, общая и клиническая дозиметрия

Комплекс протонной терапии оборудован системой автоматизированного контроля параметров пучка в зоне облучения. С помощью системы диагностики пучка во время облучения контролируется положение центра тяжести пучка и его размеры. При отклонении пучка на величину ~ 1 мм сеанс облучения автоматически прекращается, т. к. возникает опасность повреждения жизненно важных участков головного мозга. Система автоматизированного контроля параметров пучка состоит из приборов диагностики пучка – профилометров и персонального компьютера для управления режимами облучения.

¹ Коннов Б. А. и др. Использование протонных пучков в лучевой терапии. М., 1979. С. 50.

Облучение больных потребовало создания на синхроциклотроне специальных режимов работы ускорителя: режима кратковременных за-светок для юстировки больного, что является проблемой для мощной системы ускорителя с большой постоянной времени, а также режима облучения со стабилизацией интенсивности и дозы на уровне нескольких процентов. Доза, отпущенная пациенту, определяется с помощью специально разработанного комплекса радиотехнической и дозиметрической аппаратуры.

Комплекс протонной лучевой терапии на синхроциклотроне ПИЯФ отвечает требованиям Европейской группы по клинической дозиметрии (European Clinical Heavy Particle Dosimetry Group) и Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям (ICRU.REPORT 59).

Результаты лечения больных методом протонной лучевой терапии

По состоянию на 1 января 2012 года курс облучения на синхроциклотроне ПИЯФ прошли ~ 1 400 больных.

Результаты облучения представлены в табл. 2.3. Дозы облучения составляют от 50 до 200 Гр. Из всех больных, прошедших курс протонной терапии, 80 % случаев составили больные с микроаденомами гипофиза и артериовенозными мальформациями головного мозга. Клиническая ремиссия зафиксирована в 85 % случаев. Наиболее успешно проходит лечение артериовенозных мальформаций головного мозга объемом до 8 см³, не поддающихся хирургическому лечению (рис. 2.15). Отметим, что лечение этих заболеваний, требующих эктомии малых участков головного мозга размерами в несколько кубических миллиметров, возможно только по гатчинской методике на синхроциклотроне ПИЯФ. На рис. 2.16 показан зал облучения больных с пациентом, находящимся на столе для ротационного облучения.

Таблица 2.3

Количество больных, прошедших курс лечения на синхроциклотроне ПИЯФ

Заболевание	1975–1979	1980–1984	1985–1989	1990–1994	1995–1999	2000–2005	2006–2012	Общее число больных
Рак молочной железы	44	29	20	16	13	56	24	202
Рак предстательной железы	–	–	1	14	42	52	17	126

Окончание таблицы 2.3

Заболевание	1975– 1979	1980– 1984	1985– 1989	1990– 1994	1995– 1999	2000– 2005	2006– 2012	Общее число больных
Офтальмопатия	4	19	4	2	–	–	–	29
Диабетическая ретинопатия	1	13	10	1	–	–	–	25
Аденомы гипофиза:								
– пролактиновая	5	18	31	29	10	13	12	118
– соматотропная	9	23	41	22	13	4	5	117
– гормонально- неактивная	27	66	66	16	17	3	10	205
– болезнь Иценко – Кушинга	4	13	9	7	3	1	–	37
Мальформации головного мозга:								
– артериовеноз- ные	12	83	92	150	87	52	26	502
– артериальные	1	5	–	–	–	–	–	6
– эпилепсия	2	3	–	–	–	–	–	5
Общее количество	109	272	274	257	185	181	94	1 372

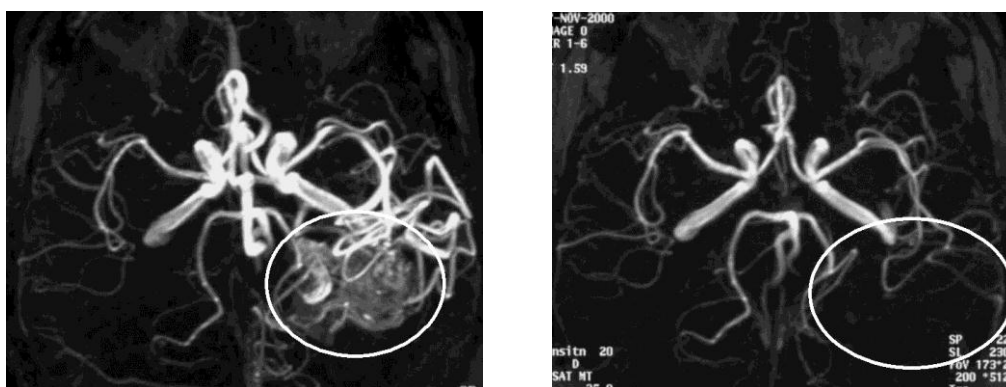


Рис. 2.15. Артериовенозная аневризма: слева – до лечения, справа – после лечения



Рис. 2.16. Зал для облучения больных на синхроциклотроне ПИЯФ

После проведения курса протонной стереотаксической терапии различных заболеваний головного мозга ни у одного больного не выявлены радиационные осложнения ни в ближайшие, ни в отдаленные (до 10 лет) сроки.

Успехи, достигнутые при клиническом использовании протонов с энергией 1 ГэВ, позволяют ставить вопрос о дальнейшем развитии этого направления. В настоящее время основным фактором, сдерживающим использование и дальнейшее развитие этого метода, является малая пропускная способность комплекса, составляющая в настоящее время не более 70–80 человек в год. Это связано с тем обстоятельством, что для выполнения программы физических и прикладных исследований и облучения больных используется один и тот же протонный пучок, что, естественно, ограничивает масштабы его использования в медицинских целях.

Для реализации возможности дальнейшего развития протонной терапии на синхроциклотроне в Гатчине в 1987 году был создан второй специализированный медицинский протонный тракт ускорителя, который обеспечивает вывод протонного пучка из ускорительной камеры параллельно с выводом основного пучка для физических и прикладных исследований [17, 18, 22]. Для этой цели была использована часть ускоренного пучка, которая в процессе регенеративного вывода не попадает в магнитный канал, а проходит вблизи внутренней стенки канала, где магнитное поле ослаблено на величину в несколько кГс. Вследствие этого указанная часть пучка, которая составляет около 10 % от всего ускоренного пучка, не попадает в рабочую зону регенератора и выбрасывается в виде веера на стенку ускорительной камеры. Для формирования из этой части протонов пучка для целей протонной терапии внутри каме-

ры был установлен дополнительный горизонтально фокусирующий магнитный канал, с помощью которого пучок был направлен через отверстие в стойке магнита наружу, за стойку магнита. Канал представляет собой два железных бруска шириной 50 мм, высотой 55 мм и длиной 700 мм, установленных симметрично выше и ниже средней плоскости магнита. Вертикальный зазор между брусками – 90 мм. Для коррекции направления вывода пучка используется магнит-корректор (рис. 2.17).

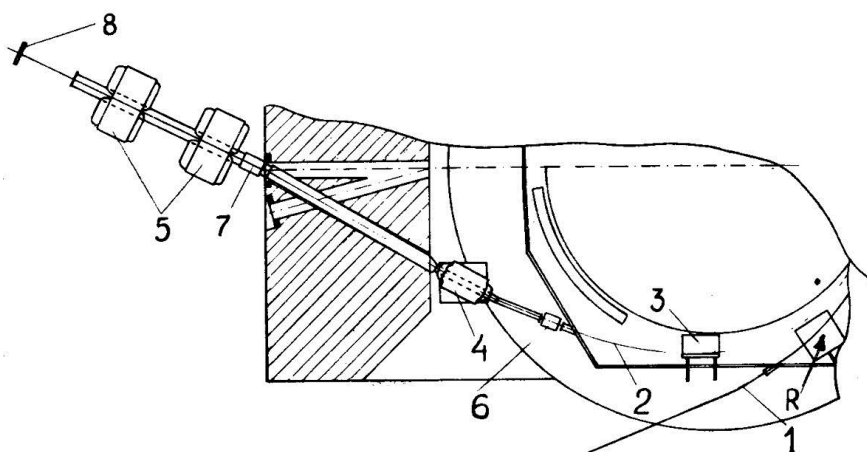


Рис. 2.17. Схема системы вывода второго пучка для протонной терапии. 1 – направление вывода основного пучка; 2 – направление вывода второго протонного пучка; 3 – дополнительный магнитный канал; 4 – магнит-корректор; 5 – дублет линз; 6 – настроечный коллиматор; 7 – коллиматор; 8 – промежуточный фокус

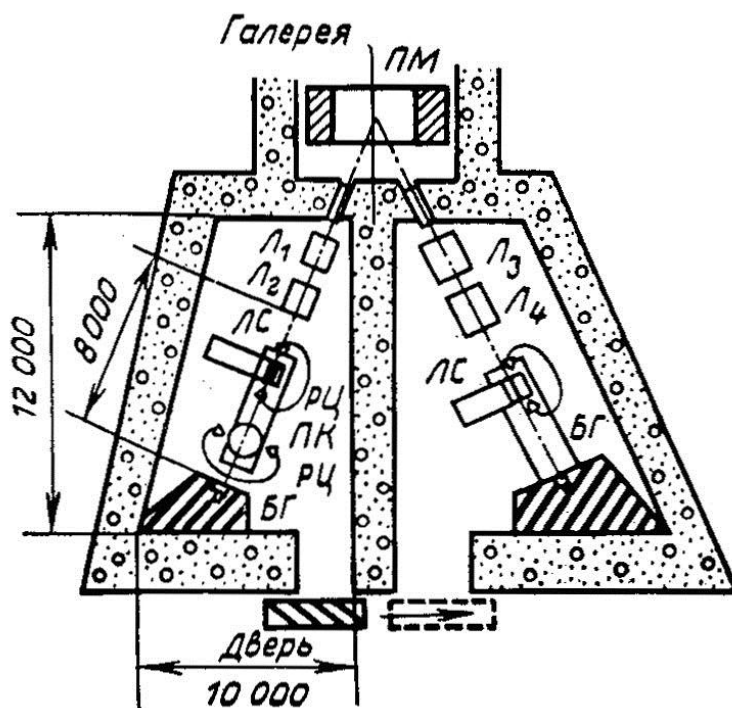


Рис. 2.18. Проект двухкабинного зала облучения для протонной терапии

Снаружи, за стойкой магнита, для фокусировки сформированного пучка установлен дублет квадрупольных линз МЛ-17. Далее пучок должен быть направлен через отверстие в стене главного зала наружу здания, где планируется строительство нового медицинского комплекса с двухкабинным залом облучения (рис. 2.18) [18], который позволил бы в 15 раз увеличить пропускную способность медицинского центра в Гатчине и обеспечить потребности в протонной терапии всего Северо-Запада РФ. В институте был разработан проект этого комплекса, но, к сожалению, из-за отсутствия финансирования реализовать его пока не представилось возможным.

Программа развития медицинского комплекса

Перспективу развития медицинского комплекса институт связывает с дальнейшим развитием протонной терапии и ядерной медицины.

Для расширения возможностей центра адронной терапии в ПИЯФ – РНЦРХТ принято решение на уровне Правительства РФ о создании на базе синхроциклотрона центра адронной терапии для лечения полного спектра онкологических заболеваний.

Проект МКЦС – медицинского комплекса на базе циклотрона и синхротрона (приказ по ПИЯФ № 23 от 01.03.2010)

Реализация проекта осуществляется в рамках создания Научно-исследовательского центра «Курчатовский институт», по организации которого принято постановление Президента и Правительства России.

Руководитель проекта директор ПИЯФ профессор В. М. Самсонов.

Научные руководители: заведующий Ускорительным отделом доктор технических наук Н. К. Абросимов; директор Отдела физики высоких энергий член-корреспондент РАН А. А. Воробьев.

Ответственные за проведение работ: заведующий Лабораторией физики и техники ускорителей кандидат технических наук Г. А. Рябов; главный инженер Ускорительного комплекса Е. М. Иванов; заведующий Лабораторией короткоживущих ядер кандидат физико-математических наук В. Н. Пантелеев.

Координаторы проекта: заместитель директора Отдела физики высоких энергий доктор физико-математических наук Д. М. Селиверстов; заместитель директора ПИЯФ кандидат физико-математических наук А. Г. Кривишч.

От НИИЭФА

Руководитель проекта заместитель директора НИИЭФА доктор физико-математических наук Ю. Н. Гавриш.

Ведущие исполнители: кандидат технических наук В. Г. Мудролюбов; главные конструкторы: П. В. Богданов, С. С. Цыганков и др.

Проект предполагает в первую очередь завершение строительства изохронного циклотрона на максимальную энергию протонов 80 МэВ и током 100 мкА [23, 24]. С его вводом в действие будет осуществляться протонная терапия различных онкологических заболеваний глаз с высокой эффективностью (80–90 %) и пропускной способностью, удовлетворяющей потребностям Северо-Западного региона России. Циклотрон Ц-80 будет использоваться также для производства широкого круга изотопов для медицинских целей. Завершающей фазой создания медицинского центра в составе ускорительного комплекса ПИЯФ станет строительство и запуск протонного синхротрона на максимальную энергию 250 МэВ по проекту Института ядерной физики им. Г. И. Будкера (СО РАН). Предлагаемый синхротрон будет отвечать всем современным требованиям, предъявляемым к подобного рода установкам. Он будет оснащен современными методами доводки пучка до пациента при помощи гантри и системами, обеспечивающими синхронизацию пучка с движущимися органами при их облучении. Применение гантри в лучевой терапии (ПИЯФ – НИИЭФА) может стать первым в России. Предполагается, что функционирование синхротрона С-250 в диапазоне энергий протонов 100–250 МэВ может осуществляться как в линию с циклотроном Ц-80, так и независимо, с использованием собственного инжектора. При запуске всех звеньев ускорительного комплекса число облучаемых пациентов в первые годы работы центра составит 500 за год, при максимальной потребности Северо-Западного региона – 1 200. Вариант компоновки универсального медицинского центра приведен на рис. 2.19.

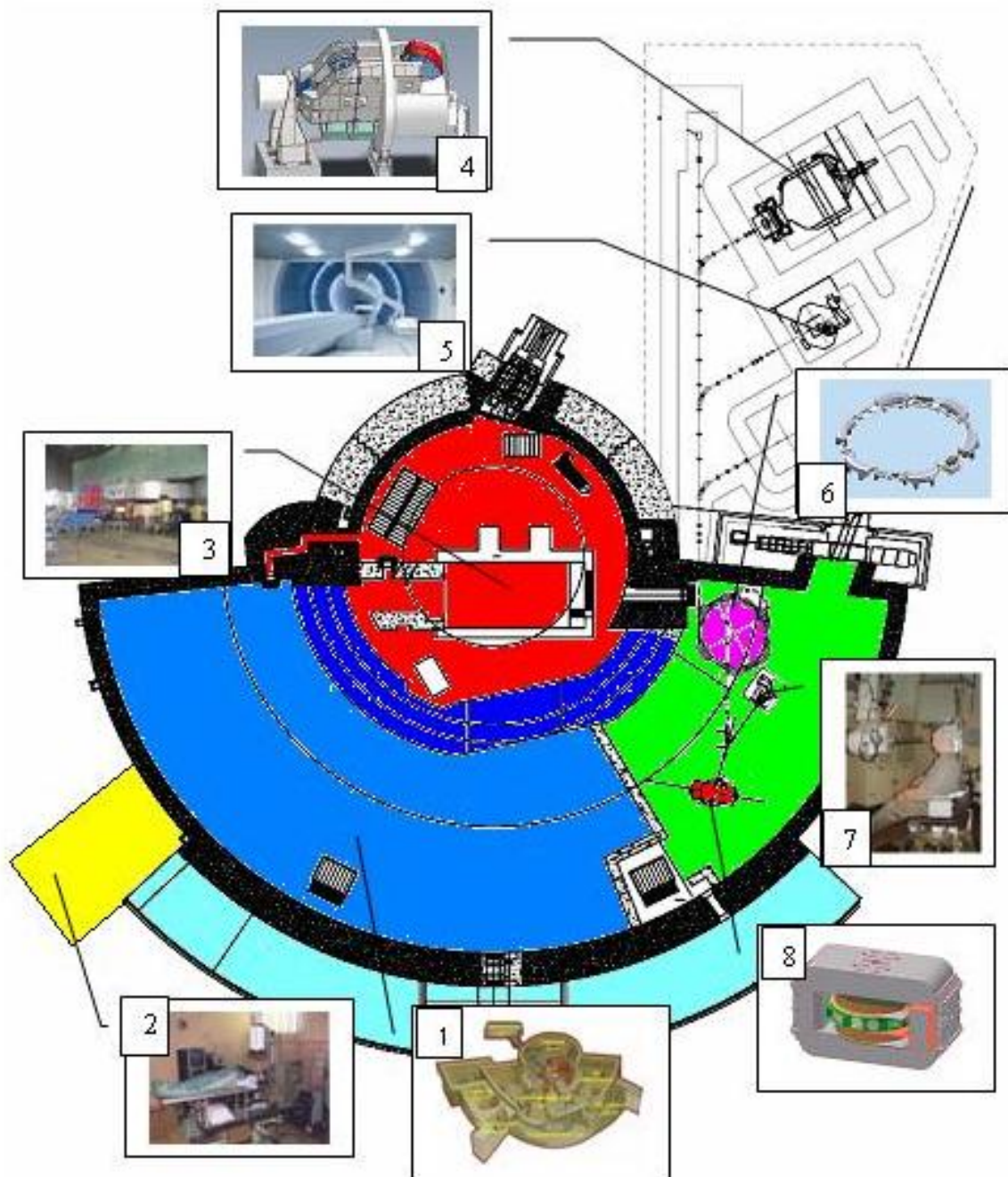


Рис. 2.19. Вариант проекта компоновки универсального медицинского центра на базе циклотрона Ц-80, синхротрона С-250 и синхроциклотрона СЦ-1 000.

1 – комплекс синхроциклотрона ПИЯФ – СЦ-1 000; 2 – медицинский корпус для облучения больных протонным пучком; 3 – синхроциклотрон СЦ-1 000; 4 – система ГАНТРИ; 5 – онкологические порты; 6 – синхротрон С-250; 7 – офтальмологический порт; 8 – циклотрон Ц-80

Экспериментальный комплекс спектрометра ГНЕЙС

Другим экспериментальным комплексом, который был создан на синхроциклотроне ПИЯФ, является комплекс времяпролетного нейтронного спектрометра ГНЕЙС [25–27].

Нейтронная времяпролетная спектроскопия в сочетании с современными высокоинтенсивными импульсными источниками нейтронов является мощным инструментом исследований в области физики ядра и элементарных частиц, физики конденсированных сред и физики реакторов. Времяпролетная спектроскопия используется также для решения широкого круга прикладных задач.

Нейтронный времяпролетный спектрометр ГНЕЙС, созданный на базе синхроциклотрона с энергией протонов 1 ГэВ, предназначен для исследования взаимодействия нейтронов с атомными ядрами в диапазоне энергий от 10^{-2} эВ до 100 МэВ.

Описание спектрометра

Импульсным источником нейтронов служит система «мишень + замедлитель», помещенная в вакуумную камеру ускорителя. Импульс быстрых нейтронов получается в результате сброса протонного пучка с энергией 1 ГэВ на свинцовую мишень, имеющую форму параллелепипеда размером $400 \times 200 \times 50$ мм³. Мишень охлаждается водой. Сброс протонного пучка на мишень осуществляется с помощью импульсного дефлектора за счет отклонения ускоряемого протонного сгустка высоковольтным импульсом 90–100 кВ с длительностью переднего фронта менее 70 нс, подаваемого на пластины С-электрода. Импульс сброса вырабатывается тиратронным генератором, запуск которого синхронизирован с фазой ВЧ ускоряющего напряжения. Отклоненный протонный пучок попадает на мишень, расположенную на 20–30 мм ниже медианной плоскости магнитного поля ускорителя. Выше медианной плоскости, над мишенью, симметрично относительно средней плоскости зазора магнита, располагается полиэтиленовый замедлитель, также имеющий форму параллелепипеда. Замедлитель представляет собой пакет пластин (размером 300×100 мм² и толщиной 1 мм каждая) из полиэтилена высокой плотности, проложенных для отвода тепла алюминиевыми фольгами. Взаимное расположение мишени и замедлителя показано на вставке рис. 2.20, где приведена общая схема спектрометра ГНЕЙС.

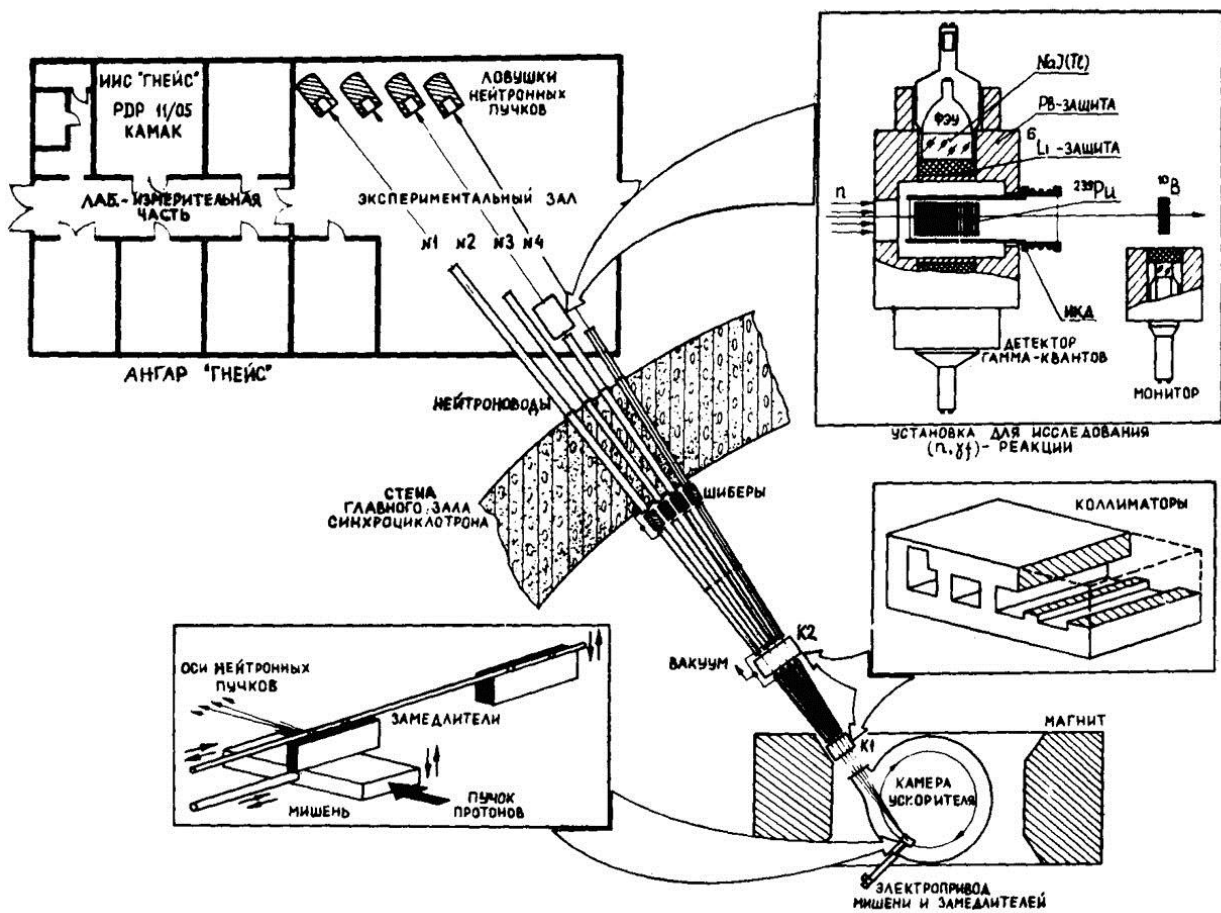


Рис. 2.20. Схема нейтронного спектрометра ГНЕИС

Мишень и замедлители могут перемещаться в двух направлениях: радиальном и вертикальном – и управляются дистанционно с пульта ускорителя. Оси нейтронных пучков № 1–4 проходят через замедлитель, а ось пучка № 5 (проходящего под пучком № 4) – через мишень. Такая геометрия позволяет существенно снизить фон быстрых нейтронов и фон от мощной вспышки гамма-излучения из мишени в пучках № 1–4.

Нейтронные пучки по вакуумным нейтроноводам выводятся через бетонную стену главного зала синхроциклотрона наружу, в отдельно стоящее здание-ангар, в котором имеется экспериментальный зал площадью 200 м². Формирование нейтронных пучков осуществляется системой коллиматоров, два из которых: К1 (латунный) и К2 (стальной) – показаны на рис. 2.20. Другие коллиматоры располагаются внутри вакуумных нейтроноводов. Пучки при необходимости перекрываются чугунными шиберами толщиной 0,7 м, установленными в главном зале ускорителя. На концах пролетных баз, имеющих в настоящее время длину 35–50 м, в пределах экспериментального зала-ангара установлены нейтронные ловушки из стали и бетона.

Энергетический спектр и интенсивность пучка нейтронов

Проведенные оценки показали, что выход нейтронов из Рb-мишени при энергии падающих протонов 1 ГэВ равен 19,2 н/р. Большинство образованных нейтронов (~ 85 %) имеют максвелловский спектр со средней энергией 1–3 МэВ и изотропное распределение. Остальные 15 % образуются в каскадных процессах взаимодействия протонов с нуклонами ядер и имеют энергию в несколько сотен МэВ и остронаправленное вперед угловое распределение.

При числе протонов, ускоряемых за один цикл $3 \cdot 10^{11}$ р/имп., при частоте посылок 50 Гц и нейтронном выходе 19,2 н/р интегральный выход нейтронов из Рb-мишени в телесный угол 4π составляет $\sim 3 \cdot 10^{14}$ н/с.

Для трансформации нейтронного спектра – получения нейтронов с энергиями ≤ 1 МэВ (область, где использование спектрометра ГНЕЙС наиболее эффективно) – в мишени-источнике используется полиэтиленовый замедлитель с высокой плотностью атомов водорода ($7,9 \cdot 10^{22}$ ат./см³).

ГНЕЙС и другие времяпролетные спектрометры

Сравнение импульсных нейтронных источников и времяпролетных спектрометров на их базе производится с помощью различных критериев, из которых чаще всего используется так называемый коэффициент качества (или просто – качество источника)¹. В общем виде коэффициент качества определяется как

$$K = \frac{Q(E)}{\Delta t^2},$$

где $Q(E)$ – число нейтронов, испускаемых источником за 1 с в единичном энергетическом интервале (н/с · эВ); Δt – полная временная неопределенность (без доплеровского вклада).

В табл. 2.4 приведены основные параметры ускорителей и действующих в настоящее время на их базе наиболее интенсивных импульсных нейтронных источников, используемых для нейтронной время-пролетной спектроскопии². Сравнение показывает, что по качеству нейтронного источника спектрометр ГНЕЙС является одной из лучших установок этого типа в нашей стране и за рубежом.

¹ *Абрамов А. И. и др.* Основы экспериментальных методов ядерной физики. М., 1970. 385 с.

² *Шабалин Е. П.* // Атомная энергия. 1982. Т. 52. Вып. 2. С. 92–98.

Таблица 2.4

**Параметры ускорителей и действующих на их базе
импульсных нейтронных источников**

Наименование, местонахождение	Тип частиц, энергия, МэВ	Длительность импульса быстрых нейтронов, нс	Частота, Гц	Средняя интенсивность нейтронов $\times 10^{14}$, н/с	Коэффициент качества К, $n/c^3 \cdot \text{эВ}$	Мишень-замедлитель
ГНЕЙС, синхротрон (ПИЯФ, Гатчина, РФ)	p, 1 000	10	≤ 50	3	$\leq 3 \cdot 10^{30}$	свинец, полиэтилен
Синхротрон (Харуэлл, Великобритания)	p, 160	3,5	200–800	1	$8,2 \cdot 10^{30}$	вольфрам
Изохронный циклотрон (КФК, Карлсруэ, ФРГ)	d, 50	0,8	50 000	2	$3,1 \cdot 10^{32}$	уран
ORELA, ЛУЭ (ORLN, Ок-Ридж, США)	e^- , 140	3–24 1 000 3	$\leq 1 000$ ≤ 700 $\leq 1 000$	0,1 1 0,5	$\leq 1,1 \cdot 10^{30}$ $\leq 10^{26}$ $\leq 6,4 \cdot 10^{30}$	тантал
HELIOS, ЛУЭ (Харуэлл, Великобритания)	e^- , 136	5 500	$\leq 1 000$ ≤ 300	0,6 3,6	$\leq 6,4 \cdot 10^{29}$ $\leq 1,4 \cdot 10^{25}$	уран, полиэтилен
Факел, ЛУЭ (ИАЭ, Москва, СССР)	e^- , 60	10–25 5 500	50–900 50–150	0,4 4	$4 \cdot 10^{29}$ $1,3 \cdot 10^{25}$	вольфрам, полиэтилен
GELINA, ЛУЭ (Гель, Бельгия)	e^- , 120	4 2 000	900 250	0,2 0,6	$1,2 \cdot 10^{30}$ $1,5 \cdot 10^{25}$	уран, полиэтилен
ИБР-30/ЛУЭ-40 (ОИЯИ, Дубна, СССР)	e^- , 40 (бустер)	4 000	≤ 100	7	$\leq 4,4 \cdot 10^{25}$	вольфрам, полиэтилен
IPNS-1, синхротрон (ANL, Аргона, США)	p, 500	100	30	15	$1,5 \cdot 10^{29}$	уран, полиэтилен
LAMPF/WNR, линейный ускоритель (LASL, Лос-Аламос, США)	p, 800	10 000 75 000 0,5	120 120 $\leq 6 000$	20 120 0,14	$\leq 2 \cdot 10^{25}$ $\leq 2,1 \cdot 10^{24}$ $\leq 5,6 \cdot 10^{31}$	вольфрам, тантал, полиэтилен

В 2008 году на базе спектрометра ГНЕЙС был получен нейтронный пучок с энергетическим спектром нейтронов, повторяющим спектр атмосферных нейтронов, удовлетворяющий Международному стандарту JEDEC (патент ПИЯФ РАН № 80646 с приоритетом от 04.08.2008) [28–31]. Этот пучок является вторым в мире и единственным в Европе, позволяющим проводить ускоренные испытания компонентов радиоэлектроники по международным стандартам.

В отличие от нейтронного пучка на ускорителе LAMPF, нами был использован метод рождения нейтронов на внутренней мишени с использованием инфраструктуры времяпролетного спектрометра ГНЕЙС, что значительно облегчило работы по реализации проекта. В главе 7 описан способ получения такого нейтронного пучка и методика измерений его параметров.

Создание нового нейтронного пучка значительно расширяет экспериментальные возможности по радиационным исследованиям на синхротроне ПИЯФ. Появилась возможность создания в ПИЯФ уникального в Европе центра по радиационным испытаниям авиакосмической радиоаппаратуры в соответствии с высокими требованиями международных стандартов.

Спектрометрический комплекс ИРИС

Одним из наиболее перспективных направлений исследований в области ядерной физики является изучение ядер, удаленных от полосы бета-стабильности. С середины 60-х годов в различных лабораториях мира стали проявлять интерес к ядрам, удаленным от полосы бета-стабильности, которые, в силу их малых периодов полураспада и небольших сечений образования в реакциях, не могли быть исследованы существовавшими в то время экспериментальными методами. Экстраполяция значений масс нуклидов по известным полуэмпирическим формулам приводила к выводу, что число еще неизвестных в то время ядер превышает количество известных. Это позволяло надеяться на возможность значительного увеличения информации, которая помогла бы построить полную картину свойств ядер и послужить базой для качественно новых заключений о структуре ядра и ядерных сил. Наибольший интерес вызывал вопрос о возможности обнаружения протонной и двухпротонной радиоактивности, испускания запаздывающих протонов и нейтронов, запаздывающего деления и других экзотических видов распада, которые энергетически невозможны для нуклидов вблизи дорожки бета-стабильности.

В ПИЯФ была создана первая в стране система ISOL (Isotope Separator On-Line), которая долгое время была единственной. Российская ISOL-установка получила название ИРИС (Исследование Радиоактивных Изотопов на Синхроциклотроне).

Для Лаборатории ИРИС была построена специальная пристройка к экспериментальному залу с системой защиты и глушения пучка полной интенсивности и специальный тракт транспортировки протонного пучка через экспериментальный зал в зал Лаборатории ИРИС (рис. 2.21). Общая длина тракта составляет ~ 60 м. Пучок проходит через коллиматор № 5 в стене между залом ускорителя и экспериментальным залом, через весь экспериментальный зал, через отверстие в стене между экспериментальным залом и залом ИРИС, фокусируется квартетом линз 20К50 на мишень и затем попадает в глушитель пучка. Вдоль тракта пучок фокусируется 6 дублетами квадрупольных линз, для диагностики пучка в тракте используется 5 профилометров пучка, а соосность пучка с трактом корректируется с помощью 4х- и 4z-корректоров пучка. Тракт транспортировки обеспечивает транспортировку 90 % интенсивности основного пучка из зала ускорителя на мишень ИРИС при размере пятна пучка ~ 10 мм.

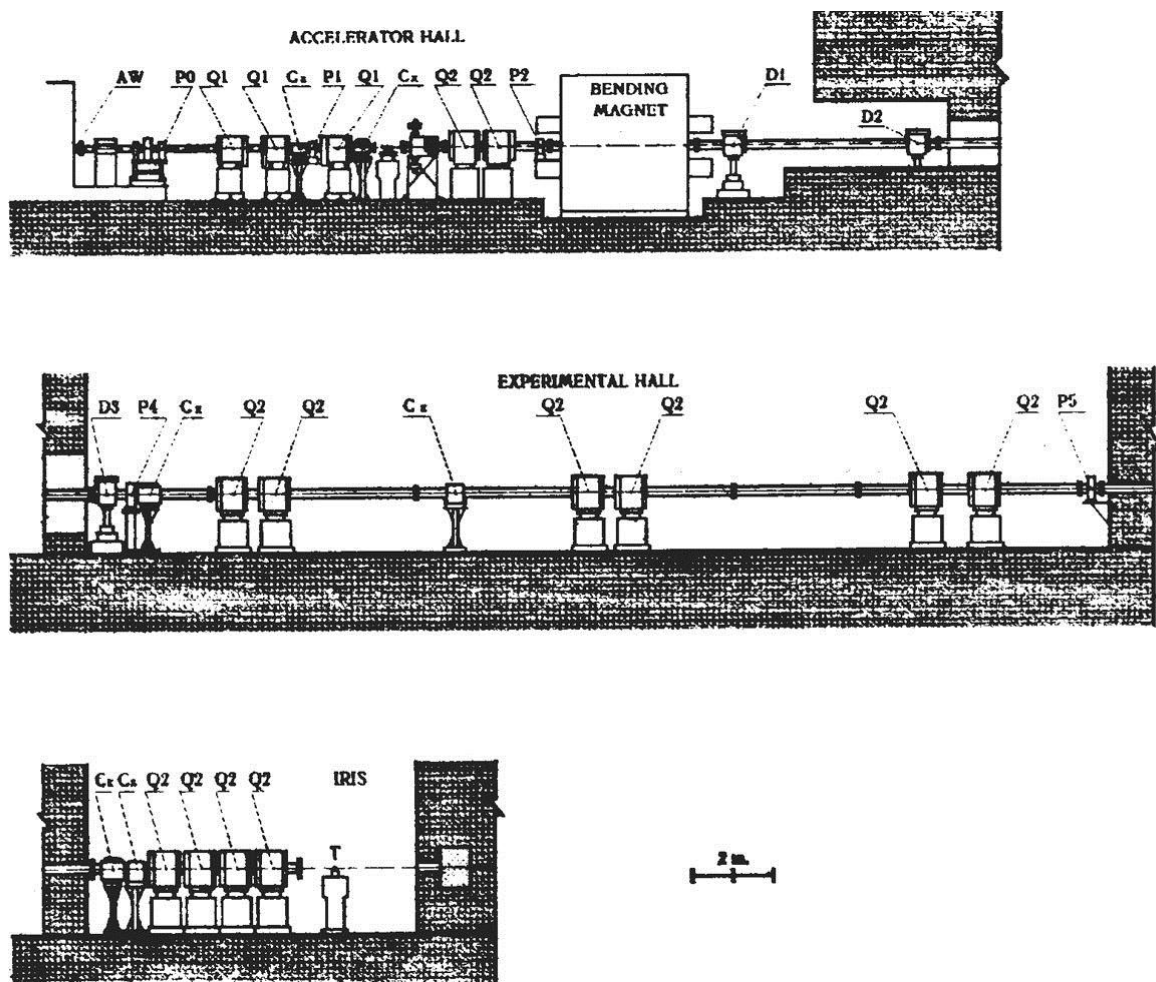


Рис. 2.21. Протонный тракт Лаборатории ИРИС.

AW – выходное окно ускорительной камеры; P0, P1, P3, P4, P5 – профилометры; C_x – горизонтальный магнит-корректор; C_z – вертикальный магнит-корректор; Q_1 – квадрупольная линза 10К50; Q_2 – квадрупольная линза 20К50; D1, D2, D3 – гасители пучка; T – мишень масс-сепаратора

Электромагнитный масс-сепаратор работает on-line с пучком синхротроциклотрона и служит для выделения изотопов нужной массы. Общий вид расположения оборудования Лаборатории ИРИС, описанной в работе Г. Д. Алхазова и др.¹, представлен на рис. 2.22.

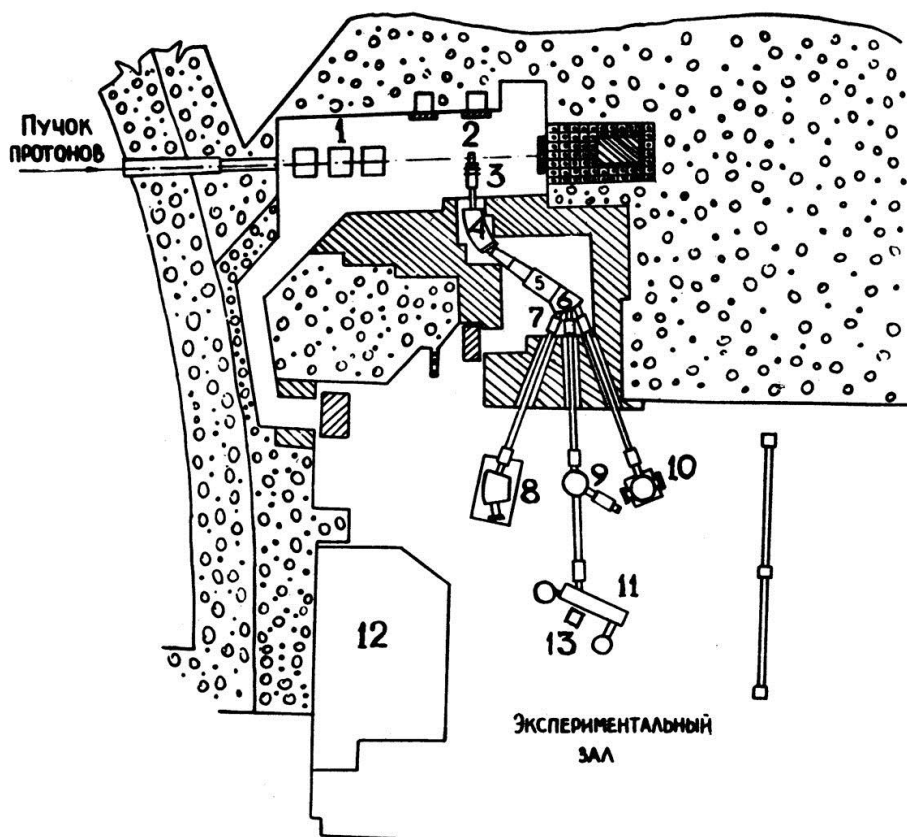


Рис. 2.22. Общий вид установки ИРИС.

1 – магнитные фокусирующие линзы; 2 – мишенное устройство; 3 – линзовая камера масс-сепаратора; 4 – анализирующий магнит; 5 – дисперсионная камера; 6 – камера разводки ионных пучков; 7 – электрические фокусирующие линзы; 8 – масс-спектрометр; 9 – камера поворота ионного пучка; 10 – камера взаимодействия ионного и лазерного пучков; 11 – лентопротяжное устройство; 12 – лазерная установка; 13 – спектрометр полного поглощения гамма-лучей

Мишенное устройство является сердцем всей установки и в значительной степени определяет ее возможности, поэтому разработке этого устройства уделялось особое внимание. В ПИЯФ разработан целый ряд мишеней: кипящая мишень для получения изотопов благородных газов, мишень из расплавленного лантана для получения изотопов ксенона и цезия, полый вольфрамовый или танталовый цилиндр, нагреваемый с помощью электронной бомбардировки до 2800° для получения редкоземельных элементов, и т. д. (всего более 5 видов). Успехи в разработке

¹ Алхазов Г. Д. и др. // Методические и прикладные работы ЛИЯФ: сб. Л., 1988. С. 53.

высокоэффективных мишеней позволяют компенсировать довольно скромную интенсивность протонного пучка и получить конкурентоспособные общие результаты. В частности, получены значительные успехи в разработке высокотемпературных мишеней, которые являются самыми быстрыми и эффективными для получения короткоживущих ядер, удаленных от полосы бета-стабильности. Получены самые высокие в мире выходы крайне удаленных короткоживущих нейтроноизбыточных изотопов Pb и Cs. Эти работы получили признание, и в них участвует большая коллаборация ученых из многих лабораторий мира.

Таким образом, спектрометрический комплекс ИРИС представляет собой хорошо оснащенную современную исследовательскую лабораторию, которая успешно работает в тесном сотрудничестве с другими лабораториями этого профиля (ISOLDE, ЦЕРН, Швейцария; Институт ядерной физики CNFN, Линьяри, Италия; GANIL, проект SPIRAL-II, Франция).

В заключение отметим, что одной из базовых экспериментальных установок ПИЯФ является самый крупный в мире синхроциклотрон на энергию протонов 1 ГэВ, предназначенный для исследований в области физики элементарных частиц, структуры атомного ядра и механизма ядерных реакций, физики твердого тела, а также в области прикладной физики. Синхроциклотрон интенсивно используется также для лечения больных и ядерно-медицинских исследований. Запуск синхроциклотрона состоялся в ноябре 1967 года, а постоянное его использование на физический эксперимент началось в апреле 1970 года. С 1975 года производится регулярное лечение больных.

С момента запуска до 1990 года синхроциклотрон ПИЯФ успешно эксплуатировался на уровне 6 000–6 500 часов в год. В последнее время из-за финансовых трудностей эксплуатация синхроциклотрона ограничена до 3 000–3 500 часов в год.

Правительственная комиссия при Министерстве науки России за достижения в области фундаментальных исследований и ядерной медицины присвоила синхроциклотрону ПИЯФ статус уникальной установки России.

Синхроциклотрон ПИЯФ в настоящий период является единственным в РФ активно действующим ускорителем на промежуточные энергии до 1 ГэВ с интенсивностью выведенного протонного пучка 1 мкА. Программа усовершенствования сделала синхроциклотрон уникальной установкой: на базе ускорителя созданы уникальные экспериментальные комплексы, такие как комплекс протонной лучевой терапии, нейтронный спектрометр ГНЕЙС, лазерно-спектроскопический комплекс ИРИС для исследования короткоживущих изотопов и др. Все это позволяет произ-

водить конкурентоспособную научную продукцию в мире по широкому фронту исследований.

В экспериментах на пучках синхроциклотрона ЛИЯФ участвуют исследовательские группы из США, Японии, Франции, Италии, а также ученые из ведущих научно-исследовательских центров России и стран СНГ: ОИЯИ, Дубна; ИТЭФ, Москва; РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров; МФТИ, Долгопрудный; ГНЦ ФЭИ, Обнинск; ЦНИРРИ, Санкт-Петербург; РНЦ КИ, Москва; Государственный университет, Минск, и др.

Публикации

1. **Абросимов Н. К., Александров А. А., Каминкер Д. М., Миронов Ю. Т.** Эффективность защиты синхроциклотрона ЛИЯФ им. Б. П. Константинова АН СССР // Тр. IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1975. Т. 2. С. 231–235.
2. **Абросимов Н. К., Александров А. А., Дмитриев С. П., Иванов Е. М., Миронов Ю. Т., Рябов Г. А.** Система для дистанционного закрывания коллиматоров на синхроциклотроне ЛИЯФ. Препринт ЛИЯФ 1545. Л., 1989. 12 с.
3. **Абросимов Н. К., Куликов А. В., Михеев Г. Ф.** Полупроводниковый профилометр для синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР // Тр. IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1985. Т. 1. С. 348–350.
4. **Абросимов Н. К., Васильев А. М., Герасимов А. М., Коровина Л. А., Михеев Г. Ф., Покровский А. С., Рябов Г. А.** Полупроводниковый профилометр для диагностики протонного пучка синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР с энергией 1 ГэВ. Препринт ЛИЯФ 1487. Л., 1989. 12 с.
5. Устройство для измерения профилей пучка ускорителей заряженных частиц: а. с. № 110119 с приоритетом от 30.06.1982 / **Н. К. Абросимов, А. В. Куликов, Г. Ф. Михеев.** Бюл. № 33 (II ч.), 2000. С. 345.
6. **Абросимов Н. К., Волченков В. А., Рябов Г. А.** ЭВМ-программа для расчета пучков первичных и вторичных частиц методом Монте-Карло (МЕЗОН). Препринт ЛИЯФ 205. Л., 1975. 44 с.
7. **Абросимов Н. К., Волченков В. А., Рябов Г. А.** Оптимизация трактов пучков методом Монте-Карло // Тр. VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1979. Т. 2. С. 175–177.
8. **Абросимов Н. К., Волченков В. А., Гордеев В. А., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Коптев В. П., Круглов С. П., Микиртычьянц С. М., Рябов Г. А., Щербаков Г. В.** Пучок низкоэнергетичных μ^+ -мезонов с высокой плотностью остановок. Препринт ЛИЯФ 622. Л., 1980. 36 с.
9. **Абросимов Н. К.** Новый медицинский протонный тракт синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР // Физика и техника ускорителей заряженных частиц: материалы школы ЛИЯФ: сб. Л., 1982. С. 34–43.

10. **Абросимов Н. К.**, Карлин Д. Л., Коннов Б. А., Низковолос Б. В., Воробьев А. А., Куликов А. В., Рябов Г. А. Состояние и перспективы развития медицинского протонного тракта на синхроциклотроне в Гатчине // Медицинская радиология. 1983. № 3. С. 28–32.
11. **Абросимов Н. К.**, Волченков В. А., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Куликов А. В., Рябов Г. А., Виноградов Б. В., Герцеништейн В. Я., Карлин Д. Л., Коннов Б. А., Низковолос Б. В. Новый медицинский протонный тракт синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР // Тр. VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1983. Т. 2. С. 94–98.
12. **Абросимов Н. К.**, Васильев А. М., Виноградов Б. В., Заргарова О. П., Иванов Е. М., Карлин Д. Л., Кащук А. П., Коннов Б. А., Кузьмин В. Н., Куликов А. В., Лазарев В. М., Лебедева Н. А., Малов Ю. А., Мельников Л. А., Михеев Г. Ф., Мягков В. П., Низковолос В. Б., Рябов Г. А., Сеничев И. Я., Ткач И. И., Ялыныч Н. Н. Использование протонного пучка синхроциклотрона ЛИЯФ в стереотаксической нейрохирургической практике // Основные результаты экспериментов, выполненных в 1982 году на синхроциклотроне ЛИЯФ, а также экспериментов, выполненных на других ускорителях и установках с участием сотрудников Лаборатории физики высоких энергий. Оперативно-информационные материалы: сб. Л., 1984. С. 16–17.
13. **Абросимов Н. К.**, Воробьев А. А., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А., Жербин Е. А., Карлин Д. Л., Коннов Б. А., Мельников Л. А. Современное состояние медицинского протонного тракта синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР // Материалы V Всесоюзного совещания по применению ускорителей в народном хозяйстве. М., 1985. С. 155–156.
14. **Абросимов Н. К.**, Воробьев А. А., Жербин Е. А., Коннов Б. А. Протонная терапия на синхроциклотроне в Гатчине // Вестник АН СССР. 1985. № 5. С. 84–91.
15. **Абросимов Н. К.**, Воробьев А. А., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А., Жербин Е. А., Карлин Д. Л., Коннов Б. А., Мельников Л. А. Современное состояние медицинского протонного тракта синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР // Вопросы атомной науки и техники. 1987. Вып. 23. С. 61–66. (Электрофизическая аппаратура).
16. **Абросимов Н. К.**, Воробьев А. А., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А., Жербин Е. А., Жидков М. В., Карлин Д. Л., Коннов Б. А., Кузьмин В. Н., Низковолос И. Б., Сеничев И. Я., Мельников Л. А., Виноградов Б. В. Клинические и физико-технические исследования на синхроциклотроне Ленинградского института ядерной физики АН СССР // Медицинская радиология. 1987. № 8. С. 10–16.
17. **Абросимов Н. К.**, Александров А. А., Волченков В. А., Елисеев В. А., Зеличенко И. Б., Иванов Е. М., Миронов Ю. Т., Перский М. С., Решетников Д. В., Рябов Г. А., Сандлер Б. З. Вывод постоянно действующего пучка для протонной терапии на синхроциклотроне ЛИЯФ // Тр. X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1987. Т. 2. С. 174–180.

18. **Абросимов Н. К.**, Александров А. А., Борухович Г. З., Волченков В. А., Елисеев В. А., Зеличенко И. Б., Иванов Е. М., Карлин Д. Л., Мионов Ю. Т., Перский М. С., Решетников Д. В., Рябов Г. А. Разработка двухкабинного медицинского комплекса для протонной терапии // Медицинская радиология. 1987. № 8. С. 26–29.
19. **Абросимов Н. К.**, Воробьев А. А., Иванов Е. М., Кащук А. П., Лазарев В. И., Малов Ю. А., **Мухеев Г. Ф.**, Неустроев П. В., Прокофьев О. Е., Рябов Г. А., Ткач И. И. и др. *соп.* ЦНИРРИ. Использование протонного пучка синхроциклотрона ЛИЯФ в стереотаксической нейрохирургической практике // Основные результаты научных исследований 1981–1985 гг.: сб. ЛИЯФ. Л., 1986. С. 100–101.
20. **Abrossimov N. K.**, *Ivanov E. M., Riabov G. A., Eliseev V. A., Karlin D. L., Konnov B. A., Melnikov L. A.* Medical Beams on the 1 GeV Synchrocyclotrons at Gatchina // 25-th European Cyclotron Progress Meeting. September 21–24, 1988. Uupsala, Sweden. P. 23–25.
21. **Абросимов Н. К.**, Воробьев А. А., Волченков В. А., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Лазарев В. И., Малов Ю. А., **Мухеев Г. Ф.**, Прокофьев О. Е., Рябов Г. А. Медицинский протонный комплекс на синхроциклотроне ЛИЯФ // Методические и прикладные работы ЛИЯФ: сб. Л., 1988. С. 250–252.
22. **Абросимов Н. К.**, Александров А. А., Волченков В. А., Елисеев В. А., Зеличенко И. Б., Иванов Е. М., Мионов Ю. Т., Перский М. С., Решетников Д. В., Рябов Г. А., Сандлер Б. З. Вывод второго пучка для протонной терапии на синхроциклотроне ЛИЯФ // Тез. докл. VI Всесоюзного совещания по применению ускорителей в народном хозяйстве. М., 1988. С. 5.
23. **Abrossimov N. K.**, *Artamonov S. A., Bogdanov P. V., Volchenkov V. A., Vorobiev A. A., Dmitriev S. P., Eliseev V. A., Ershov B. D., Kuligin V. S., Ivanov E. M., Mironov Yu. T., Mikheev G. F., Mudrolybov V. G., Pokrovskii A. S., Riabov G. A., Smolin V. A., Sokolov G. L., Stogov Yu. I., Strokach A. P., Fominenko V. P., Chervyakov P. V.* Gatchina Isochronous Cyclotron // Proc. of the XXIII Int. Conf. on Cyclotron and Their Applications. July 6–10, 1992. Vancouver, Canada. P. 58–62.
24. **Abrossimov N. K.**, *Riabov G. A.* Construction of Gatchina Isochronous Cyclotron // PNPI XXX. Main Scientific Activities 1997–2001. High Energy Physics Division. Gatchina, 2002. P. 15–26.
25. **Абросимов Н. К.**, Борухович Г. З., Каминкер Д. М., Куликов А. В., **Мухеев Г. Ф.**, Петров Г. А., Чернов Н. Н. Гатчинский нейтронный спектрометр на базе синхроциклотрона ФТИ (ГНЕЙС) // Материалы Всесоюзного совещания по нейтронной физике: сб. Киев, 1972. Ч. 2. С. 188.
26. **Абросимов Н. К.**, Борухович Г. З., Куликов А. В., Левицкий Л. А., **Мухеев Г. Ф.**, Петров Г. А., Чернов Н. Н., Юрченко В. И. Нейтронный спектрометр по времени пролета на базе синхроциклотрона ЛИЯФ им. Б. П. Константинова АН СССР // Материалы 3-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике: сб. М., 1976. Ч. 6. С. 221–226.

27. *Abrossimov N. K., Borukhovich G. Z., Laptev A. B., Marchenkov V. V., Petrov G. A., Shcherbakov O. A., Tuboltsev Y. V., Yurchenko V. I.* Neutron Time-of-Flight Spectrometer GNEIS at the Gatchina 1 GeV Proton Synchrotron // NIM. 1985. V. A 242. P. 121–133.
28. *Абросимов Н. К., Воробьев А. С., Иванов Е. М., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А., Тверской М. Г., Щербаков О. А.* Ускорительный комплекс: испытания ЭКБ. Сообщение ПИЯФ 2806. Гатчина, 2009. 23 с.
29. *Абросимов Н. К., Воробьев А. С., Иванов Е. М., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А., Тверской М. Г., Щербаков О. А.* Ускорительный комплекс ПИЯФ: испытания ЭКБ // Петербургский журнал электроники. 2009. № 1. С. 31–43.
30. *Абросимов Н. К., Воробьев А. С., Иванов Е. М., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А., Тверской М. Г., Щербаков О. А.* Создание и экспериментальное исследование пучка нейтронов на синхроциклотроне ПИЯФ для тестирования компонентов электроники на радиационную стойкость. Сообщение ПИЯФ 2807. Гатчина, 2009. 22 с.
31. Нейтронный генератор с энергетическим спектром нейтронов, повторяющим спектр атмосферного нейтронного излучения: пат. на полезную модель № 80641 с приоритетом от 04.08.2008, выдан 10.02.2009 / **Н. К. Абросимов**, Е. М. Иванов, **Г. Ф. Михеев**, Г. А. Рябов, М. Г. Тверской, О. А. Щербаков. Бюл. № 4, 2009. С. 213.

Глава 3

Основные сведения из теории резонансных циклических ускорителей с постоянным магнитным полем

3.1. Виды циклических ускорителей

Классический циклотрон

Одним из первых резонансных циклических ускорителей, с которого начинается история циклических ускорителей, является классический циклотрон, построенный Э. Лоуренсом в Берклиевской лаборатории Калифорнийского университета в 1932 году. Несмотря на большой срок, который прошел с момента изобретения циклотрона, в настоящее время классический циклотрон не утратил своего значения как для научных исследований в области ядерной физики низких энергий, так и для прикладных работ и производства изотопов.

Схема классического циклотрона представлена на рис. 3.1. Основу ускорителя составляет электромагнит Ш-образной конструкции, в зазоре которого установлена вакуумная камера. Внутри камеры помещены 2 дуанта, на которые от внешнего ВЧ-генератора подается ускоряющее напряжение с амплитудой V_0 и частотой $\omega_{\text{ген}}$. В центре камеры находится ионный источник, который дает пучок протонов или тяжелых ионов. Типичная конструкция циклотрона приведена на рис. 3.2а, б¹.

¹ Лебедев А. Н., Шальнов А. В. Основы физики и техники ускорителей. М., 1991. С. 204.

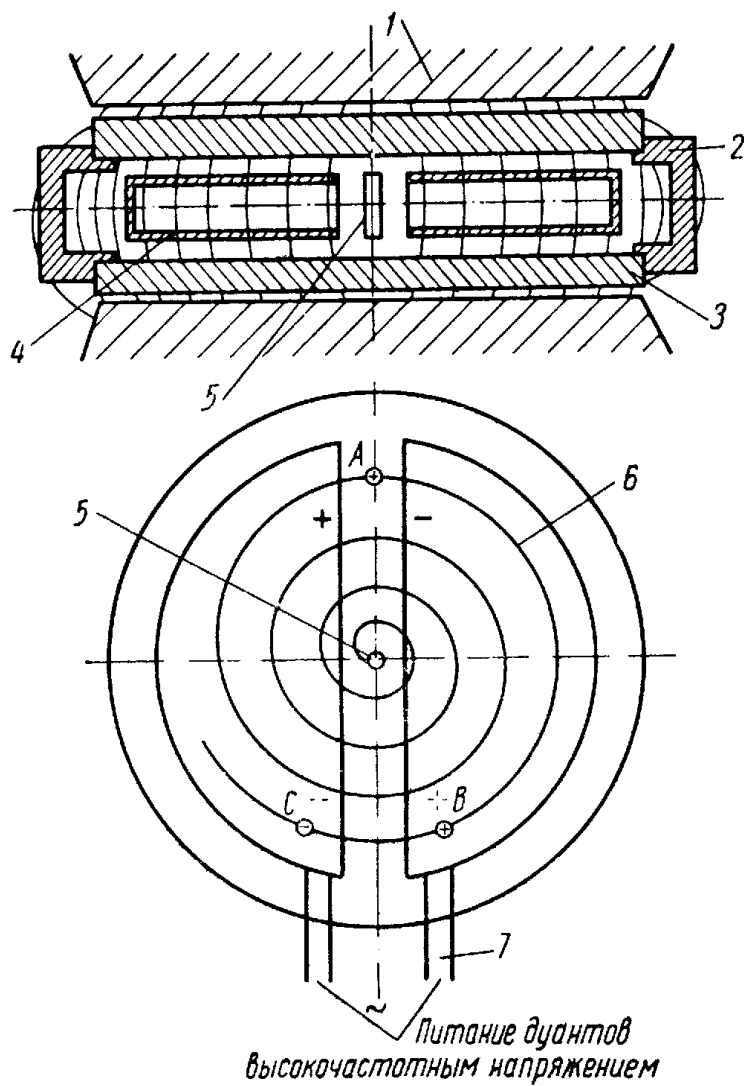
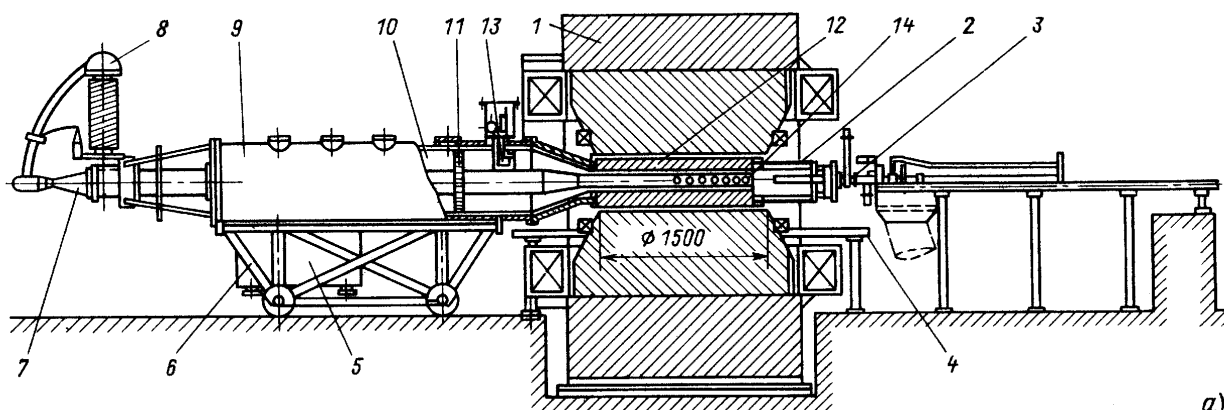
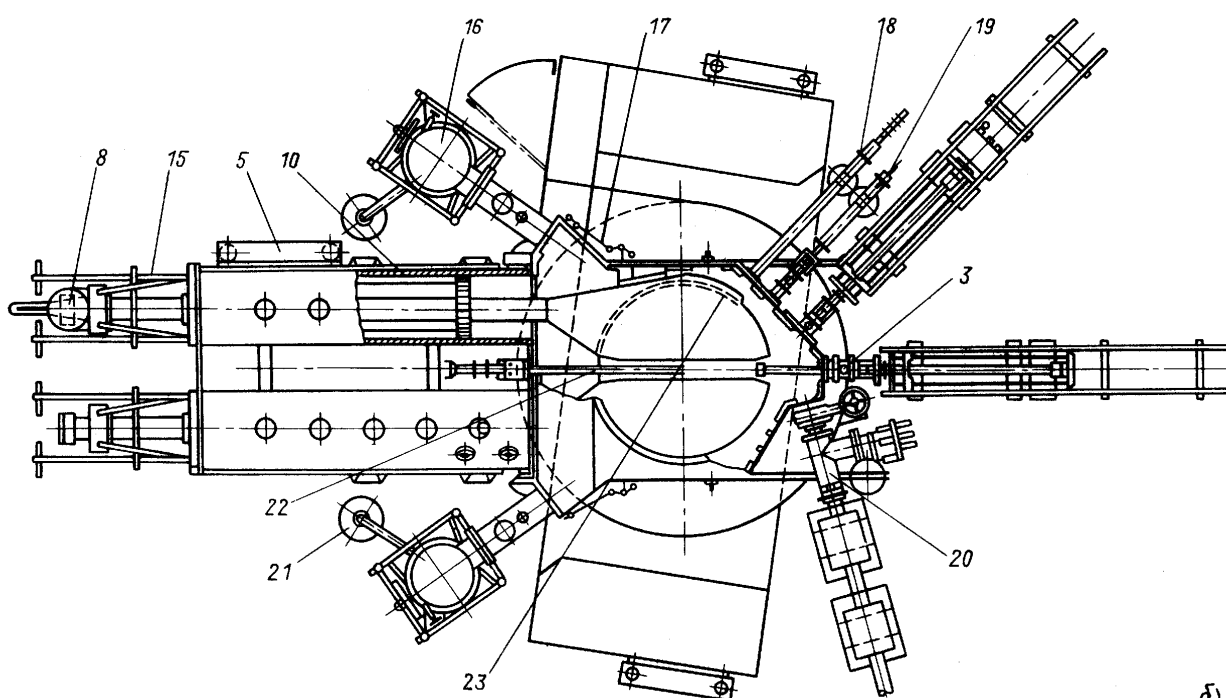


Рис. 3.1. Конструктивная схема циклотрона.

1 – полюс магнита; 2 – боковая стенка камеры; 3 – крышка камеры;
 4 – дуанты; 5 – источник ионов; 6 – траектория движения частиц;
 7 – штоки дуантов



а)



б)

Рис. 3.2. Конструкция циклотрона:

а) вид сбоку; б) вид сверху. 1 – ярмо электромагнита; 2 – вакуумная камера; 3 – мишени; 4 – рельсы для откатки деталей камеры вправо; 5 – коробка зажимов; 6 – тележка для монтажа баков резонансных линий и отката их вместе с дуантами влево при разборке камеры; 7 – выводной изолятор держателя дуантов; 8 – барабан для намотки изоляционной трубки для подвода водяного охлаждения; 9 – баки резонансных линий; 10 – стержень для перемещения закорачивающей пластины; 11 – закорачивающая пластина; 12 – крышка камеры; 13 – виток связи; 14 – дуант; 15 – система регулирования положения закорачивающей пластины; 16 – вакуумный насос; 17, 18 – триммерные устройства и др. элементы камеры; 19 – пробники; 20 – патрубок для вывода пучка; 21 – форвакуумный насос; 22 – источник ионов; 23 – отклоняющая пластина для вывода пучка

Ускоряемые частицы двигаются в средней плоскости зазора электромагнита перпендикулярно магнитным силовым линиям по траекториям, близким к раскручивающейся спирали, и два раза за один оборот пересекают ускоряющий промежуток между дуантами, где сосредоточено ВЧ электрическое поле дуантов. Если бы удалось подобрать частоту ускоряющего напряжения, равную (или кратную) частоте обращения частицы в магнитном поле, то частица на каждом обороте пересекала бы ускоряющий промежуток при одной и той же фазе электрического поля φ и могла бы быть ускорена практически до любой энергии. Необходимое для обеспечения работы циклотрона резонансное условие записывается в виде

$$\omega_{\text{ген.}} = k \omega_{\text{обр.}} \text{ или } T_{\text{обр.}} = k T_{\text{ген.}},$$

где $\omega_{\text{обр.}}$, $T_{\text{обр.}}$ – частота и период обращения ускоряемой частицы; k – целое число, называемое кратностью ускорения.

В нерелятивистском случае частота обращения частицы в магнитном поле B не зависит от энергии частицы

$$\omega_{\text{обр.}} = \frac{eB}{m_0 c} = \frac{e c B}{E_0},$$

где e – заряд ускоряемой частицы; m_0 , E_0 – масса и энергия покоя частицы; c – скорость света. Записанное выше резонансное условие выполняется для частиц любой энергии.

Выйдя из ионного источника, который помещен в середине ускоряющего промежутка в центре ускорителя, ускоряемая частица подхватывается электрическим полем дуанта и, пройдя ускоряющий промежуток, входит внутрь дуанта, где электрического поля нет. Совершив под действием магнитного поля полуоборот внутри дуанта, ускоряемая частица подойдет к выходной щели между дуантами. В этот момент электрическое поле между дуантами должно быть направлено вдоль направления движения частицы. Тогда частица будет ускорена и получит приращение энергии $e V_0 \cos \varphi$, где φ – фаза пролета частицей середины ускоряющего промежутка. Совершив под действием магнитного поля еще пол-оборота, частица снова подойдет к ускоряющему промежутку и, если за это время фаза электрического поля изменится на 180° , получит то же самое приращение энергии и продолжит двигаться дальше.

Таким образом, если бы частота обращения частицы не зависела от энергии, ускорение частиц могло бы продолжаться сколь угодно долго. Однако из-за релятивистского возрастания массы ускоряемой частицы по мере увеличения ее энергии W частота обращения частицы уменьшается:

$$\omega_{\text{обр.}} = \frac{ecB}{(E_0 + W)} = \frac{\omega_0}{1 + \frac{W}{E_0}},$$

где $\omega_0 = \frac{ecB}{E_0}$ (магнитное поле для простоты считаем постоянным).

Уменьшение частоты обращения частицы с ростом энергии и, следовательно, увеличение периода обращения $T_{\text{обр.}}$ приведет к тому, что при каждом пересечении частицей ускоряющего промежутка фаза ее будет смещаться вправо и после определенного числа оборотов частица войдет в область фаз электрического поля, где $\cos \varphi < 0$, и, вместо того чтобы ускоряться, начнет замедляться. Дальнейшее ускорение частицы станет уже невозможным. Таким образом, уменьшение частоты ускоряемой частицы за счет релятивистского возрастания ее массы с ростом энергии приводит к тому, что резонансное условие, обеспечивающее работу циклотрона, не может быть выполнено при всех энергиях ускоряемых частиц. Это, в свою очередь, накладывает ограничение на максимальную энергию частиц, до которой они могут быть ускорены в циклотроне.

Фазовое движение в циклотроне

Рассмотрим более подробно изменение фазы ускоряемой частицы в процессе ускорения (рис. 3.3).

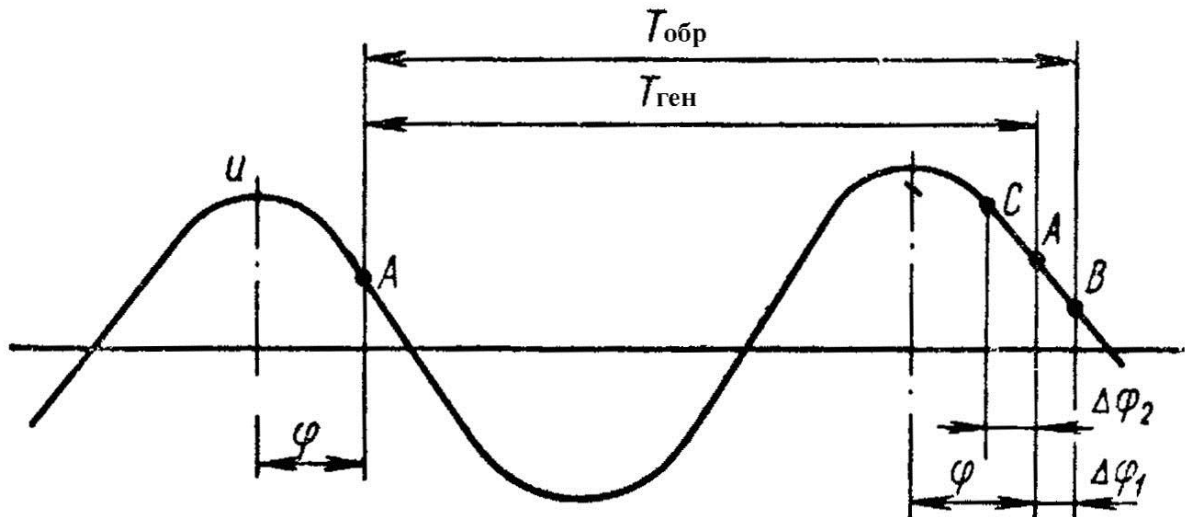


Рис. 3.3. Кривая напряжения между дуантами в зависимости от времени

Изменение фазы ускоряемой частицы за один оборот может быть записано в виде

$$\Delta\varphi = (T_{\text{обр.}} - T_{\text{ген.}}) \omega_{\text{ген.}} = 2\pi \frac{W}{E_0}.$$

Изменение энергии частицы за один оборот

$$\Delta W = 2e V_0 \cos \varphi.$$

Отсюда следует

$$\frac{dW}{d\varphi} = \frac{\Delta W}{\Delta\varphi} = \frac{e V_0 E_0 \cos \varphi}{\pi \omega}.$$

Решая полученное дифференциальное уравнение при начальных условиях $\omega = 0$, $\varphi = \varphi_{\text{нач.}}$, находим

$$\frac{W^2}{2} = \frac{e V_0 E_0}{\pi} (\sin \varphi - \sin \varphi_{\text{нач.}}).$$

Полагая $\varphi_{\text{нач.}} = -\frac{\pi}{2}$ и $\varphi_{\text{кон.}} = \frac{\pi}{2}$, получим выражение для предельной энергии частиц, ускоряемых в циклотроне,

$$W_{\text{пред.}} = 2 \sqrt{\frac{e V_0 E_0}{\pi}}.$$

Обычно амплитуда ВЧ-напряжения между дуантами составляет величину около 100 кВ. Замечая, что для протона $E_0 = 938$ МэВ, получим $W_{\text{пред.}} = 5,5$ МэВ (рис. 3.4а, б).

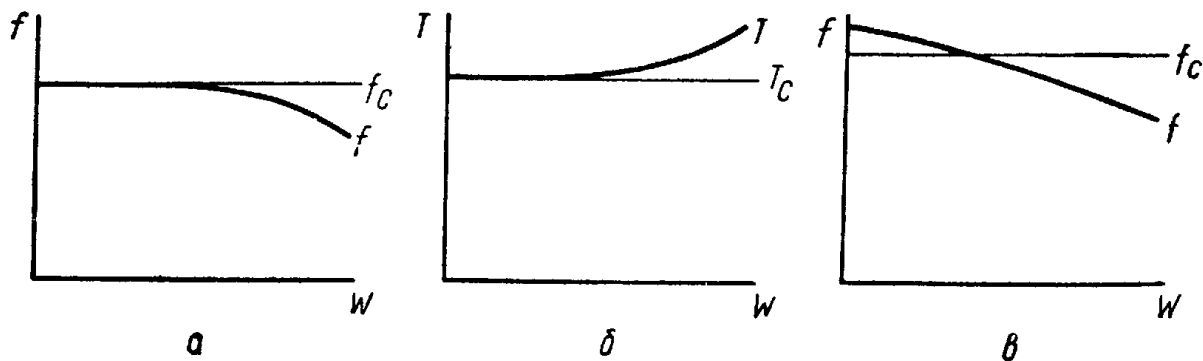


Рис. 3.4. Зависимости частоты вращения частицы, а также периода вращения от энергии для двух случаев настройки циклотрона:

- а) зависимость частоты f от энергии W , f_c – частота генератора дуанта;
- б) зависимость периода T от энергии W , T_c – период генератора дуанта;
- в) зависимость частоты f от энергии W при настройке циклотрона для увеличения его энергии, f_c – частота генератора дуанта

Для повышения предельной энергии частиц, ускоряемых в циклотроне, используют следующий прием. Выбирают частоту генератора так, чтобы она была несколько больше частоты обращения частиц при энергии $W = 0$ (рис. 3.4в). Тогда для частиц, вышедших из ионного источника при фазе электрического поля $\varphi = \frac{\pi}{2}$, фаза в процессе ускорения будет

смещаться влево. Надо так подобрать частоту генератора, чтобы при фазе $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ частица уже набрала бы такую энергию, чтобы ее частота обращения стала равной частоте генератора, при этом движение фазы частицы влево сменится на движение вправо. Когда фаза частицы станет равной $\varphi = \frac{\pi}{2}$, дальнейшее ускорение прекратится, и ускоренные частицы должны быть использованы. За счет этого предельная энергия частиц, ускоряемых в циклотроне, может быть увеличена вдвое по сравнению с величиной предельной энергии (рис. 3.5).

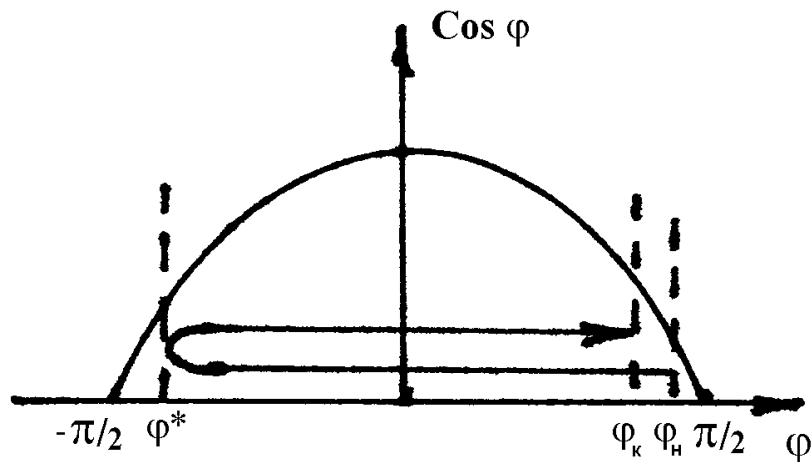


Рис. 3.5. Движение фазы ускоряемой частицы в циклотроне

Действительно,

$$T_{\text{обр.}} = \frac{2\pi(E_0 + W)}{ecW}; \quad T_{\text{ген.}} = \frac{2\pi(E_0 + W^*)}{ecB}; \quad (T_{\text{обр.}} - T_{\text{ген.}})\omega_{\text{ген.}} = 2\pi \left(\frac{E_0 + W}{E_0 + W^*} - 1 \right);$$

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{W - W^*}{E_0}; \quad \frac{dW}{d\varphi} = \frac{eV_0 E_0}{\pi} \frac{\cos \varphi}{(W - W^*)};$$

$$\frac{W^2}{2} - WW^* \Big|_0^W = \frac{eV_0 E_0}{\pi} (\sin \varphi - \sin \varphi_H);$$

$$(W^*)^2 = \frac{2eV_0 E_0}{\pi} (\sin \varphi_H - \sin \varphi^*); \quad (W^*)_{\text{max}} = \sqrt{\frac{4eV_0 E_0}{\pi}};$$

$$(W - W^*)^2 = (W^*)^2 + \frac{2eV_0 E_0}{\pi} (\sin \varphi - \sin \varphi_H) = \frac{2eV_0 E_0}{\pi} (\sin \varphi - \sin \varphi^*);$$

$$(W - W^*)_{\text{max}} = \sqrt{\frac{4eV_0 E_0}{\pi}}; \quad W = W^* \pm \sqrt{\frac{2eV_0 E_0}{\pi} (\sin \varphi - \sin \varphi^*)};$$

$$W_{\text{max}} = 4\sqrt{\frac{eV_0 E_0}{\pi}} = 2W_{\text{пред.}}$$

Несколько слов о первой научно-технической публикации Николая Константиновича. Представьте себе ситуацию: молодой специалист приходит на работу в прославленный Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, в известную всему миру лабораторию профессора Д. Г. Алхазова, где был создан один из первых в СССР циклотронов, и сразу публикует статью в ведущем журнале СССР – «Журнале технической физики» – под заглавием «К вопросу о циклотроне с изогнутой ускоряющей целью» (ЖТФ. 1959. Т. 29, № 6. С. 726–728). В статье Николай Константинович оспаривает и опровергает новый принцип (способ) увеличения достижимой в циклотроне энергии, предложенный иностранным автором. Этот факт говорит о многом. О потенциале и самостоятельности Николая Константиновича, о доверии руководства и редакции журнала к научным идеям молодого специалиста.

Поперечная устойчивость пучков, ускоряемых в циклотроне

До сих пор мы считали магнитное поле циклотрона постоянным и полагали, что оно выполняет только одну функцию – поворот ускоряемых частиц на 360° , с тем чтобы обеспечить многократное прохождение частиц через ускоряющую систему циклотрона. Однако у магнитного поля есть еще одна функция – обеспечивать поперечную устойчивость пучка при его движении по спиральной орбите от центра ускорителя до выводного радиуса. Для этого магнитное поле в циклотроне делается не постоянным, а медленно уменьшающимся с увеличением радиуса орбиты. Нетрудно убедиться (см. рис. 3.6), что при этом выше и ниже средней плоскости зазора магнита возникает радиальная составляющая магнитного поля, которая вызывает силу, отклоняющую частицу к средней плоскости зазора.

Если вместо спадающего по радиусу магнитного поля сделать магнитное поле, увеличивающееся с радиусом, то в этом случае возникает радиальная составляющая поля, которая вызывает силу, отклоняющую частицу от средней плоскости зазора. Таким образом, в первом случае мы имеем вертикальную фокусировку пучка, во втором случае – вертикальную дефокусировку.

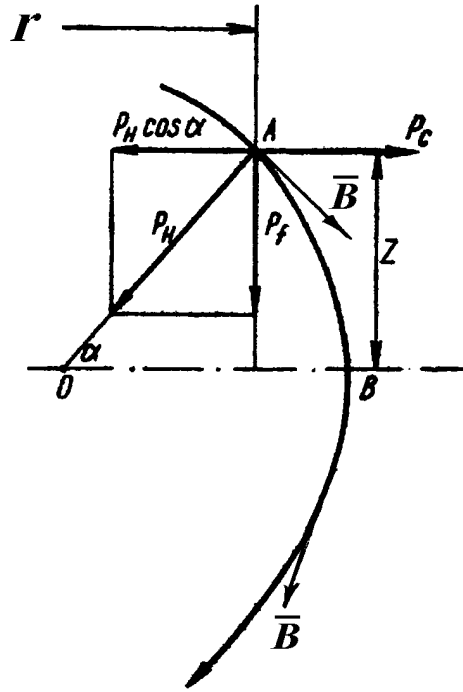


Рис. 3.6. Векторная диаграмма сил, выясняющая природу вертикальной фокусировки частиц. \bar{B} – вектор магнитного поля; P_C – центробежная сила, действующая на ускоряемую частицу; P_H – сила Лоренца; $P_f = P_H / Rz$ – фокусирующая сила

Для описания движения частиц в магнитном поле циклотрона выберем цилиндрическую систему координат с центром, расположенным в центре ускорителя, и выберем в качестве осевой траектории для частицы

с импульсом p_0 окружность $r = r_0 = \frac{p_0 c}{eB_{z_0}}$ и $z = 0$. Будем считать распре-

деление магнитного поля аксиально-симметричным, т. е. не зависящим от азимутального угла θ . Кроме того, будем считать, что магнитное поле обладает медианной плоскостью $z = 0$, где радиальная составляющая поля $B_r = 0$. Тогда, считая x и z малыми по сравнению с r_0 , можно получить линеаризованные уравнения траекторий движения частицы:

$$x'' + (1 - n)x = 0; \quad z'' + nz = 0,$$

где $n(r_0) = -\frac{r_0}{B_0} \frac{\partial B_z}{\partial r} \Big|_{z=0}$ и называется показателем спада магнитного поля.

Эти уравнения носят название уравнений бетатронных колебаний и описывают движение ускоряемых частиц относительно осевой траектории $r_0 = \text{const}$. Их решения устойчивы при $1 - n > 0$ и $n > 0$ и в этом случае при начальных условиях $x = x_0$, $x' = x'_0$, $z = z_0$ и $z' = z'_0$ записываются в виде

$$x = x_0 \cos(\omega_r \theta) + \frac{x'_0}{\omega_r} \sin(\omega_r \theta); \quad z = z_0 \cos(\omega_z \theta) + \frac{z'_0}{\omega_z} \sin(\omega_z \theta),$$

где ω_r и ω_z – частоты радиальных и вертикальных бетатронных колебаний частицы

$$\omega_r = \sqrt{1-n}; \quad \omega_z = \sqrt{n}.$$

При $n > 1$ радиальное движение, а при $n < 0$ вертикальное движение оказываются неустойчивыми. Случай $n < 0$ соответствует возрастающему по радиусу магнитному полю, а случай $n > 1$ – магнитному полю, которое убывает по радиусу быстрее, чем $1/r$. Таким образом, критерий устойчивости поперечного движения в циклотроне записывается в виде

$$0 < n < 1.$$

Обычно величина n изменяется с радиусом от нуля в центре ускорителя до величины порядка 0,1 на конечном радиусе. На рис. 3.7 приведена схема радиальных и вертикальных фокусирующих и дефокусирующих сил при различных значениях n^1 .

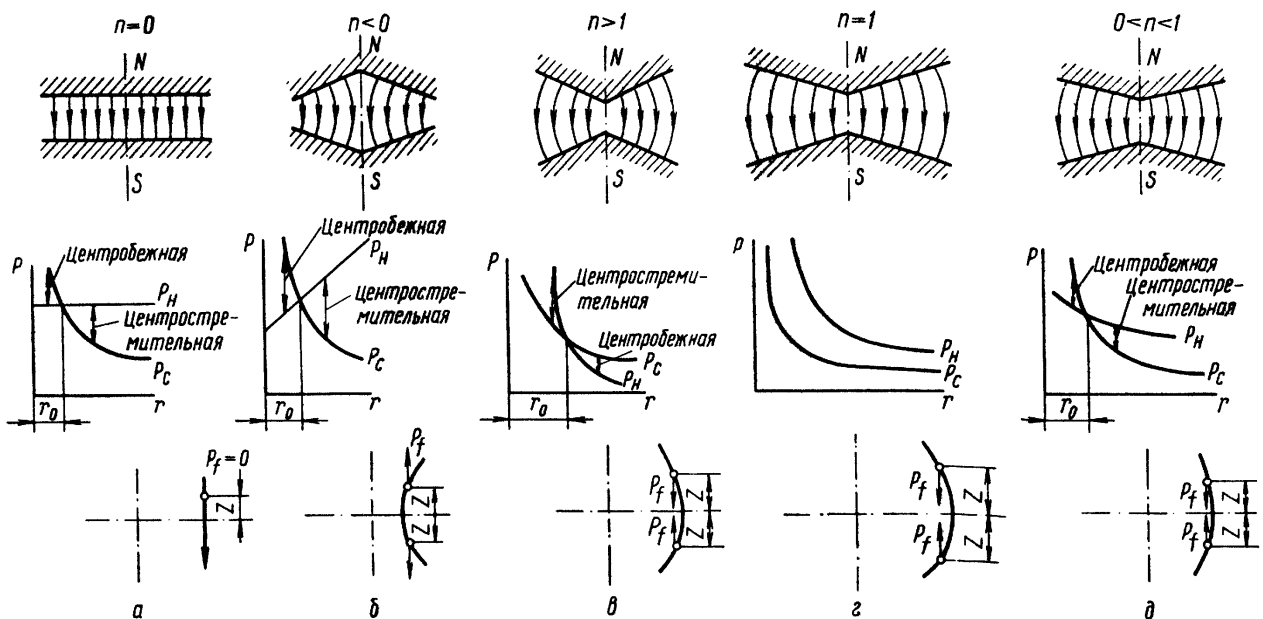


Рис. 3.7. Схема радиальных и вертикальных фокусирующих и дефокусирующих сил при различных значениях n

На рис. 3.8 приведено распределение величины магнитной индукции $\langle B \rangle$ и коэффициента спада n в зависимости от радиуса, а на рис. 3.9 – геометрия и профиль шиммов на полюсе электромагнита синхроциклотрона ПИЯФ.

¹ Комар Е. Г. Ускорители заряженных частиц. М., 1964. С. 153.

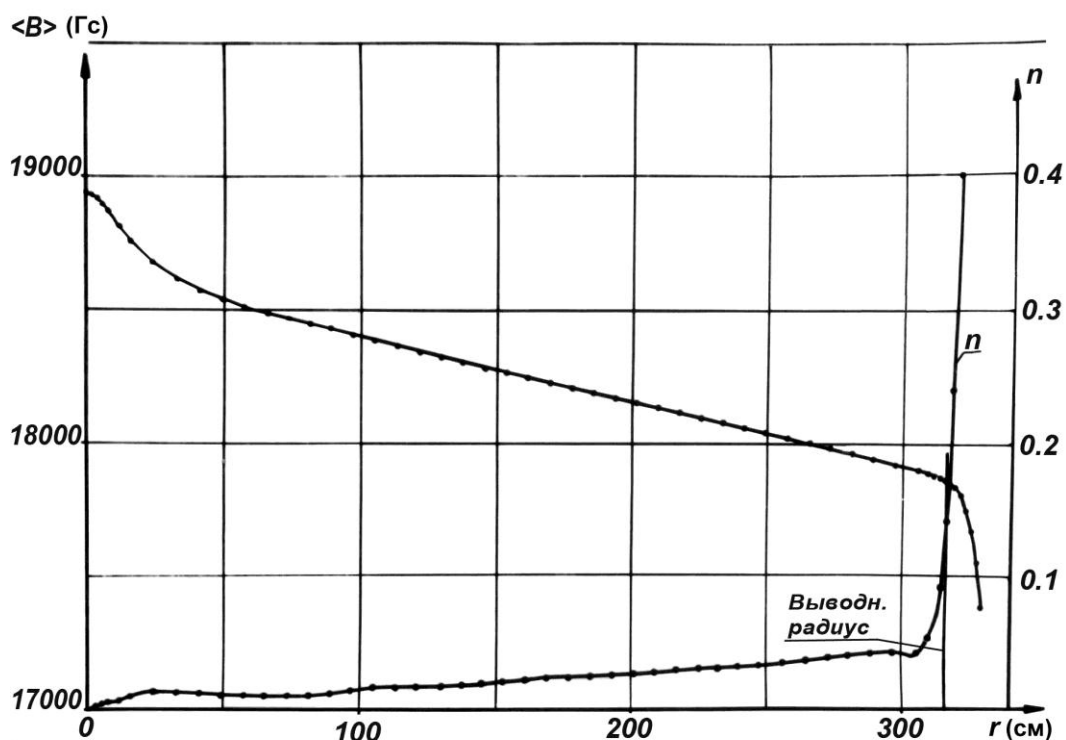


Рис. 3.8. Усредненная по азимуту величина индукции магнитного поля $\langle B \rangle$ и величина показателя спада n в зависимости от радиуса

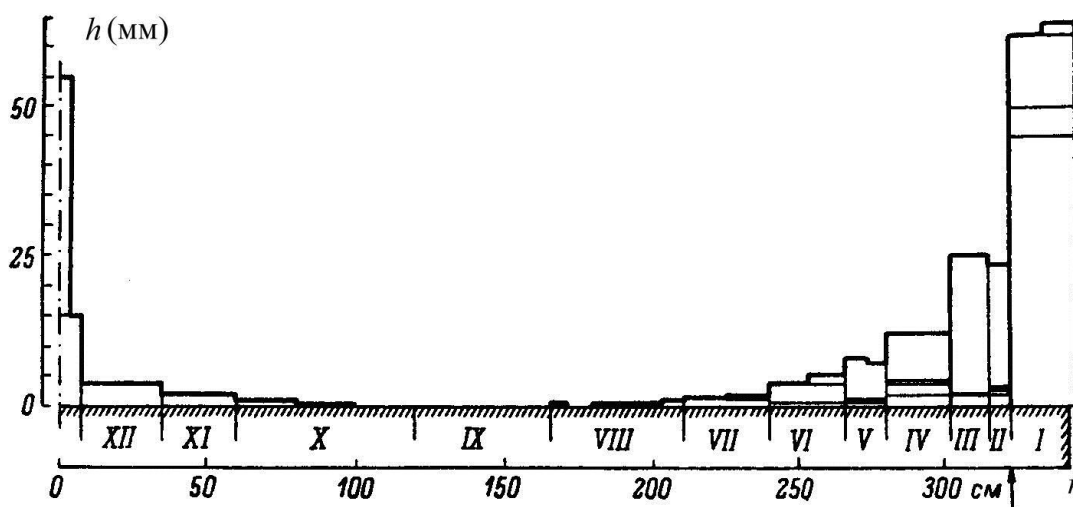


Рис. 3.9. Профиль шиммов полюса магнита:
 h – высота шимма; r – радиус шимма

Пути усовершенствования классического циклотрона.

Изохронный циклотрон

Релятивистское возрастание массы частицы в процессе ускорения приводит к уменьшению частоты ее обращения в магнитном поле циклотрона, что, в свою очередь, приводит к нарушению резонансного условия, необходимого для обеспечения синхронного (с постоянной фазой) режима ускорения. Положение усугубляется еще и тем обстоятельством,

что для обеспечения вертикальной устойчивости ускоряемого пучка магнитное поле в классическом циклотроне делается убывающим по радиусу. Это также приводит к уменьшению частоты обращения ускоряемой частицы с увеличением радиуса ее обращения в магнитном поле. Таким образом, оба эффекта: и увеличение массы частицы, и уменьшение с радиусом величины индукции магнитного поля – действуют в одном направлении, вызывая нарушение резонансного условия, что приводит к непрерывному смещению фазы ускоряемой частицы в область, где ускорение частицы сменяется ее замедлением, и тем самым к ограничению предельной энергии частиц, ускоряемых в циклотроне.

Указанный недостаток классического циклотрона может быть преодолен двумя путями: либо за счет возрастания с радиусом величины индукции магнитного поля, либо за счет уменьшения во времени частоты ускоряющего напряжения синхронно с уменьшением частоты обращения ускоряемой частицы.

Первая возможность сохранения резонансного условия при всех энергиях ускоряемых частиц осуществляется в так называемом изохронном циклотроне, в котором магнитное поле увеличивается по радиусу так, что во время ускорения выполняется условие

$$\frac{B(r)}{E_0 + W} = \text{const.}$$

Отсюда, учитывая соотношение $erB(r) = \sqrt{E^2 - E_0^2}$, получаем

$$B(r) = \frac{B_0}{\sqrt{1 - \frac{(eB_0r)^2}{E_0^2}}}.$$

При таком выборе распределения магнитного поля частота обращения частиц в магнитном поле делается независимой от энергии частиц и резонансное условие, обеспечивающее синхронный режим ускорения, выполняется для частиц любой энергии. Однако при использовании возрастающего по радиусу магнитного поля исчезает вертикальная устойчивость пучка, и ускорение становится невозможным. Выход состоит в отказе от аксиально-симметричного магнитного поля, которое применяется в классических циклотронах, и переходе к аксиально-несимметричным магнитным полям. Оказывается, что, используя магнитные поля, компоненты которых изменяются определенным образом с изменением азимутального угла θ , можно одновременно обеспечить и постоянство частоты обращения частицы независимо от энергии, и поперечную устойчивость пучка. Один из возможных вариантов создания изохронного циклотрона показан на рис. 3.10. На полюса магнита обычного циклотрона устанавли-

ливаются специальные секторные накладки, в результате магнитное поле в тех областях, где имеются накладки, увеличивается, а в тех областях, где этих накладок нет, уменьшается. Первые области, где поле больше, носят название *холмов*, а вторые области, где поле меньше, называют *долинами*. В *холмах* ускоряемые частицы движутся по траекториям с большей кривизной, чем в *долинах*. За счет соответствующего выбора формы накладок можно сделать так, чтобы при увеличении энергии частиц и, следовательно, радиуса их обращения в магнитном поле доля длины траектории, приходящейся на *холмы*, где поле больше, увеличивалась. При этом по мере роста энергии частиц будет расти и среднее по орбите магнитное поле. Форма накладок должна быть подобрана так, чтобы выполнялось условие

$$\frac{\langle B(r) \rangle}{E_0 + W(r)} = \text{const},$$

где $\langle B(r) \rangle$ – усредненное по θ магнитное поле на радиусе r . Распределение магнитного поля, удовлетворяющее этому условию, называют *изохронным*.

Поперечная устойчивость ускоряемого пучка обеспечивается за счет изгиба накладок в азимутальном направлении, с тем чтобы увеличить угол γ , под которым частицы пересекают границы между *холмами* и *долинами* (рис. 3.10). Выбирая соответствующим образом параметры, определяющие форму спиральных накладок, можно добиться одновременной устойчивости как вертикального, так и радиального движения частиц. Именно такую форму магнитного поля имеет *изохронный* циклотрон Ц-80, сооружаемый в ПИЯФ [1].

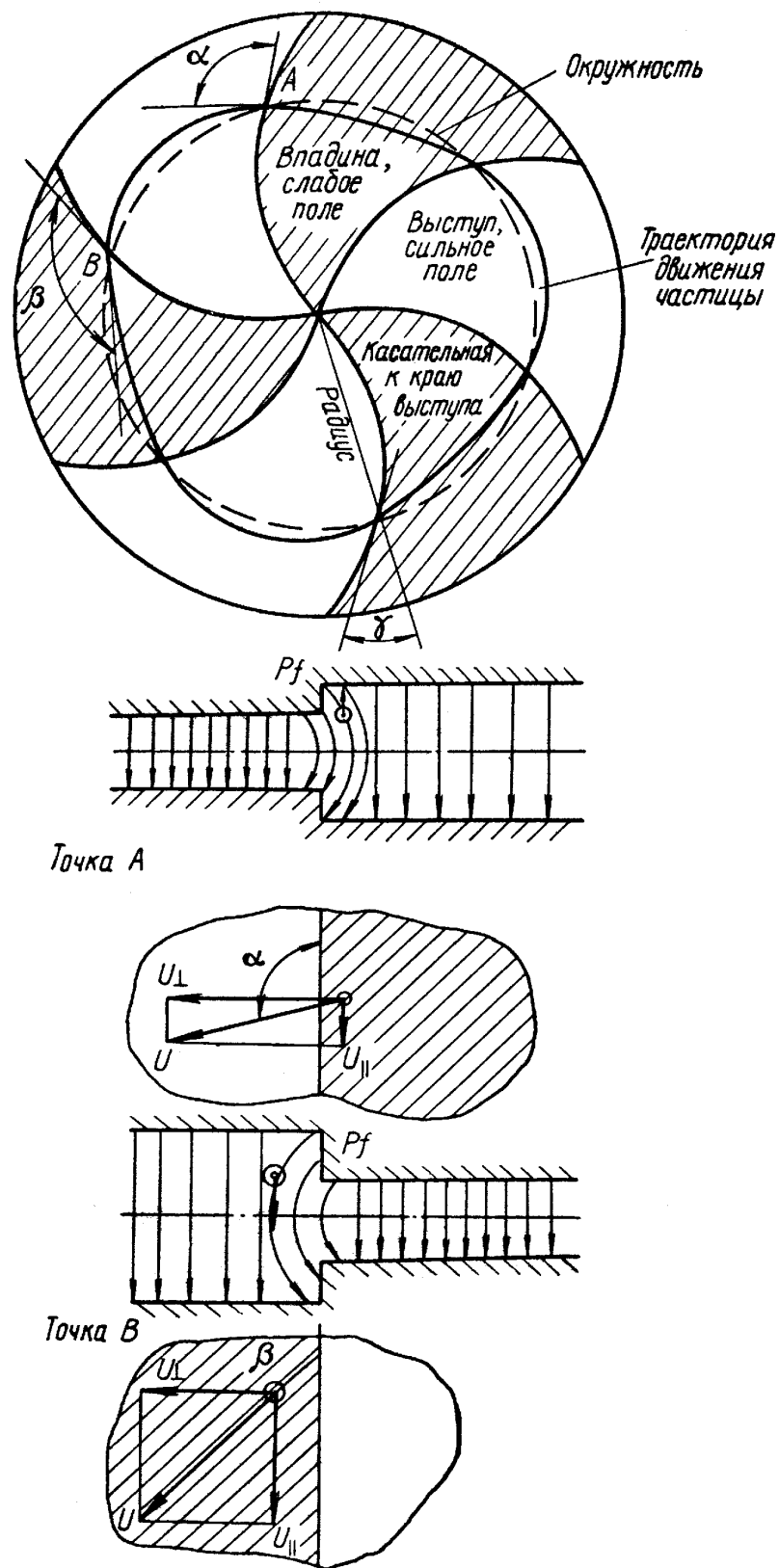


Рис. 3.10. Пояснение механизма вертикальной фокусировки при сложных секторных накладках с криволинейными ребрами

Синхроциклотрон (фазотрон)

Как было отмечено выше, для сохранения синхронизма движения частицы с ростом ее энергии и уменьшением частоты ее обращения в постоянном магнитном поле необходимо уменьшать и частоту ускоряющего напряжения. Такая возможность осуществляется в синхроциклотроне (синхронном циклотроне, фазотроне), в котором вводится модуляция частоты ускоряющего напряжения, подаваемого на дуанты. При этом из класса ускорителей непрерывного действия, к которым относится классический циклотрон, мы переходим в класс импульсных ускорителей.

Принцип работы синхроциклотрона заключается в следующем. В начальный момент времени t_1 (рис. 3.11), когда частота ускоряющего напряжения на дуанте становится равной частоте обращения частиц f_1 с равной нулю кинетической энергией вблизи центра ускорителя, из ионного источника выходит порция частиц, для которых выполняется резонансное условие, и эта порция частиц начинает ускоряться. По мере увеличения энергии частиц частота ускоряющего напряжения уменьшается так, что все время для этой порции частиц выполняется резонансное условие. Для следующей порции частиц, вышедших из ионного источника, резонансное условие уже не выполняется, и эти частицы не захватываются в режим синхронного ускорения и погибают, рассеиваясь на остаточном газе внутри вакуумной камеры. Когда первая порция частиц ускорится до конечной энергии и достигнет конечного радиуса, а частота ее обращения станет f_2 , она должна быть использована либо путем бомбардировки внутренней мишени, установленной внутри ускорительной камеры, либо после вывода ее за пределы ускорительной камеры для бомбардировки внешней мишени.

После окончания ускорения первой порции частиц частота ускоряющего напряжения возвращается к исходному значению f_1 , и из ионного источника захватывается очередная порция частиц, после чего процесс повторяется. Таким образом, ускоренный пучок выходит из ускорительной камеры в виде отдельных импульсов, следующих друг за другом через интервал времени T с частотой, равной частоте модуляции ускоряющего напряжения.

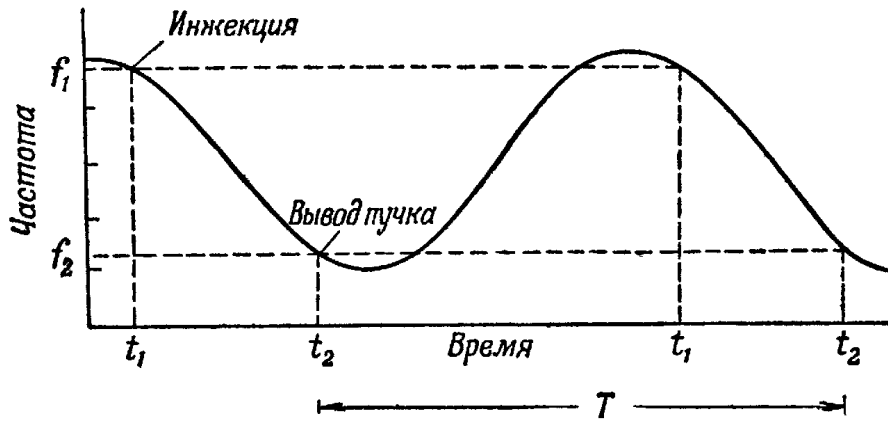


Рис. 3.11. Модуляция частоты ВЧ-системы с помощью вращающегося конденсатора в пределах от начальной частоты f_1 до конечной частоты f_2 . (Частицы ускоряются в течение промежутка времени t_1-t_2 , что приводит к выводу ускоренных частиц отдельными сгустками с периодом повторения T .)

Поперечная устойчивость пучка в процессе ускорения так же, как и в классическом циклотроне, осуществляется за счет радиального градиента магнитного поля, создаваемого за счет спадающего по радиусу магнитного поля.

Закон изменения частоты ускоряющего напряжения в синхроциклотроне

Рассмотрим, каким должен быть закон изменения частоты ускоряющего напряжения $\omega_{\text{ген.}} = \omega_{\text{обр.}}$ в процессе ускорения частицы, чтобы сохранялся синхронизм в ее движении. Резонансное условие, необходимое для ускорения частиц в синхроциклотроне, поддерживается за счет модуляции (периодического изменения по определенному закону) частоты ускоряющего напряжения. Ускорение осуществляется на ветви модуляционной кривой, для которой выполняется условие

$$\omega_{\text{ген.}}(r) = \frac{ecB(r)}{E_0 + W} = \frac{ecB(r)}{E}.$$

При этом частица, для которой выполняется это условие, будет все время пересекать ускоряющий промежуток между дуантами при одной и той же фазе ускоряющего электрического поля. Предположим для простоты, что магнитное поле в синхроциклотроне однородно, тогда $B(r) = B_0 = \text{const}$. Конечно, магнитное поле в синхроциклотроне должно спадать по радиусу для обеспечения вертикальной устойчивости пучка. Однако этот спад обычно небольшой и составляет величину в несколько процентов. По-

этому ошибка, связанная с тем, что при вычислении интеграла магнитное поле мы считаем однородным, оказывается несущественной.

Найдем закон изменения частоты ускоряющего напряжения. Для этого вычислим производную от частоты ускоряющего напряжения по времени:

$$\frac{d\omega_{\text{ген.}}}{dt} = \frac{d\omega_{\text{ген.}}}{dE} \frac{dE}{dt} = -\frac{\omega}{E} \frac{dE}{dt}.$$

Вычислим производную $\frac{dE}{dt}$. Приращение энергии частицы на одном обороте $\Delta E = 2eV \cos \varphi$, где V – напряжение на дуанте. Отсюда получаем

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\Delta E}{T_{\text{обр.}}} = \frac{eV}{\pi} \omega_{\text{обр.}} \cos \varphi.$$

При условии, что $\omega_{\text{ген.}} = \omega_{\text{обр.}}$, находим

$$\frac{d\omega_{\text{ген.}}}{dt} = -\omega_{\text{ген.}}^3 \frac{eV}{\pi e c B_0} \cos \varphi.$$

Интегрируя полученное дифференциальное уравнение при начальных условиях: при $t = 0$, $\omega_{\text{ген.}} = \omega_0$ и $\cos \varphi = \text{const}$, где $\omega_0 = \frac{e c B_0}{E_0}$ – частота об-ращения частиц вблизи центра ускорителя при $r = 0$ (частота захвата в режим ускорения), находим

$$\int_{\omega_0}^{\omega} \frac{d\omega}{\omega^3} = -\frac{eV}{\pi e c B_0} \cos \varphi \int_0^t dt.$$

Интегрируя, получим

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\omega^2} - \frac{1}{\omega_0^2} \right) = \frac{eV t}{\pi e c B_0} \cos \varphi.$$

Отсюда следует

$$\omega_{\text{ген.}}(t) = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + \frac{2eV}{\pi E_0} \omega_0 t \cos \varphi}},$$

$$W(t) = E_0 \left(\sqrt{1 + \frac{2eV}{\pi E_0} \omega_0 t \cos \varphi} - 1 \right).$$

Найдем время ускорения $t_{\text{уск.}}$. При $t = t_{\text{уск.}}$ частота генератора становится

$$\omega_{\text{кон.}} = \frac{ecB_0}{E_0 + W_{\text{кон.}}},$$

где $W_{\text{кон.}}$ – конечная энергия ускоренных частиц в синхроциклотроне. При этом частицы достигают конечного радиуса и должны быть либо выведены из ускорительной камеры, либо использованы для облучения мишеней, установленных внутри камеры. Из соотношения $\omega_{\text{ген.}}(t_{\text{уск.}}) = \omega_{\text{кон.}}$ получаем

$$t_{\text{уск.}} = \frac{\pi E_0}{2eV \omega_0 \cos \varphi} \left(\frac{E_{\text{кон.}}^2}{E_0^2} - 1 \right).$$

Из полученных формул видно, что крутизна наклона кривой, описывающей зависимость $\omega_{\text{ген.}}(t)$, определяется величиной $V \cos \varphi$, т. е. величиной энергии, получаемой частицей за один оборот. Если за счет изменения скорости вращения вариаторов частоты изменить наклон кривой $\omega_{\text{ген.}}(t)$, то величина $V \cos \varphi$ должна измениться. При постоянной амплитуде ускоряющего напряжения V это происходит за счет изменения фазы частицы φ . Таким образом, меняя наклон кривой изменения частоты, мы при неизменной амплитуде ускоряющего напряжения меняем фазу, при которой частица должна ускоряться так, чтобы все время выполнялось резонансное условие.

Синхронная частица. Автофазировка

Значимость идеи автофазировки подтверждается тем фактом, что ученые, обнаружившие это явление, дважды номинировались на Нобелевскую премию.

Представим теперь, что в синхроциклотроне ускоряется не одна частица, а целый набор частиц, обладающих разбросом как по энергии (и, следовательно, по радиусу траекторий в магнитном поле), так и по фазам пересечения ими ускоряющей щели между дуантами. Такой пучок имеет, естественно, конечные размеры по радиусу и азимутальному углу (рис. 3.12).

Выберем в этом наборе частиц ту, у которой частота обращения в данный момент времени равна частоте генератора. Если ее фаза равна при этом фазе ВЧ-напряжения, для которой была рассчитана кривая, описывающая зависимость $\omega_{\text{ген.}}(t)$, то фаза частицы останется той же самой на протяжении всего ускорения и для нее на протяжении всего ускорения будет выполняться резонансное условие. Такую частицу мы будем называть *синхронной* и относящиеся к ней величины энергии E , частоты обращения ω и фазы φ будем снабжать индексом s , т. е. E_s , ω_s , φ_s . Фазу

и энергию синхронной частицы называют обычно равновесной фазой и равновесной энергией.

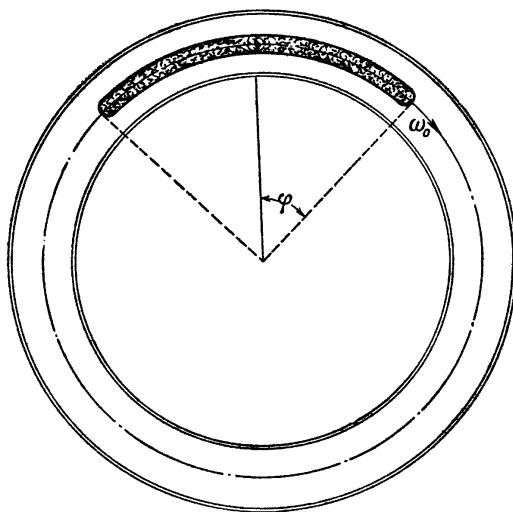


Рис. 3.12. Схематическое изображение пучка захваченных по фазе частиц в синхроциклотроне

Предположим, что $\varphi_s > 0$, т. е. синхронная частица ускоряется на спадающей части синусоиды ускоряющего напряжения дуанта. Тогда, если частица имеет энергию $E > E_s$, то для этой частицы будет $\omega_{\text{обр.}} < \omega_s$ и $T_{\text{обр.}} > T_s$ и на каждом обороте фаза частицы будет сдвигаться вправо (увеличиваться). Когда φ станет больше φ_s , энергия, получаемая частицей на каждом обороте, станет меньше, чем энергия, получаемая на одном обороте синхронной частицей, а при $\varphi > \frac{\pi}{2}$ ускорение вообще сменится замедлением, и частица начнет терять энергию. Разница в энергиях частиц начнет уменьшаться. После того как энергии частиц сравняются и энергия нашей частицы начнет уменьшаться по сравнению с энергией синхронной частицы, движение фазы частицы вправо сменится движением фазы влево, т. е. фаза частицы начнет уменьшаться, а энергия, получаемая частицей на каждом обороте, будет оставаться меньше, чем получает синхронная частица. Разница в энергиях частиц начнет увеличиваться. Когда фаза частицы станет меньше, чем фаза синхронной частицы, энергия, получаемая частицей на одном обороте, станет больше энергии, получаемой синхронной частицей, и разница в энергиях обеих частиц опять начнет уменьшаться. Когда энергии снова сравняются, фаза опять начнет на каждом обороте смещаться вправо, и весь процесс повторится.

Таким образом, при $\varphi_s > 0$ частицы, у которых энергия не совпадает с энергией синхронной частицы, совершают устойчивые колебания

по фазе и по энергии около значений $\varphi = \varphi_s$ и $E = E_s$. Эти колебания носят название *синхротронных*, или *радиально-фазовых*, а само явление возникновения устойчивости этих колебаний называется *автофазировкой*. Это явление впервые было обнаружено нашим физиком В. И. Векслером и американским физиком Э. М. Макмилланом. Легко видеть, что при $\varphi_s < 0$, т. е., когда синхронная частица ускоряется на возрастающей ветви синусоиды, устойчивости фазовых колебаний не возникает.

Найдем уравнение радиально-фазового движения ускоряемой частицы. Изменение энергии частицы в единицу времени определяется выражением

$$\frac{dE}{dt} = \frac{eV_0}{\pi} \omega \cos \varphi.$$

Вычислим разность

$$\frac{1}{\omega} \frac{dE}{dt} - \frac{1}{\omega_s} \frac{dE_s}{dt} = \frac{eV_0}{\pi} (\cos \varphi - \cos \varphi_s).$$

Замечая, что $\frac{1}{\omega} \frac{dE}{dt} = \frac{1}{\omega_s + \Delta\omega} \frac{d}{dt} (E_s + \Delta E) = \frac{1}{\omega_s} \frac{dE_s}{dt} + \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta E}{\omega_s} \right)$, получим

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta E}{\omega_s} \right) = \frac{eV_0}{\pi} (\cos \varphi - \cos \varphi_s). \quad (3.1)$$

Отклонение энергии частицы от ее равновесного значения $\Delta E = E_s - E$ связано с отклонением фазы частицы от ее равновесной фазы. Найдем эту связь:

$$\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi \approx (\omega_s - \omega)T.$$

Отсюда изменение фазы частицы в единицу времени

$$\frac{d\varphi}{dt} \approx \frac{\Delta\varphi}{T} = \omega_s - \omega = \Delta\omega = \frac{d\omega_s}{dE_s} \Delta E = \frac{ecB_0}{E_s^2} = \frac{\omega_s}{E_s} \Delta E \quad \text{и} \quad \Delta E = \frac{E_s}{\omega_s} \frac{d\varphi}{dt}.$$

Исключая из уравнения (3.1) с помощью выражения для $\frac{d\varphi}{dt}$ величину ΔE , получим

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{E_s}{\omega_s^2} \frac{d\varphi}{dt} \right) = \frac{eV_0}{\pi} (\cos \varphi - \cos \varphi_s). \quad (3.2)$$

Полученное уравнение (3.2) носит название *уравнения фазовых*, или *радиально-фазовых, колебаний*. Иногда это уравнение называют уравнением синхротронных колебаний. Далее будет проведено подробное исследование этого уравнения. Здесь только заметим, что ускоряемые частицы, энергия которых отличается от равновесной, совершают устойчи-

вые колебания около положения синхронной частицы. Покажем это на примере уравнения движения маятника с внешним моментом сил.

Исследование фазового уравнения (3.2) и физическая интерпретация описываемых им явлений упрощаются и делаются наглядными, если обратить внимание на то, что уравнение такого же типа описывает поведение физического маятника (точнее, его угла отклонения от горизонтали $\varphi = 0$), на который действует внешний момент сил.

Представим себе маятник с массой M и длиной L , укрепленный на торце цилиндра, который может вращаться вокруг горизонтальной оси O (рис. 3.13). К цилиндру (на радиусе R) приложена вертикальная сила F , дающая момент вращения FR . В частности, можно представить, что на цилиндр намотана нить, на которой укреплен груз с массой D . Тогда $F = Dg$, где g – ускорение силы тяжести. Маятник создает момент вращения с противоположным направлением $P \cos \varphi$, где $P = MLg$, а φ – угол отклонения маятника от горизонтали. При указанных условиях, очевидно, могут существовать два положения равновесия маятника, симметрично расположенные относительно горизонтали и соответствующие углам $\varphi_s > 0$ и $\varphi_s < 0$, где

$$\cos \varphi_s = \frac{FR}{P} = \frac{DR}{ML} \quad (3.3)$$

и существование равновесия возможно только при условии $DR < ML$.

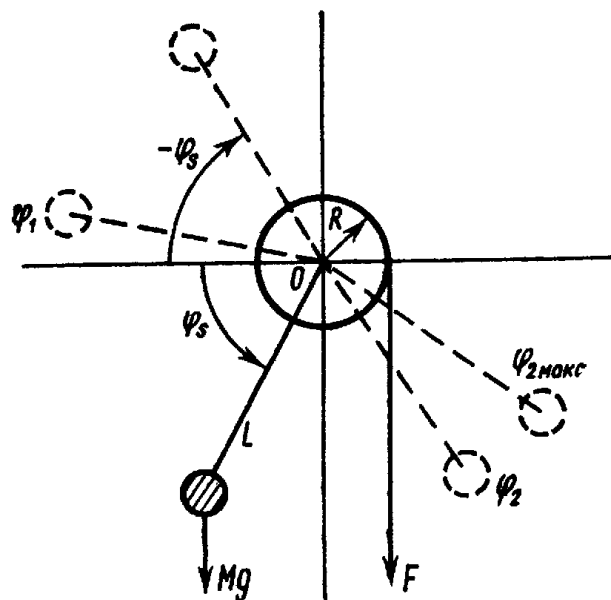


Рис. 3.13. Маятник с внешним моментом сил.

Mg – сила тяжести, действующая на маятник; L – длина маятника; F – внешняя сила; O – ось вращения; R – радиус цилиндра; φ_s – угол, соответствующий равновесию маятника; φ_1, φ_2 – углы поворота маятника при колебаниях

В отсутствие внешнего момента, при $F = 0$, естественные два положения равновесия сводятся к $\varphi_s = \pi / 2$ и $\varphi_s = -\pi / 2$. Первое (нижнее) положение соответствует устойчивым колебаниям маятника, а второе (верхнее) положение неустойчиво. Наличие внешнего момента смещает эти положения к φ_s и $-\varphi_s$.

Момент внешней силы согласно (3.3) может быть записан в виде $FR = P \cos \varphi_s$. Если момент инерции маятника равен G , то уравнение моментов относительно оси цилиндра O может быть записано в виде

$$\frac{d}{dt} \left(G \frac{d\varphi}{dt} \right) = P (\cos \varphi - \cos \varphi_s). \quad (3.4)$$

Это уравнение маятника с внешним моментом сил в точности совпадает с фазовым уравнением для синхротронных колебаний (3.2), если считать, что

$$G = \frac{E_s}{\omega_s^2}; \quad P = \frac{eV}{\pi}.$$

При рассматриваемых условиях возможны 3 вида движения маятника:

1) равновесие при $\varphi = \varphi_s$, $d\varphi / dt = 0$, что в применении к ускорителю означает равновесное движение частицы в точном синхронизме с частотой генератора;

2) колебательное движение маятника с отклонением по углу, что в случае ускорителя соответствует отклонению фазы частицы φ от положения равновесной фазы φ_s . Эти колебания фазы около φ_s и, соответственно, колебания энергии E около E_s носят название синхротронных колебаний. Режим синхротронных колебаний соответствует нормальной работе резонансного ускорителя;

3) вращательное движение, которое наступает, когда маятник получил слишком сильный начальный толчок (т. е. слишком большое значение $d\varphi/dt$) или слишком большое начальное отклонение по углу от φ_s . При этом маятник вращается в одну сторону с нарастающей угловой скоростью $d\varphi/dt$. Для ускорителя это означает, что сильно неравновесные частицы, начальные условия движения которых значительно отличаются от равновесных $\varphi = \varphi_s$, $d\varphi/dt = 0$, выпадают из синхронизма с ВЧ-полем. Поэтому они не ускоряются этим полем, и их энергия E все больше отстает от непрерывно растущего равновесного значения E_s .

В заключение заметим, что уравнение маятника (3.4), как и уравнение синхротронных колебаний (3.2), остаются справедливыми и при «медленно» меняющихся во времени параметрах G , P или E_s , ω_s . Это означает, что синхротронные колебания адиабатически сохраняются в течение всего процесса ускорения.

3.2. Частотная программа синхроциклотрона с учетом изменения магнитного поля вдоль радиуса

Как известно, резонансное условие, необходимое для ускорения частиц в синхроциклотроне, имеет вид

$$\omega(r) = \omega_{\text{ген.}}(r) = \frac{ecB(r)}{E}. \quad (3.5)$$

Найдем закон изменения частоты ускоряющего напряжения от времени с учетом изменения магнитного поля вдоль радиуса $B(r)$. Введем безразмерный коэффициент K , характеризующий зависимость частоты обращения частицы от энергии,

$$K = -\frac{E}{\omega} \frac{d\omega}{dE}.$$

Дифференцируя (3.5) для аксиально-симметричного магнитного поля, имеем

$$K = -\frac{E}{\omega} \left(-\frac{ecB(r)}{E^2} + \frac{ec}{E} \frac{dB}{dr} \frac{dr}{dE} \right),$$

а дифференцируя соотношение $erB(r) = \sqrt{E^2 - E_0^2}$ по E , получим

$$\frac{dr}{dE} = \frac{c}{veB(r)(1-n)}.$$

Таким образом, для аксиально-симметричного поля получаем

$$K = 1 + \frac{n}{\beta^2(1-n)}.$$

Здесь v – скорость частицы; $\beta = \frac{v}{c}$. Зависимость коэффициента K от радиуса для синхроциклотрона ПИЯФ приведена на рис. 3.14. Для однородного магнитного поля величина $n = 0$ и $K = 1$.

Используя введенное выше выражение для K , находим, что для равновесной частицы

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{\omega_s K}{E} \frac{dE}{dt} = -\frac{\omega^2 K_s}{E_s} \frac{eV}{\pi} \cos \varphi_s.$$

Таким образом, для равновесной частицы в синхроциклотроне имеет место соотношение

$$\cos \varphi_s = -\frac{E_s}{2eVK_s} \frac{1}{f^2} \frac{df}{dt}, \quad (3.6)$$

где φ_s – равновесная фаза; E_s – полная энергия равновесной частицы; e – ее заряд; V и f – амплитуда и частота ускоряющего напряжения.

$$K = 1 + \frac{n}{(1-n)\beta_s^2},$$

где n – показатель спада магнитного поля; $\beta_s = \sqrt{1 - \left(\frac{E_0}{E_s}\right)^2}$ – относительная скорость равновесной частицы.

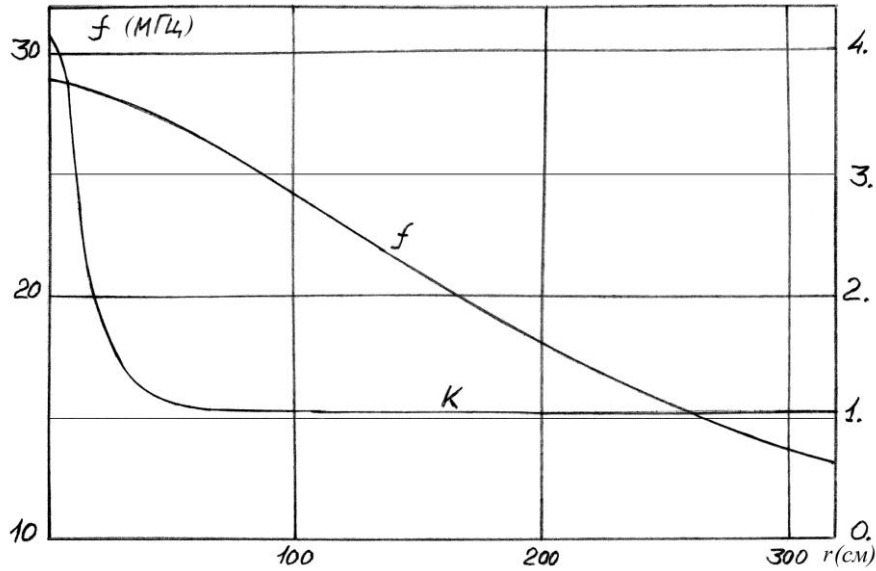


Рис. 3.14. Зависимость частоты обращения протона f и параметра K от радиуса

Угол поворота вариаторов частоты в градусах может быть выражен через число оборотов ротора в минуту N и время t простым соотношением

$$\alpha = 360 \frac{Nt}{60} = 6Nt.$$

Отсюда

$$\frac{df}{dt} = 6N \frac{df}{d\alpha}. \quad (3.6a)$$

Выражение (3.6) запишется в виде

$$\cos \varphi_s = - \frac{3NE_s}{eVK_s f^2} \frac{df}{d\alpha}.$$

Учитывая соотношения

$$\frac{dr}{r} = \frac{1}{1-n} \frac{1}{\beta^2} \frac{dE}{E}, \quad \frac{dE}{E} = - \frac{1}{K} \frac{df}{f}, \quad (3.7)$$

получаем

$$\cos \varphi_s = \frac{6\pi N}{cV} r B(1-n) \frac{dr}{d\alpha}.$$

Интегрируя это уравнение, получаем

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{6\pi N}{c} G(r), \quad (3.8)$$

где $G(r) = \int_0^r \frac{(1-n)Br}{V \cos \varphi_s} dr$.

Формула (3.8) может быть также записана в виде

$$\alpha = \alpha_0 + (\alpha_k - \alpha_0) \frac{G(r)}{G(r_k)}, \quad (3.8a)$$

где α_k – конечное значение угла поворота вариаторов, а r_k – конечный радиус ускорения. Выражение (3.8a) совместно с формулой

$$f(r) = \frac{ecB(r)}{2\pi E_0 \sqrt{1 + \left(\frac{erB(r)}{E_0}\right)^2}} \quad (3.9)$$

дают зависимость $f(r)$ в параметрической форме. Параметром служит радиус r . Зависимость частоты обращения протона от радиуса $f(r)$ приведена на рис. 3.14. Формулы 3.8a и 3.9 позволяют вычислить форму частотной программы синхроциклотрона $f(\alpha)$.

Вычислим теперь $\frac{df}{d\alpha}$. Из выражений (3.6 и 3.6a) имеем

$$\frac{df}{d\alpha} = -\frac{eV \cos \varphi_s K_s f^2}{3NE_s}.$$

Величина N может быть найдена из формулы (3.8):

$$N = \frac{(\alpha_k - \alpha_0)c}{6\pi G(r_k)}.$$

Таким образом,

$$\frac{df}{d\alpha} = -2\pi \frac{K_s f^2 eV \cos \varphi_s G(r_k)}{c(\alpha_k - \alpha_0) E_s}.$$

Найдем время ускорения. Имеем

$$\frac{dE}{dt} = \frac{2eV \cos \varphi_s}{T}, \quad (3.10)$$

где $T = \frac{1}{f}$ – период ускоряющего напряжения. Величина dE может быть найдена из формулы (3.7):

$$dE = \frac{(1-n) \beta^2 E}{r} dr.$$

Подставляя это выражение в (3.10) и замечая, что $\beta^2 E^2 = (e r B)^2$, получим

$$dt = \frac{\pi}{c} \frac{(1-n) r B}{V \cos \varphi_s} dr.$$

Отсюда время ускорения

$$t_{\text{уск.}} = \frac{\pi}{c} G(r_k).$$

3.3. Синхротронные колебания. Сепаратриса

По аналогии с проведенными выше преобразованиями получим уравнение синхротронных колебаний с учетом зависимости магнитного поля от радиуса $B(r)$:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{E_s}{K_s \omega_s^2} \frac{d\varphi}{dt} \right) = \frac{eV}{\pi} (\cos \varphi - \cos \varphi_s), \quad (3.11)$$

где $K_s = 1 + \frac{n}{\beta^2 (1-n)}$.

Проведем анализ полученного уравнения синхротронных колебаний (3.11). Для того чтобы понять, является ли процесс ускорения устойчивым по отношению к фазе или энергии ускоряемых частиц, необходимо исследовать устойчивость решений этого уравнения в смысле Ляпунова.

Рассмотрим сначала малые колебания фазы произвольной частицы относительно фазы синхронной частицы. Будем считать, что за время нескольких фазовых колебаний величина $\frac{E}{K \omega^2}$ меняется незначительно,

а разность $\varphi - \varphi_s$ мала по сравнению с 2π . Тогда, разлагая правую часть фазового уравнения в ряд по степеням величины $\psi = \varphi - \varphi_s$, получим

$$\frac{d^2 \psi}{dt^2} + \Omega^2 \psi = 0,$$

где частота радиально-фазовых колебаний

$$\Omega = \omega \sqrt{K \frac{eV \sin \varphi_s}{\pi E_s}}. \quad (3.12)$$

Из полученного выражения для частоты радиально-фазовых колебаний видно, что при амплитуде ускоряющего напряжения порядка десятков кВ частота фазовых колебаний оказывается на 2-3 порядка меньше, чем частота обращения ω , т. е. фазовые колебания – это процесс значительно

более медленный, чем движение частиц по замкнутым траекториям в магнитном поле ускорителя.

Вернемся теперь к фазовому уравнению (3.11). Будем опять считать величину $\frac{E_s}{K \omega_s^2}$ постоянной и найдем первый интеграл уравнения фазо-

вых колебаний. Для этого умножим обе части уравнения на $d\varphi = \frac{d\varphi}{dt} dt$ и проинтегрируем при начальных условиях $\varphi|_{t=0}$ и $\frac{d\varphi}{dt}|_{t=0} = \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)_H$.

Интегрирование дает

$$\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 - \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)_H^2 = \frac{eV K \omega^2}{\pi E} [\sin \varphi - \sin \varphi_H - (\varphi - \varphi_H) \cos \varphi_0 + C] \quad (3.13)$$

(индекс s у величин ω , E и K опускаем). Полученное выражение позволяет построить на фазовой плоскости $\left(\varphi, \frac{d\varphi}{dt}\right)$ фазовые траектории, соответствующие решениям уравнения фазовых колебаний (рис. 3.15).

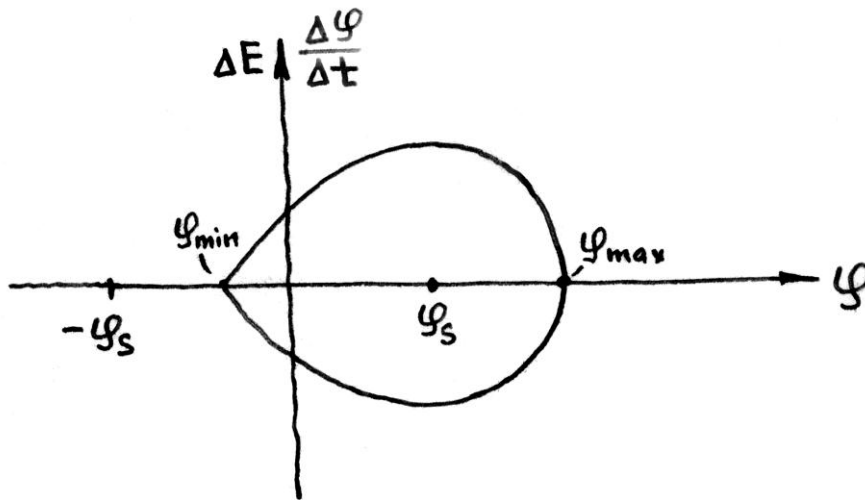


Рис. 3.15. Фазовая траектория при движении частицы

Вторичное интегрирование этого выражения позволяет найти решение $\varphi = \varphi(t)$, выраженное через эллиптические интегралы. При малых отклонениях от равновесной фазы, фазовые траектории представляют собой овалы, окружающие точку $\varphi = \varphi_s$, $\frac{d\varphi}{dt} = 0$, которая является особой точкой типа «центр». Фазовая траектория, проходящая через точку $\varphi = -\varphi_s$, $\frac{d\varphi}{dt} = 0$, является граничной кривой, называемой *сепаратрисой*,

которая разделяет фазовую плоскость на две области. Первая область – финитного движения, в которой фазовые траектории являются замкнутыми, вторая область – инфинитного движения, в которой фазовые траектории начинаются и оканчиваются в бесконечности. Первая область является областью устойчивого движения, вторая – областью неустойчивого движения, в которой процесс ускорения становится невозможным. Точка $\varphi = -\varphi_s$ является точкой неустойчивого равновесия типа «седло». Уравнение сепаратрисы получается, если в (3.13) считать $\varphi_n = -\varphi_s$ и $\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)_n = 0$. Имеем

$$\frac{d\varphi}{dt} = \sqrt{\frac{eVK\omega^2}{\pi E} [\sin \varphi + \sin \varphi_s - (\varphi + \varphi_s) \cos \varphi_s + C]}. \quad (3.14)$$

Замечая, что $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{K\omega}{E} \Delta E$ и $\Delta E = \frac{dE}{dr} \Delta r = \frac{VeB(1-n)}{c} \Delta r$,

$$\Delta E - \Delta E_n = \sqrt{\frac{eVE}{\pi K} [\sin \varphi - \sin \varphi_n - (\varphi - \varphi_n) \cos \varphi_s]},$$

$$\Delta r - \Delta r_n = \frac{c}{veB(1-n)} (\Delta E - \Delta E_n).$$

Таким образом, колебания фазы ускоряемой частицы около равновесной фазы φ_s сопровождаются колебаниями энергии частицы около равновесной энергии E_s и периодическими изменениями радиуса траектории около равновесного радиуса r_s .

Выражение (3.14), дающее связь между $d\varphi/dt$ и φ , представляет собой уравнение фазовых траекторий на фазовой плоскости $(\varphi, d\varphi/dt)$. Придавая постоянной C различные значения при фиксированной φ_s , получаем семейство фазовых траекторий, вид которых позволяет делать заключения об устойчивости «в большом». Пример такого фазового движения приведен на рис. 3.16, где для наглядности показана также связь фазового движения с потенциальной функцией $U(\varphi)$, которую можно ввести на основании фазового уравнения (3.11). Нетрудно видеть, что это уравнение можно записать в виде

$$G \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -\frac{dU(\varphi)}{d\varphi},$$

где $U(\varphi) = \frac{qeV}{2\pi} (\varphi \cos \varphi_s - \sin \varphi)$. Минимум потенциальной энергии $U(\varphi)$ приходится на устойчивую точку равновесия $\varphi = \varphi_s$, около которой имеется потенциальная яма. Максимум $U(\varphi)$ достигается в неустойчивой точке равновесия $\varphi = -\varphi_s$, по обе стороны от которой располагается по-

тенциальный барьер. В соответствии с этим φ_s на фазовой плоскости представляет собой, по терминологии теории колебаний, особую точку типа «центр», а точка $\varphi = -\varphi_s$ – особую точку типа «седло». Все фазовые кривые делятся на замкнутые, окружающие точку φ_s , и незамкнутые. Каждая из замкнутых кривых имеет две точки поворота: левую φ_1 и правую φ_2 . Незамкнутые кривые имеют одну точку поворота φ_2 . Границей, отделяющей один класс траекторий от другого, служит так называемая сепаратриса – «последняя» замкнутая фазовая траектория, проходящая через неустойчивую точку равновесия $-\varphi_s$ (рис. 3.16). Уравнение сепаратрисы дается (3.14) при значении постоянной C , равной

$$C_{\text{сеп.}} = \sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s.$$

Точка $\varphi = -\varphi_s$ является крайней левой точкой сепаратрисы. Крайней правой ее точкой φ_{2M} является второе решение уравнения:

$$\sin \varphi_s + \sin \varphi - (\varphi_s + \varphi) \cos \varphi_s = 0.$$

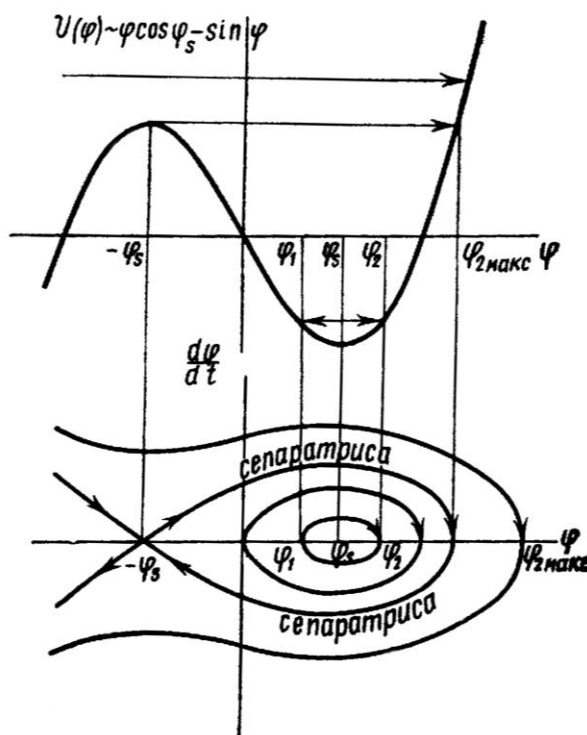


Рис. 3.16. Потенциальная функция синхронных колебаний $U(\varphi)$ и соответствующие фазовые траектории на плоскости $(\varphi, d\varphi/dt)$

Область фаз, ограниченная сепаратрисой $(-\varphi_s - \varphi_{2M})$, соответствует максимальной протяженности по фазе, которую могут занимать частицы, захваченные в режим резонансного ускорения. Эта угловая протяженность банча, равная $\varphi_s + \varphi_{2M}$, зависит от значения φ_s . При $\varphi_s \rightarrow 0$ сепаратриса сжимается в точку, и область устойчивости исчезает. Наибольшее значение $\varphi_s + \varphi_{2M}$ достигает при $\varphi_s = \pi/2$, когда $\varphi_s + \varphi_{2M} = 2\pi$. Это не зна-

чит, однако, что при выборе φ_s нужно стремиться к $\varphi_s = \pi/2$, поскольку при этом равновесный прирост энергии $eV \cos \varphi_s$ стремится к нулю, в то время как при $\varphi_s = 0$ он наибольший (при заданном напряжении V). Поэтому при выборе φ_s приходится исходить из компромисса между стремлением к увеличению энергии за оборот и желанием повысить интенсивность пучка частиц. Эта интенсивность определяется площадью, охватываемой сепаратрисой на фазовой плоскости, т. е., грубо говоря, продольным (фазовым) размером устойчивой области $\varphi_s + \varphi_{2M}$ и максимальным поперечным размером этой области $(d\varphi/dt)_{\text{макс.}}$, достигаемым на сепаратрисе при $\varphi = \varphi_s$. Представление о зависимости площади, охватываемой сепаратрисой, от φ_s дает рис. 3.17, где в одном масштабе показаны сепаратрисы для трех значений φ_s . Значения $d\varphi/dt$ даны в долях Ω , и при количественных оценках нужно учитывать, что $\Omega \sim (\sin \varphi_s)^{1/2}$.

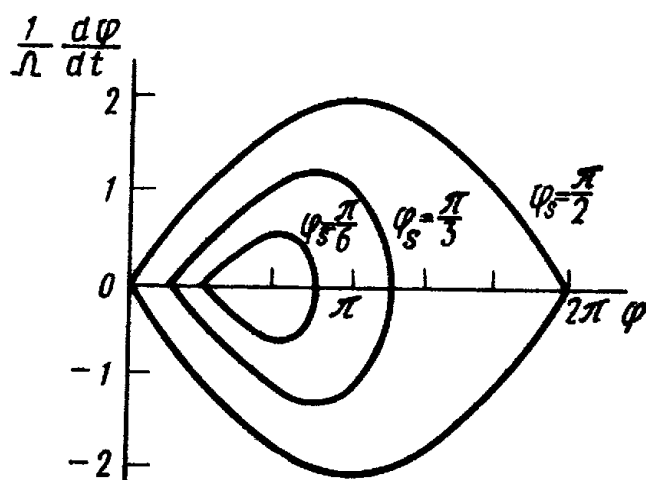


Рис. 3.17. Сепаратрисы для трех значений $\varphi_s = \pi/6, \pi/3, \pi/2$ в координатах $\varphi, \frac{d\varphi}{dt}/\Omega$, где Ω – частота линейных синхротронных колебаний

Фактически картина на фазовой плоскости отличается только масштабом от того, что происходит на орбите. Перемещению по фазе соответствует движение по азимуту. Перемещение изображающей точки по оси $d\varphi/dt$ одновременно описывает перемещение частицы в радиальном направлении, т. е. изменение x_0 , а также отклонение энергии E от равновесного значения E_s , т. е. изменение ΔE . Наибольшего возможного значения $|x_0(\vartheta)|$ и $|\Delta E|$ достигают тогда, когда частица, двигаясь по сепаратрисе, проходит фазу φ_s , другими словами, азимут, на котором находится равновесная частица. Эти значения

$$|\Delta E|_{\text{макс.}} = 2 \left[\frac{eV E_s (\sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s)}{2\pi q K_s} \right]^{1/2}, \quad |x_0(\vartheta)|_{\text{макс.}} = R_0 \Psi(\vartheta) \frac{|\Delta E|_{\text{макс.}}}{\beta_s^2 E_s}.$$

Выражения $2|\Delta E|_{\text{макс.}}$ и $2|x_0(\vartheta)|_{\text{макс.}}$ определяют максимально возможный разброс по энергии и радиусу, допускаемый механизмом автофазировки.

Выше мы нашли выражение для частоты синхротронных колебаний Ω при малых амплитудах (3.12). Найдем теперь частоту синхротронных колебаний Ω_s для произвольных амплитуд, в том числе больших¹. Можно ожидать, что в общем случае $\Omega_s \neq \Omega$, поскольку согласно (3.11) рассматриваемые колебания нелинейны. Отметим, кстати, что колебания фазы относительно φ_s , вообще говоря, асимметричны. «Правая амплитуда», т. е. максимальное отклонение фазы вправо от φ_s , равное $\varphi_2 - \varphi_s$, больше «левой амплитуды» $\varphi_s - \varphi_1$, поэтому можно говорить о размахе колебаний $\varphi_2 - \varphi_1$, а в качестве «амплитуды» принять $(\varphi_2 - \varphi_1)/2$. Для нахождения частоты Ω_s заметим, что согласно уравнению (3.14) смещению по фазе на $d\varphi$ соответствует временной интервал

$$dt = \frac{d\varphi}{\Omega} \left[\frac{2}{\sin \varphi_s} (C + \sin \varphi - \varphi \cos \varphi_s) \right]^{-1/2}. \quad (3.15)$$

Период колебаний $2\pi / \Omega_s$ соответствует одному обороту изображающей точки по замкнутой фазовой траектории, состоящей из верхней и нижней симметричных половин, проходимых за одинаковое время. В соответствии с этим, используя (3.15), получаем для частоты Ω_s выражение

$$\Omega_s = \Omega \pi \sqrt{\frac{2}{\sin \varphi_s}} \left[\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (C + \sin \varphi - \varphi \cos \varphi_s)^{-1/2} d\varphi \right]^{-1} \quad (3.16)$$

где φ_1, φ_2 – точки поворота фазовой траектории, соответствующие наибольшим отклонениям от φ_s влево и вправо. Как видно, значение интеграла в (3.16) и величины Ω_s зависят от величин φ_1 и φ_2 , определяемых постоянной C , согласно соотношениям

$$C = -\sin \varphi_1 + \varphi_1 \cos \varphi_s = -\sin \varphi_2 + \varphi_2 \cos \varphi_s.$$

При малых отклонениях фазы от φ_s , т. е. при

$$\varphi_2 - \varphi_s \ll 1, \varphi_s - \varphi_1 \ll 1,$$

интегрирование в (3.16) дает, естественно, $\Omega_s = \Omega$. В другом крайнем случае – при движении по сепаратрисе – нужно подставить в (3.16) $\varphi_1 = -\varphi_s$, $\varphi_2 = \varphi_{2M}$. Тогда на нижнем пределе $-\varphi_s$ интеграл логарифмически расходится, и период обращения по сепаратрисе становится бесконечно велик, а частота $\Omega_s \rightarrow 0$. Это связано с тем, что сепаратриса проходит через неустойчивую равновесную точку $\varphi = -\varphi_s$, вблизи которой скорость изображающей точки стремится к нулю. На графике потенциальной

¹ Коломенский А. А. Физические основы методов ускорения заряженных частиц. М., 1980. С. 122–127.

энергии $U(\varphi)$ (рис. 3.16) это соответствует бесконечно медленному движению около вершины потенциального барьера. Частота Ω_s в долях Ω как функция «амплитуды» колебаний $(\varphi_2 - \varphi_1)/2$ представлена на рис. 3.18 для различных значений φ_s .

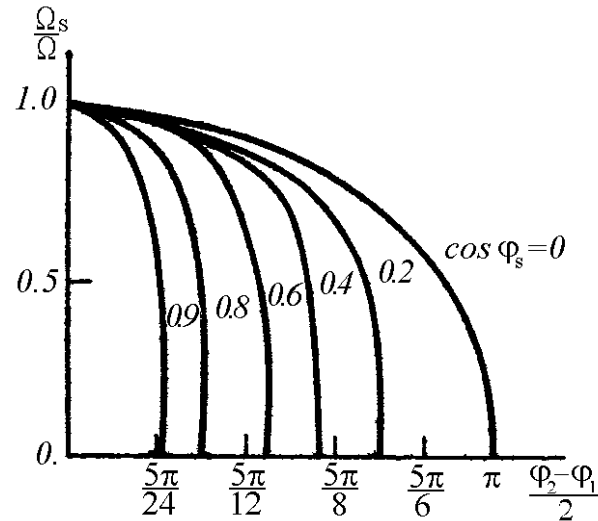


Рис. 3.18. Частота синхротронных колебаний Ω_s в долях частоты линейных колебаний Ω в зависимости от амплитуды колебаний $(\varphi_2 - \varphi_1)/2$ для различных значений $\cos \varphi_s$

Главный параметр, входящий во все соотношения, связанные с синхротронными колебаниями, — равновесная энергия частиц E_s — должен возрастать, причем это возрастание происходит, как правило, медленно по сравнению с периодом синхротронных колебаний. Другие параметры — ω_s , V , K_s — также могут медленно изменяться в процессе ускорения.

Рассмотрим колебания с произвольной амплитудой. При медленном изменении параметров движение на фазовой плоскости можно описать как последовательные переходы с одной фазовой траектории на соседнюю. Другими словами, происходят переходы от движения с одной постоянной интегрирования C и некоторым набором значений параметров E_s , ω_s , и т. д. к другой постоянной интегрирования и другому набору значений параметров. Закон изменения постоянной C или определяемой ею амплитуды колебаний $(\varphi_2 - \varphi_1)/2$ может быть найден с помощью адиабатического инварианта I , т. е. величины, остающейся постоянной при медленном изменении параметров. Этот инвариант, как известно, равен площади, охватываемой замкнутой фазовой траекторией, т. е. в общем случае

$$I = \int p dy = \text{const}, \quad (3.17)$$

где $p = M \dot{y}$; y – обобщенный импульс и координата, а интеграл берется по периоду колебаний. В нашем случае роль p и y играют величины

$$p = \frac{E_s}{\omega_s^2 K_s} \frac{d\varphi}{dt}; \quad y = \varphi,$$

где $d\varphi/dt$ дается выражением (3.14) и инвариант (3.17)

$$I = 2 \left(\frac{eV E_s}{\pi \omega_s^2 K_s} \right)^{1/2} Y \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) = \text{const}, \quad (3.18)$$

где $Y \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (C + \sin \varphi - \varphi \cos \varphi_s)^{1/2} d\varphi$.

В отличие от инварианта в случае малых колебаний, для которого существуют простые аналитические выражения, в данном случае необходимо провести численные расчеты интеграла (3.18) при разных значениях величины C . В результате находим значение Y как функции амплитуды $(\varphi_2 - \varphi_1)/2$ при различных фиксированных φ_s . Пусть имеются начальный и конечный моменты времени t_i и t_f , для которых известны значения параметров. Для рассматриваемых нами величин выполняется соотношение

$$Y_f = Y_i \frac{(V E_s)_i^{1/2} (\omega_s^2 K_s)_f^{1/2}}{(qV E_s)_f^{1/2} (\omega_s^2 K_s)_i^{1/2}}. \quad (3.19)$$

Заметим, что полученная формула (3.19) не применима к сепаратрисе, поскольку период обращения по ней, т. е. период синхротронных колебаний, становится бесконечным. Поэтому условие адиабатичности, требующее медленности изменения параметров по отношению к этому периоду, не выполняется.

Рекомендуемая литература

1. Коломенский А. А. Физические основы методов ускорения заряженных частиц. М., 1980.
2. Лебедев А. Н., Шальнов А. В. Основы физики и техники ускорителей. М., 1991.

Глава 4

Необходимые сведения из радиотехники для расчета параметров высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ

Радиотехника – это всего лишь комбинация из трех элементов: R , L и C , а это проще, чем покер.

Высказывание Н. К. Абросимова перед лекцией по радиотехническим устройствам синхроциклотрона

Прежде чем перейти к рассмотрению резонансных свойств ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона, напомним основные свойства резонансных, или колебательных, контуров и систем с распределенными параметрами.

4.1. Резонансный контур

Как известно, действительную функцию вида $a = A \cos(\omega t + \varphi)$ удобно выражать в виде комплексной мгновенной величины

$$\dot{a} = A [\cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi)] = A e^{j\varphi} e^{j\omega t} = \dot{A} e^{j\omega t},$$

где A – действительная амплитуда; \dot{A} – комплексная амплитуда. При вычислениях временной множитель $e^{j\omega t}$ отбрасывают и оставляют только комплексные амплитуды. Вследствие этого комплексное сопротивление в декартовых или полярных координатах имеет вид

$$\dot{Z} = R + jX = Z e^{j\varphi},$$

где R – активная составляющая; X – реактивная составляющая; $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ – полное сопротивление (импеданс); $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}$ – фазовый угол.

Таким образом, полное сопротивление может быть представлено в виде последовательного соединения всегда положительного активного

сопротивления R и реактивного сопротивления jX (положительного, если оно индуктивное, и отрицательного, если оно емкостное). Последовательное соединение $\dot{Z} = R_s + jX_s$ может быть пересчитано в эквивалентное ему параллельное соединение (рис. 4.1а, б).

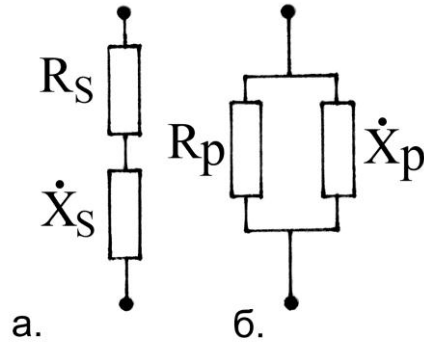


Рис. 4.1. Эквивалентное представление комплексного сопротивления в виде последовательного (а) или параллельного (б) контура

Комплексная проводимость

$$\dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}} = G_p + jB_p = \frac{1}{Z} e^{-j\varphi} = Y e^{j\theta},$$

где $Y = \frac{1}{Z}$; $\theta = -\varphi$. Связь между соответствующими величинами будет

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s}; \quad X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s}; \quad G_p = \frac{1}{R_p}; \quad B_p = -\frac{1}{X_p}. \quad (4.1)$$

Формулы (4.1) применяют для пересчета параллельного соединения в эквивалентное ему последовательное, и наоборот. В частном случае реактивное сопротивление для индуктивности равно $j\omega L$, а для емкости — $\frac{1}{j\omega C}$. Полное сопротивление для последовательного соединения R , L и C будет

$$\dot{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C},$$

а полная проводимость для параллельного соединения G , L и C

$$\dot{Y} = G + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}. \quad (4.2)$$

Модули полных величин находят по правилам действия с комплексными числами:

$$|\dot{Z}| = Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}; |\dot{Y}| = Y = \sqrt{G^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}.$$

Активная и реактивная мощность резонансного контура. Мгновенная мощность $p = ui = u \frac{dq}{dt}$. Если напряжение и ток даны в комплексном виде \dot{U}, \dot{I} , то мощность рассчитывается с применением комплексно сопряженного тока по формуле $\dot{P} = \frac{1}{2} \dot{U} \dot{I}^*$, где \dot{I}^* – комплексно сопряженная величина \dot{I} :

$$\dot{U} = U_a + jU_r; \dot{I} = I_a + jI_r; \dot{P} = P_a + jP_r.$$

Пример – индуктивная нагрузка с активными потерями $X_s = \omega L$ (рис. 4.1а):

$$I_a = \frac{U}{R_s}; \dot{I}_r = \frac{U}{j\omega L} = -j \frac{U}{\omega L};$$

$$\dot{I} = I_a + \dot{I}_r = \frac{U}{R_s} - j \frac{U}{\omega L}; \dot{P} = \frac{1}{2} \dot{U} \dot{I}^* = \frac{U^2}{2R_s} + j \frac{U^2}{2\omega L},$$

$\frac{U^2}{2R_s}$ – амплитуда активной мощности; $\frac{U^2}{2\omega L}$ – амплитуда реактивной мощности.

Реактивная мощность – это мощность, которая сначала потребляется нагрузкой, а затем отдается в сеть. Происходит перекачка энергии из источника в индуктивность и обратно.

Параллельный резонансный контур без потерь мощности в его элементах

Параллельный резонансный контур без потерь представлен на рис. 4.2.

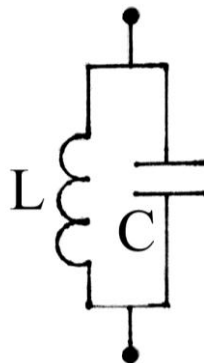


Рис. 4.2. Параллельный резонансный контур без потерь

Используя (4.2), получим

$$\dot{Y} = j\omega C + \frac{1}{j\omega L} = j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right).$$

В резонансе $Y = 0$ при $\omega_0 C = \frac{1}{\omega_0 L}$, отсюда $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансная частота, $\omega_0 = 2\pi f_0$, величина $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \rho$ – волновое сопротивление.

Рассмотрим поведение колебательного контура вблизи резонанса $\omega - \omega_0 = \Delta\omega$; $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \ll 1$:

$$\begin{aligned} \dot{Y} &= j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) = j\frac{1}{\omega L}\left(\omega^2 LC - 1\right) = j\frac{\omega_0}{\rho\omega}\left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1\right) = j\frac{1}{\rho\omega}\left(\frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0}\right) = \\ &= j\frac{1}{\rho\omega} \frac{(\omega - \omega_0)(\omega + \omega_0)}{\omega_0} \approx j\frac{1}{\rho\omega} \frac{\Delta\omega 2\omega}{\omega_0} = \frac{j}{\rho} \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}; \\ \dot{Z} &= \frac{1}{\dot{Y}} = -j\rho \frac{\omega_0}{2\Delta\omega}; \quad X = -\rho \frac{\omega_0}{2\Delta\omega}. \end{aligned}$$

Зависимость $X = X(\omega)$ изображена на рис. 4.3а.

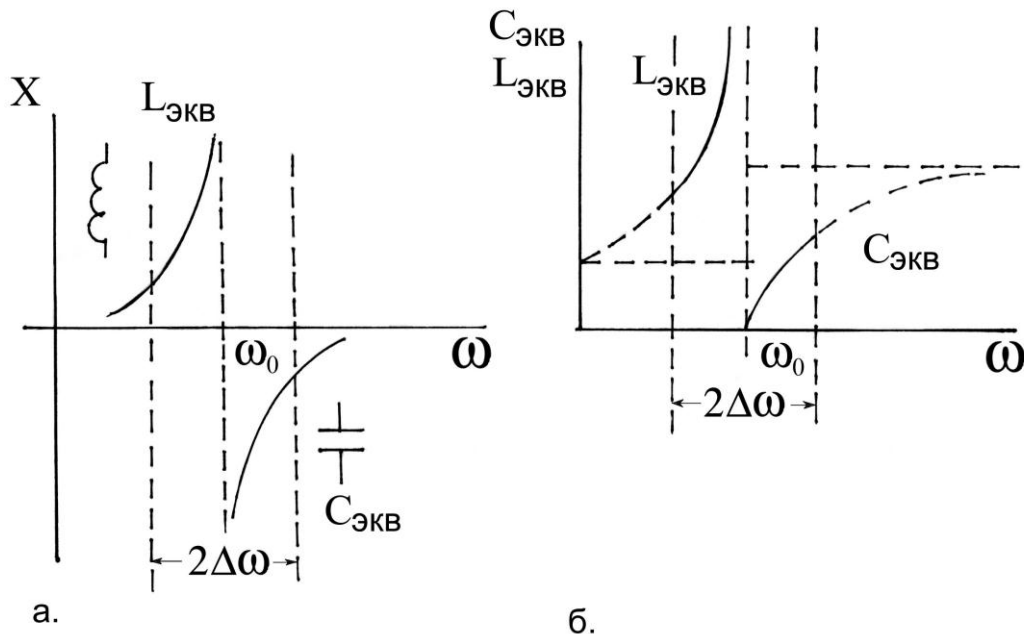


Рис. 4.3. Частотные характеристики параллельного резонансного контура без потерь:

- а) зависимость реактивного сопротивления параллельного контура от частоты вблизи резонанса; б) зависимость эквивалентного сопротивления параллельного контура от частоты вблизи резонанса

Таким образом, при $\omega > \omega_0$ реактивное сопротивление контура $X < 1$ и носит емкостной характер $C_{\text{экв.}}$, а при $\omega < \omega_0$ реактивное сопротивление контура $X > 1$ и носит индуктивный характер $L_{\text{экв.}}$.

Найдем $C_{\text{экв.}}$ при $\omega > \omega_0$, $\Delta\omega > 0$ (рис. 4.3б):

$$X = \frac{1}{j\omega C_{\text{экв.}}} = -j\rho \frac{\omega_0}{2\Delta\omega}, \text{ отсюда } C_{\text{экв.}} = \frac{2\Delta\omega}{\rho\omega\omega_0}.$$

Найдем $L_{\text{экв.}}$ при $\omega < \omega_0$, $\Delta\omega < 0$:

$$X = j\omega L_{\text{экв.}} = -j\rho \frac{\omega_0}{2\Delta\omega} = j\rho \frac{\omega_0}{2|\Delta\omega|}, \text{ отсюда } L_{\text{экв.}} = \rho \frac{\omega_0}{2\omega |\Delta\omega|}.$$

Найдем выражения для токов в ветвях параллельного контура без потерь:

$$\begin{aligned} i_L &= \frac{U}{j\omega L} = -j \frac{U}{\omega L}; \quad i_C = U j\omega C; \\ i &= i_L + i_C = U j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) = j \frac{U}{\omega L} \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1 \right). \end{aligned}$$

Вблизи резонанса

$$i_L \approx -j \frac{U}{\omega_0 L} = -j \frac{U}{\rho}; \quad i_C \approx jU\omega_0 C = j \frac{U}{\rho}; \quad i \approx i_L + i_C = 0.$$

В контуре без потерь активная мощность $P_a = 0$, реактивная мощность $P_r = UI$. При этом выше резонанса, где контур ведет себя как эквивалентная индуктивность,

$$P_r = U \frac{U}{\omega L_{\text{экв.}}} = \frac{U^2}{\omega L_{\text{экв.}}},$$

а ниже резонанса, где контур ведет себя как эквивалентная емкость,

$$P_r = -U^2 \omega C_{\text{экв.}}$$

В резонансе

$$|P_r| = \frac{U^2}{\rho}.$$

Мощность не надо путать с энергией, запасаемой в элементах контура,

$$W_C = \frac{CU^2}{2}; \quad W_L = \frac{LI^2}{2}.$$

Параллельный резонансный контур с учетом потерь мощности в его элементах

Параллельный резонансный контур с учетом потерь мощности представлен на рис. 4.4.

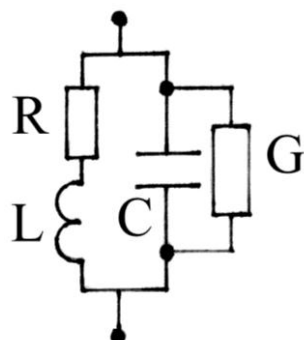


Рис. 4.4. Параллельный резонансный контур с учетом потерь

Реальная индуктивность L всегда имеет омические потери R , а конденсатор – проводимость G . Проводимость контура

$$\dot{Y} = \frac{1}{R + j\omega L} + G + j\omega C = \frac{R - j\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} + G + j\omega C.$$

В реальном случае $R \ll \omega L$ и

$$\dot{Y} = \left(\frac{R}{\omega^2 L^2} + G \right) + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) = G_{\text{экв.}} + jB_{\text{экв.}}$$

Условие резонанса

$$B_{\text{экв.}} = 0; \omega C - \frac{1}{\omega L} = 0; \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Вблизи резонанса

$$\dot{Y} = G_{\text{экв.}} + j\omega_0 C \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = G_{\text{экв.}} + jC \frac{\omega_0}{\omega} \left(\frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0} \right) = G_{\text{экв.}} + j \frac{2\Delta\omega}{\rho\omega_0}.$$

Введем понятие *добротности контура* как отношение реактивного сопротивления к активному (вблизи резонанса):

$$Q = \frac{R_{\text{экв.}}}{\omega_0 L} = \frac{\omega_0 C}{G_{\text{экв.}}}, \text{ тогда } \dot{Y} = G_{\text{экв.}} \left(1 + jQ \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right); \dot{Z} = \frac{R_{\text{экв.}}}{1 + jQ \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}}.$$

Чтобы получить универсальное выражение, вводят обозначения

$$Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} = \xi, \text{ тогда}$$

$$\dot{Y} = G_{\text{ЭКВ.}}(1 + j\xi); \quad \dot{Z} = \frac{R_{\text{ЭКВ.}}}{1 + j\xi} = \frac{R_{\text{ЭКВ.}}}{1 + \xi^2} - j \frac{R_{\text{ЭКВ.}} \xi}{1 + \xi^2} = R + jX;$$

$$|\dot{Z}| = \frac{R_{\text{ЭКВ.}}}{\sqrt{1 + \xi^2}}; \quad R = \frac{R_{\text{ЭКВ.}}}{1 + \xi^2}; \quad X = -\frac{R_{\text{ЭКВ.}} \xi}{1 + \xi^2}; \quad \text{tg } \varphi = \frac{X}{R} = -\xi.$$

На рис. 4.5 представлены функции $f_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}}$, $f_2 = \frac{1}{1 + \xi^2}$, $f_3 = \frac{-\xi}{\sqrt{1 + \xi^2}}$, которые определяют зависимости $|\dot{Z}|$, R и X для параллельного контура вблизи резонанса.

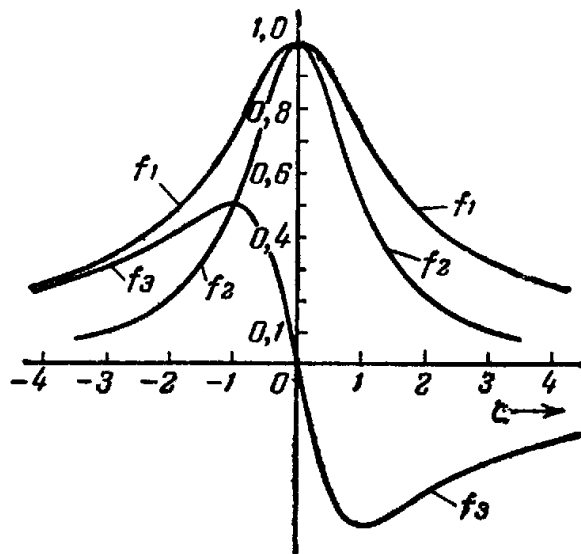


Рис. 4.5. Нормированные кривые модуля и активной и реактивной составляющих полного сопротивления параллельного резонансного контура $f_1 = 1/\sqrt{1 + \xi^2}$; $f_2 = 1/(1 + \xi^2)$; $f_3 = -\xi/(1 + \xi^2)$

Введем понятие *ширины полосы пропускания* $\pm \delta \omega$ как разность частот, при которых модуль полного сопротивления уменьшается до величины $\frac{1}{\sqrt{2}}$ от его значения при резонансе $\frac{|\dot{Z}|}{R_{\text{ЭКВ.}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$, где $\xi = Q \frac{2\delta\omega}{\omega_0} = 1$; $2\delta\omega = \frac{\omega_0}{Q}$; $\frac{2\delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{Q}$. Таким образом, относительная ширина полосы пропускания $\frac{2\delta\omega}{\omega_0}$ обратно пропорциональна добротности

контура Q . $d = \frac{1}{Q}$ носит название коэффициента потерь, или коэффициента затухания контура.

Найдем выражения для токов в ветвях параллельного резонансного контура с учетом потерь (рис. 4.4):

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C + \dot{I}_G.$$

В резонансе

$$I = I_R = \frac{U}{R}; \quad \dot{I}_L = -\dot{I}_C = -j \frac{U}{\rho} \quad \text{при } I_G \ll I_R; \quad \frac{I_C}{I_R} = \frac{I_L}{I_R} = \frac{R}{\rho} = Q.$$

Таким образом, в резонансе реактивные токи в Q раз больше активного тока. Активная мощность $P_a = \frac{U^2}{R}$; реактивная мощность $P_r = \frac{U^2}{\rho}$, $\frac{P_r}{P_a} = Q$.

Последовательный резонансный контур без потерь мощности в его элементах

Рассмотрим последовательный резонансный контур без потерь (рис. 4.6), как это было сделано выше для параллельного контура.

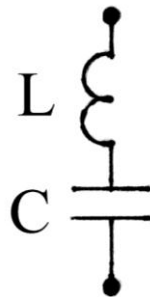


Рис. 4.6. Последовательный резонансный контур без потерь

После несложных преобразований получим, что для последовательного контура без потерь $X = \rho \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$; $C_{\text{экв.}} = -\frac{1}{\rho\omega} \frac{\omega_0}{2\Delta\omega}$; $L_{\text{экв.}} = \frac{\rho}{\omega} \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$. При $\omega < \omega_0$ реактивное сопротивление контура носит емкостный характер $C_{\text{экв.}}$, а при $\omega > \omega_0$ – индуктивный $L_{\text{экв.}}$ (рис. 4.7а, б). Сравнивая рис. 4.3 и 4.7, отметим свойство дуальности параллельного и последовательного контуров.

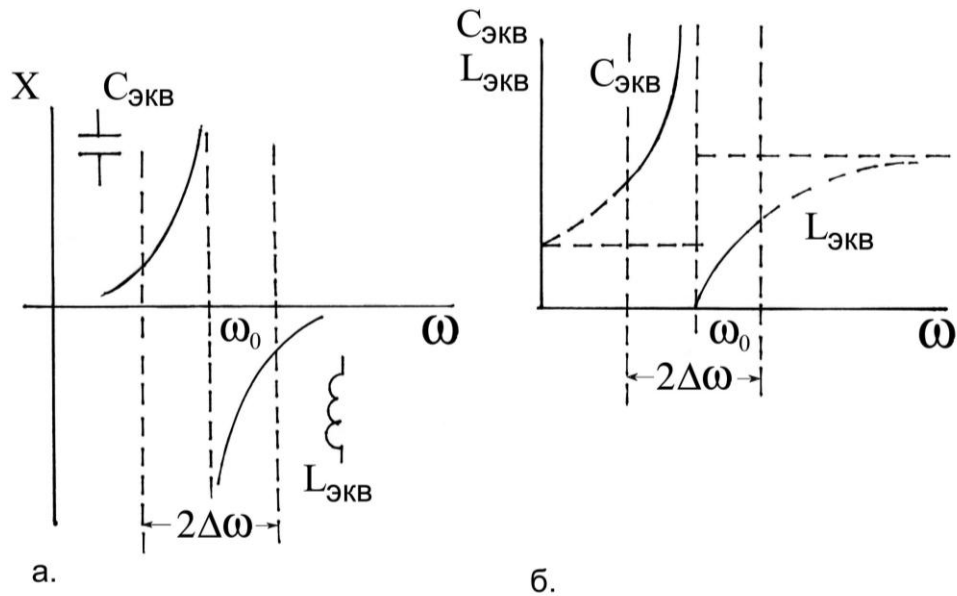


Рис. 4.7. Частотные характеристики

последовательного резонансного контура без потерь:

- а) зависимость реактивного сопротивления последовательного контура от частоты вблизи резонанса;
- б) зависимость эквивалентного сопротивления последовательного контура от частоты вблизи резонанса

Полученные формулы и свойства резонансных контуров будут использованы нами при анализе вариаторов частоты синхроциклотрона ПИЯФ.

Последовательный резонансный контур с учетом потерь мощности в его элементах

Рассмотрим последовательный резонансный контур с учетом потерь мощности в его элементах (рис. 4.8).

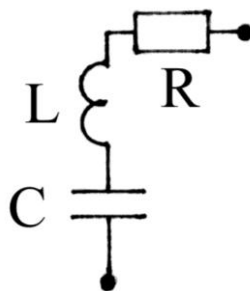


Рис. 4.8. Последовательный резонансный контур с активными потерями

Его сопротивление будет

$$\dot{Z} = R + jX = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\omega L \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0^2},$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Условие резонанса

$$\omega = \omega_0; X = 0.$$

Используя введенные обозначения $\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$, $\xi = Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$,

$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\rho}{R}$, получим, что сопротивление и проводимость последовательного контура с учетом потерь вблизи резонанса $\omega \approx \omega_0$

$$\dot{Z} = R + jX = R(1 + j\xi); \dot{Y} = G + jB = \frac{G}{1 + j\xi};$$

$$|\dot{Z}| = R\sqrt{1 + \xi^2}; R = R; X = R\xi; \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} = \xi;$$

$$|\dot{Y}| = \frac{G}{\sqrt{1 + \xi^2}}; G = \frac{1}{R(1 + \xi^2)}; B = -\frac{\xi}{R(1 + \xi^2)}.$$

Заметим, что графики f_1 , f_2 и f_3 (рис. 4.5) отражают зависимости и для последовательного контура.

4.2. Радиотехнические системы с распределенными параметрами

Радиотехнические системы с распределенными параметрами R, L, C можно условно разделить на три группы:

- 1) линии электропередачи (погонные величины R, L, C изменяются вдоль одной оси координат X, Y, Z);
- 2) мембраны (R, L, C изменяются вдоль двух осей координат X, Y, Z);
- 3) объемные резонаторы (R, L, C изменяются вдоль всех трех координат).

Линии электропередачи

Однородные линии

Рассмотрим двухпроводную однородную линию электропередачи, подключенную с одного конца к генератору напряжения \dot{U}_r и нагруженную с другого конца на комплексное сопротивление нагрузки \dot{Z}_n (рис. 4.9).

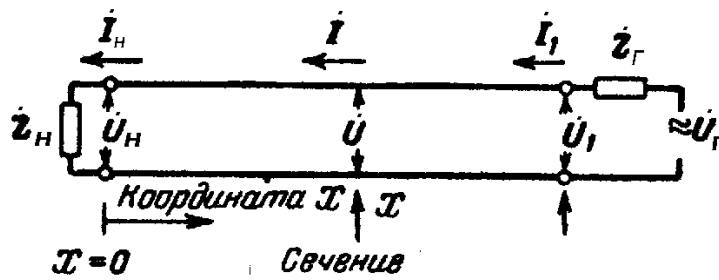


Рис. 4.9. Принципиальная схема однородной линии

Координату X вдоль длины линии будем отсчитывать от места подключения нагрузки Z_H в направлении к возбуждающему линию генератору Z_G . \dot{U} и \dot{I} – комплексные амплитуды напряжения и тока в точке линии, отстоящей от ее начала на расстоянии x . Выделим в линии элемент dx , находящийся на расстоянии x от начала линии. Радиотехнические параметры этого элемента dx представлены на рис. 4.10.

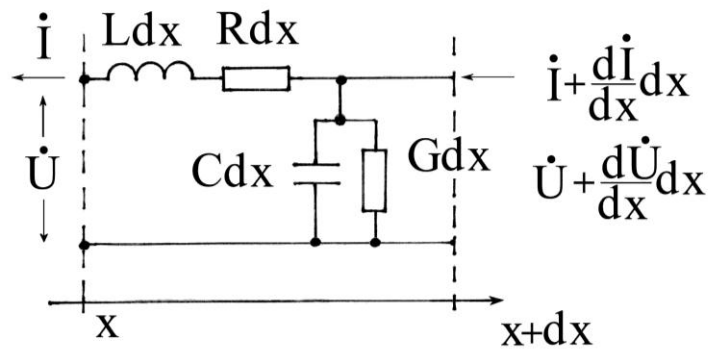


Рис. 4.10. Элемент линии длиной dx . R (Ом/м), L (Гн/м), C (Ф/м), G (1/Ом·м) – погонные величины сопротивления, индуктивности, емкости и проводимости для рассматриваемого участка линии. Rdx , Ldx , Cdx , Gdx – величины сопротивления, индуктивности, емкости и проводимости для участка линии длиной dx

Используя закон Ома для четырехполюсника (рис. 4.10), получим

$$\begin{cases} \left(\dot{U} + \frac{d\dot{U}}{dx} \right) - \dot{U} = \dot{I} (R + j\omega L) dx \\ \left(\dot{I} + \frac{d\dot{I}}{dx} \right) = \dot{I} + \dot{U} (G + j\omega C) dx \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}}{dx} = \dot{I}(R + j\omega L) dx \\ \frac{d\dot{I}}{dx} = U(G + j\omega C) dx \end{cases} \quad (4.3)$$

Уравнения (4.3) можно преобразовать к виду

$$\frac{d^2\dot{U}}{dx^2} - \kappa^2\dot{U} = 0; \quad \frac{d^2\dot{I}}{dx^2} - \kappa^2\dot{I} = 0, \quad (4.4)$$

где $\kappa = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \kappa_\alpha + j\kappa_\beta$. Уравнения (4.4) называются волновыми уравнениями однородной линии, решение которых может быть представлено в виде

$$\dot{U} = \dot{A}e^{\kappa x} + \dot{B}e^{-\kappa x}; \quad \dot{I} = \frac{1}{R + j\omega L} \frac{d\dot{U}}{dx} = \frac{\kappa}{R + j\omega L} (\dot{A}e^{\kappa x} - \dot{B}e^{-\kappa x}). \quad (4.5)$$

Так как $\frac{R + j\omega L}{\kappa} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \dot{\rho} = \rho_\alpha + j\rho_\beta$ — комплексное волновое сопротивление линии, то

$$\dot{I} = \frac{1}{\dot{\rho}} (\dot{A}e^{\kappa x} - \dot{B}e^{-\kappa x}). \quad (4.6)$$

Рассмотрим физический смысл полученных уравнений (4.5) и (4.6). Переходя от комплексных амплитуд к действительным, получим

$$\dot{u} = Ae^{\kappa x + j\omega t} + Be^{-\kappa x + j\omega t} = Ae^{\kappa_\alpha x} e^{j(\omega t + \kappa_\beta x)} + Be^{-\kappa_\alpha x} e^{j(\omega t - \kappa_\beta x)}. \quad (4.7)$$

Полученное решение есть сумма прямой (по направлению x) и обратной (против x) волны. Коэффициент κ_α характеризует затухание. Амплитуда прямой и обратной волн уменьшается по мере их распространения, причем затухание амплитуд для прямой и обратной волн всегда > 0 и одинаково по величине. Фаза прямой волны $\omega t + \kappa_\beta x = \varphi_{пр.}$. Фаза обратной волны $\omega t - \kappa_\beta x = \varphi_{обр.}$. Из (4.7) можно найти скорость распространения волны. Зафиксируем «нулевую» фазу $\omega t + \kappa_\beta x = 0$, отсюда фазовая скорость

$$V_\varphi = \frac{dx}{dt} = \frac{-\omega}{\kappa_\beta}.$$

Бегущая в линии волна переносит мощность

$$P = \frac{1}{2}IU = \frac{1}{2}I^2\rho = \frac{1}{2} \frac{U^2}{\rho}.$$

При согласовании линии $\dot{Z}_H = \dot{\rho}$, когда имеется только падающая волна, эта мощность P_0 полностью подводится к сопротивлению нагрузки \dot{Z}_H и поглощается в ее активной части. При $\dot{Z}_H \neq \dot{\rho}$ отраженная волна уносит часть этой мощности обратно. Поглощенная в \dot{Z}_H мощность при этом равна

$$P = \frac{1}{2} I_{\min} U_{\max} = \frac{1}{2} I_{\max} U_{\min} = \frac{1}{2} m I_{\max}^2 \rho = \frac{1}{2} m \frac{U_{\max}^2}{\rho} = m P_0.$$

Таким образом, только бегущие волны передают в нагрузку мощность. В режиме стоячей волны мощность в нагрузку не поступает.

Однородная линия без потерь мощности

В системах, рассматриваемых нами в дальнейшем, погонные омические сопротивления много меньше их реактивных сопротивлений $R \ll 1 / \omega C$, $R \ll \omega L$. Поэтому рассмотрим свойства линии без потерь.

Полагая $R = 0$, $G = 0$, получим

$$\kappa_\alpha = 0; \kappa_\beta = \omega \sqrt{LC}; \kappa = j \omega \sqrt{LC},$$

и фазовая скорость распространения волны

$$V_\phi = \frac{1}{\sqrt{LC}} = V_{\text{св.}}; \kappa_\beta = \frac{\omega}{V_{\text{св.}}} = \frac{2\pi}{TV_{\text{св.}}} = \frac{2\pi}{\lambda},$$

где $V_{\text{св.}}$ – скорость распространения света. Заметим, что в линии с учетом потерь скорость распространения волны меньше $V_{\text{св.}}$ (то же можно сказать и о неоднородной линии). Если линия расположена в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ , то скорость распространения волны будет

$$V_\phi = \frac{V_{\text{св.}}}{\sqrt{\epsilon}}.$$

Для линии без потерь волновые уравнения вместо (4.5) будут иметь вид

$$\dot{U} = A e^{j \frac{2\pi x}{\lambda}} + B e^{-j \frac{2\pi x}{\lambda}}; \dot{I} = \frac{1}{\rho} \left(A e^{j \frac{2\pi x}{\lambda}} - B e^{-j \frac{2\pi x}{\lambda}} \right). \quad (4.8)$$

Определим постоянные A и B . При $x = 0$

$$U = U_H = A + B; I = I_H = \frac{1}{\rho} (A - B); U_H = I_H Z_H. \quad (4.9)$$

Из системы (4.9) находим

$$A = \frac{U_H + \rho I_H}{2} = \frac{U_H}{2} \left(1 + \frac{\rho}{Z_H} \right); B = \frac{U_H - \rho I_H}{2} = \frac{U_H}{2} \left(1 - \frac{\rho}{Z_H} \right).$$

Отметим, что уравнения (4.8) с учетом формул Эйлера

$$\cos \alpha = \frac{e^{j\alpha} + e^{-j\alpha}}{2}, \quad \sin \alpha = \frac{e^{j\alpha} - e^{-j\alpha}}{2j}$$

могут быть также записаны в виде

$$\dot{U} = \dot{U}_H \cos \frac{2\pi x}{\lambda} + j \dot{I}_H \rho \sin \frac{2\pi x}{\lambda}; \quad \dot{I} = \dot{I}_H \cos \frac{2\pi x}{\lambda} + j \frac{\dot{U}_H}{\rho} \sin \frac{2\pi x}{\lambda}. \quad (4.10)$$

Введем коэффициент отражения

$$\dot{\Gamma} = \frac{B}{A} = \frac{\dot{Z}_H - \rho}{\dot{Z}_H + \rho}. \quad (4.11)$$

Заметим, что коэффициент отражения не зависит от x , т. е. одинаков для любого сечения линии. Модуль $|\dot{\Gamma}|$ – это отношение амплитуды обратной волны к амплитуде прямой волны в нагрузке линии (в точке $x = 0$). Фаза $\dot{\Gamma}$ – это разность фаз между прямой и обратной волнами в нагрузке линии (в точке $x = 0$).

Введем эквивалентное сопротивление линии в сечении x . Учитывая (4.10), получим

$$\dot{Z}_x = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{\dot{Z}_H + j\rho \operatorname{tg} \frac{2\pi x}{\lambda}}{1 + j \frac{\dot{Z}_H}{\rho} \operatorname{tg} \frac{2\pi x}{\lambda}}. \quad (4.12)$$

Использование зависимости (4.12) позволяет преобразовать линию длины ℓ с нагрузкой \dot{Z}_H в эквивалентную ей укороченную линию длины $\ell - x$ с нагрузкой \dot{Z}_x (рис. 4.11а, б).

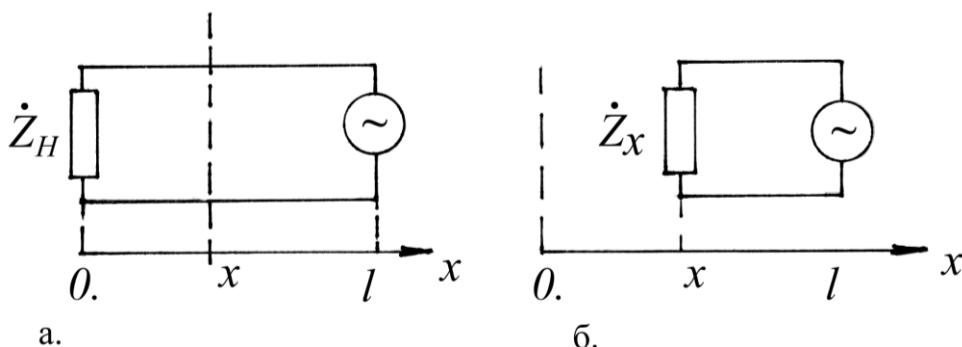


Рис. 4.11. Схема преобразования длины линии: а) линия длины ℓ с нагрузкой \dot{Z}_H ; б) линия длины $\ell - x$ с нагрузкой \dot{Z}_x

Рассмотрим частные случаи однородной линии без потерь, которые широко применяются в радиотехнике и имеют непосредственное отношение к дуантной системе синхроциклотрона и системе растяжки пучка с использованием C -электрода.

В случае *короткозамкнутой линии* ($\dot{Z}_n = 0$) $U_n = 0$ и вместо (4.10) получим

$$\dot{U} = j\dot{I}_n \rho \sin \frac{2\pi x}{\lambda}; \dot{I} = \dot{I}_n \cos \frac{2\pi x}{\lambda}.$$

Коэффициент отражения (4.11) для короткозамкнутой линии $\Gamma = -1$, $|\Gamma| = 1$. Это означает, что амплитуда обратной волны равна амплитуде падающей, а фаза $\dot{\Gamma}$ равна 180° . В линии образуется стоячая волна.

Эквивалентное сопротивление (4.12) для короткозамкнутой линии будет

$$\dot{Z}_x = j\rho \operatorname{tg} \frac{2\pi x}{\lambda} = jX(x).$$

Зависимость входного реактивного сопротивления X короткозамкнутой линии от относительной длины линии x/λ изображена на рис. 4.12. Таким образом, реактивное сопротивление X может иметь как индуктивный ($X > 0$), так и емкостный ($X < 0$) характер. Заметим, что через интервал длины линии $\Delta x = \frac{\lambda}{2}$ ее сопротивление становится равным нулю, и в этих точках стоячей волны возникают узлы напряжения и пучности тока (рис. 4.13). Заметим также, что свойства линии на отдельных ее участках эквивалентны свойствам контуров: на участках, где $X > 0$, эквивалентны параллельному контуру, на участках, где $X < 0$, – последовательному.

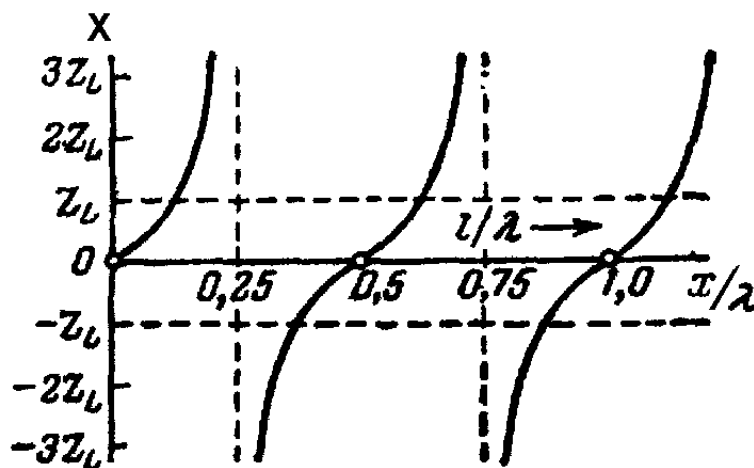


Рис. 4.12. Входное реактивное сопротивление короткозамкнутой линии

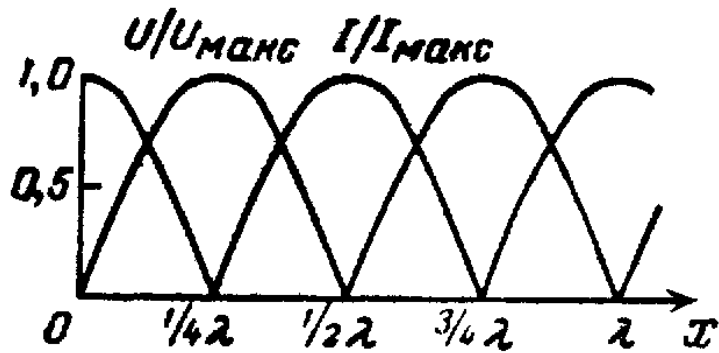


Рис. 4.13. Ток и напряжение вдоль короткозамкнутой линии

Для линии, разомкнутой на конце ($\dot{Z}_H = \infty$), $I_H = 0$ и вместо (4.10) получим

$$\dot{U} = \dot{U}_H \cos \frac{2\pi x}{\lambda}; \quad \dot{I} = j \frac{\dot{U}_H}{\rho} \sin \frac{2\pi x}{\lambda}.$$

Коэффициент отражения (4.11) для разомкнутой линии $\Gamma = 1$. Это означает, что амплитуда обратной волны равна амплитуде падающей, а фаза равна нулю. В линии образуется стоячая волна.

Эквивалентное сопротивление (4.12) для разомкнутой линии будет

$$\dot{Z}_x = -j\rho \operatorname{ctg} \frac{2\pi x}{\lambda} = jX(x).$$

Зависимость входного реактивного сопротивления X для разомкнутой линии от относительной длины линии x/λ изображена на рис. 4.14. Через интервал длины линии $\Delta x = \frac{\lambda}{2}$ ее сопротивление становится равным нулю, и в этих точках возникают узлы тока и пучности напряжения (рис. 4.15).

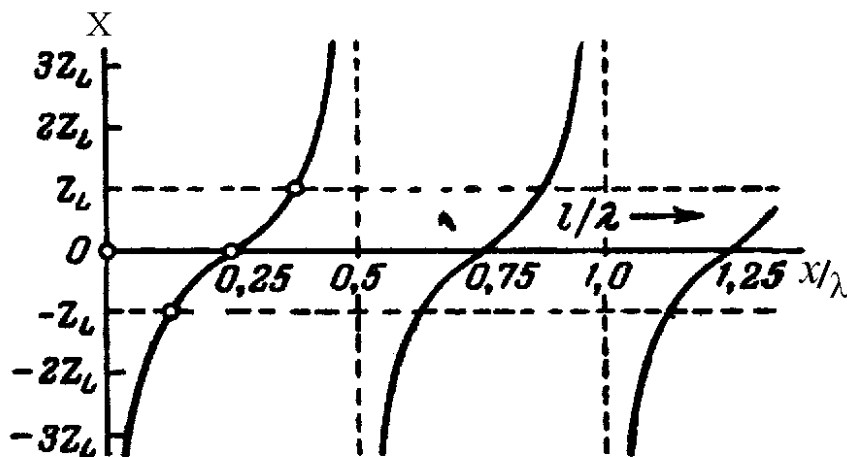


Рис. 4.14. Входное реактивное сопротивление разомкнутой линии

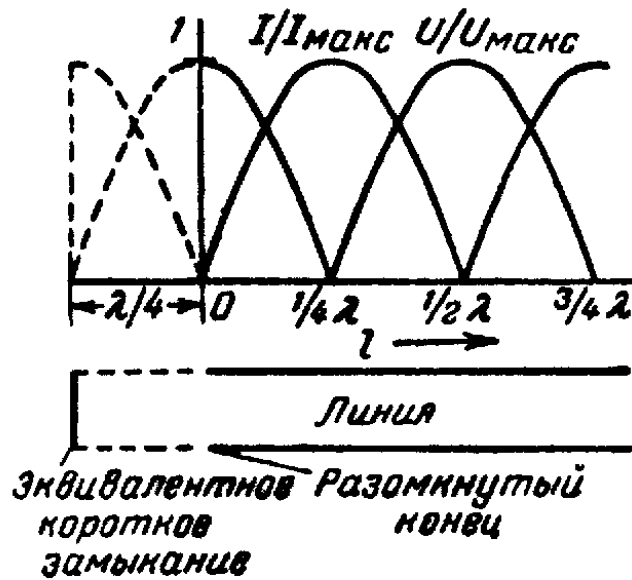


Рис. 4.15. Ток и напряжение вдоль разомкнутой линии

Пусть длина линии, замкнутой на реактивное индуктивное сопротивление ($\dot{Z}_H = j\omega L$), равна ℓ . Рассмотрим короткозамкнутую линию, длина которой больше длины исходной линии ℓ на величину ℓ_L (рис. 4.16а, б).

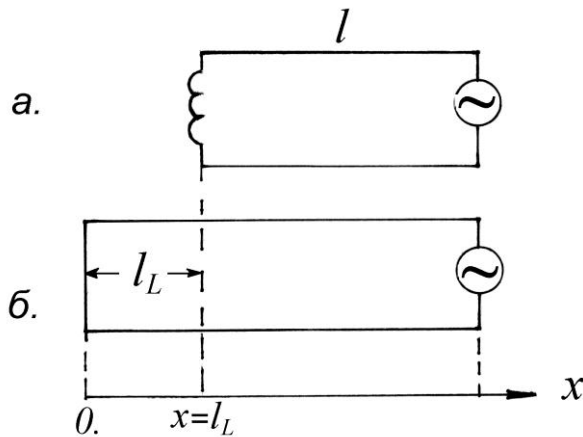


Рис. 4.16. Схема преобразования длины линии: а) линия длиной ℓ с индуктивной нагрузкой; б) короткозамкнутая линия длиной $\ell + x$

Согласно (4.12) эквивалентное сопротивление линии в сечении $x = \ell_L$ будет

$$\dot{Z}_x = j\rho \operatorname{tg} \frac{2\pi \ell_L}{\lambda}.$$

Отсюда

$$\ell_L = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{\rho}.$$

Таким образом, индуктивную нагрузку линии можно заменить короткозамкнутым отрезком линии длины ℓ_L , и исследование линии сводится к вышеописанному случаю короткозамкнутой линии длиной $\ell + \ell_L$.

Для случая линии, замкнутой на реактивное емкостное сопротивление $\left(\dot{Z}_H = \frac{1}{j\omega C} \right)$, аналогично предварительно рассмотрим разомкнутую линию, длина которой больше исходной на величину ℓ_C (рис. 4.17а, б).

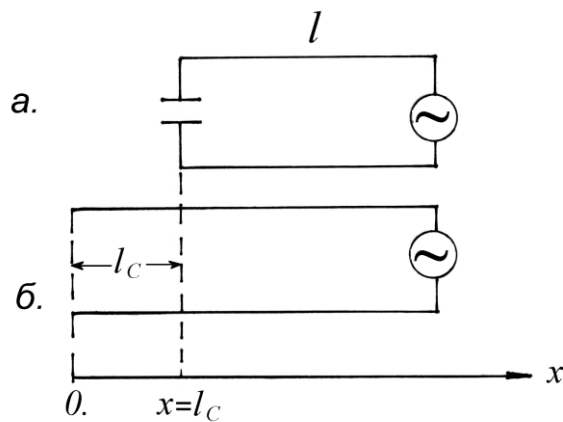


Рис. 4.17. Схема преобразования длины линии: а) линия длиной ℓ с емкостной нагрузкой; б) разомкнутая линия длиной $\ell + x$

Согласно (4.12) эквивалентное сопротивление линии в сечении $x = \ell_C$ будет

$$\dot{Z}_x = j\rho \operatorname{tg} \frac{2\pi \ell_C}{\lambda}. \quad (4.13)$$

Отсюда

$$\ell_C = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arcctg} \frac{1}{\rho\omega C}.$$

Таким образом, емкостную нагрузку линии можно заменить разомкнутым отрезком линии длины ℓ_C , и исследование линии сводится к вышеописанному случаю разомкнутой линии длиной $\ell + \ell_C$.

Отметим, что во всех разобранных выше четырех случаях $\frac{U_{\max}}{I_{\max}} = \rho$.

Для линии, замкнутой на активное сопротивление ($Z_{\text{н}} = R$), рассмотрим случай $Z_{\text{н}} = \rho$. В этом случае справедливы уравнения (4.10), и коэффициент отражения (4.11) будет

$$\dot{I} = \frac{\dot{Z}_{\text{н}} - \rho}{\dot{Z}_{\text{н}} + \rho} = 0,$$

т. е. отраженная волна отсутствует и есть только одна волна, бегущая от генератора к нагрузке. Такой режим не зависит от длины линии.

Рассмотрим линию, нагруженную активным сопротивлением произвольной величины ($Z_{\text{н}} = R = m\rho$). Пусть $m = \frac{R}{\rho} > 1$, тогда, используя (4.10), получим

$$\dot{U} = \dot{U}_{\text{н}} \left(\cos \frac{2\pi x}{\lambda} + j \frac{1}{m} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \right); \quad \dot{I} = \dot{I}_{\text{н}} \left(\cos \frac{2\pi x}{\lambda} + jm \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \right)$$

и их модули

$$U = U_{\text{н}} \sqrt{\cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda} + \frac{1}{m^2} \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda}}; \quad I = I_{\text{н}} \sqrt{\cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda} + m^2 \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda}}. \quad (4.14)$$

Найдем минимальные и максимальные значения модуля напряжения U . Запишем (4.14) иначе:

$$U = U_{\text{н}} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{m^2} - 1 \right) \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda}}. \quad (4.15)$$

Из (4.15) видно, что $U_{\text{min}} = U_{\text{н}}$, когда $\sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda} = 0$, и $U_{\text{max}} = \frac{U_{\text{н}}}{m}$, когда $\sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda} = 1$. Отношение $\frac{U_{\text{min}}}{U_{\text{max}}} = m$ называют коэффициентом бегущей

волны – КБВ. Обратную величину $\frac{1}{m}$ называют коэффициентом стоячей волны – КСВ. Если m близко к единице $m = 1 - \Delta m$, то $< \Delta m$ называют рассогласованием.

На рис. 4.18 приведены нормированные зависимости U/U_{max} и I/I_{max} от длины волны λ при $m = 0,5$. Кривые имеют одинаковую форму и смещены на $\lambda/4$ относительно друг друга. На рис. 4.19 приведены зависимости U/U_{max} при различных m от 1 до 0. При $m \neq 1$ в линии устанавливается суперпозиция стоячих и бегущих волн. Заметим, что U_{max} (определяющее пробивную прочность линии) в $\frac{1}{\sqrt{m}}$ раз больше, чем напряжение в согласованной линии.

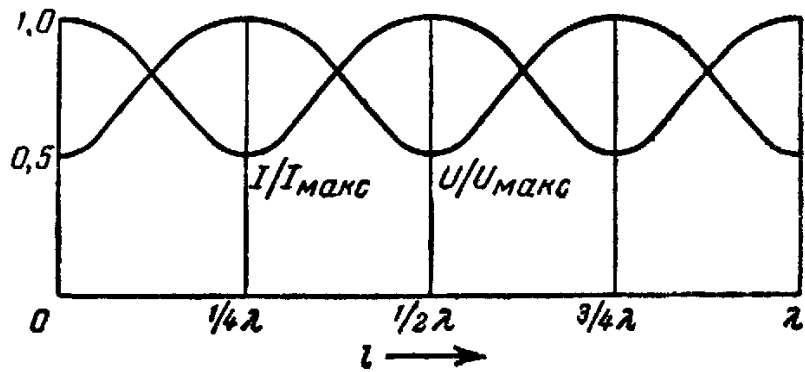


Рис. 4.18. Ток и напряжение вдоль линии, нагруженной активным сопротивлением $Z_H = m\rho$

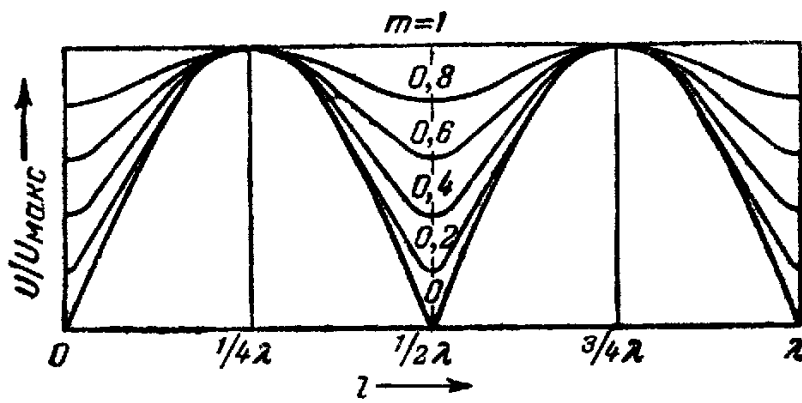


Рис. 4.19. Кривые напряжения при разных m

Если линия нагружена произвольным сопротивлением \dot{Z}_H , то, согласно (4.12), комплексное сопротивление нагрузки можно заменить активным сопротивлением $m\rho$ с добавлением перед ним отрезка линии длиной l' . Тогда

$$\dot{Z}(x) = \rho \frac{m + j \operatorname{tg} 2\pi \frac{l' + x}{\lambda}}{1 + j m \operatorname{tg} 2\pi \frac{l' + l(x)}{\lambda}}$$

и исследование линии сводится к варианту, разобранным ранее.

На рис. 4.20а–в показаны распределения в линии напряжений и токов при различных видах нагрузки.

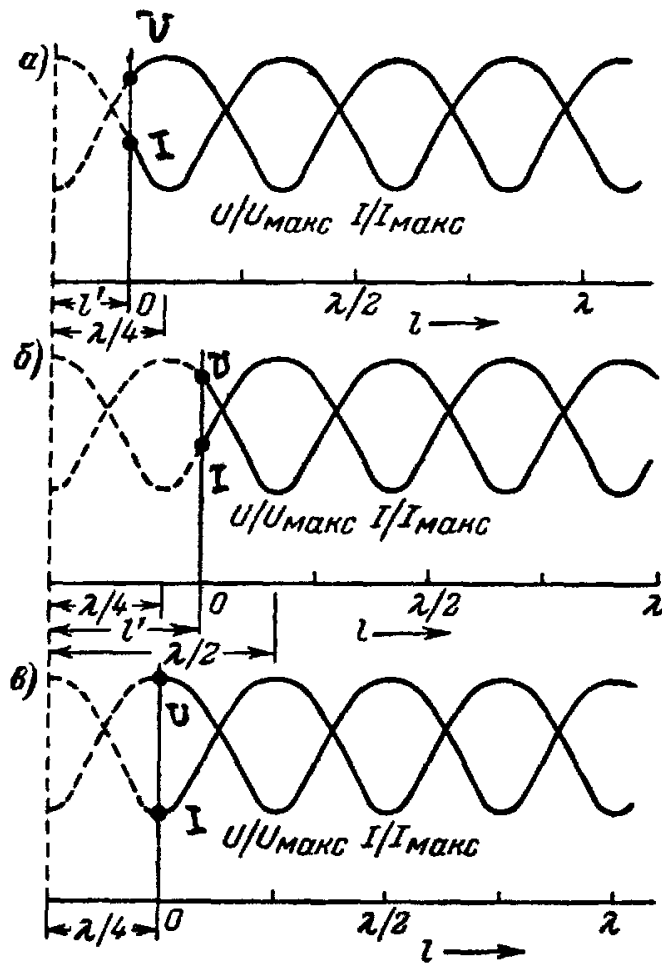


Рис. 4.20. Кривые напряжения при комплексных нагрузках:
 а) нагрузка с индуктивной фазой; б) нагрузка с емкостной фазой;
 в) активная нагрузка

Коэффициент перекрытия резонансной частоты линии

В связи с тем что для работы синхроциклотрона требуется пере-стройка резонансной частоты его ускоряющей системы, рассмотрим воп-рос о коэффициенте перекрытия частоты в линии.

Рассмотрим отрезок линии длиной l , нагруженный переменным емкостным сопротивлением (рис. 4.21). Согласно (4.12), сопротивление линии в точке $x = 0$ будет

$$Z_{x=0} = \rho \frac{-j \frac{1}{\omega C} + j \rho \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda}}{1 + \frac{1}{\rho \omega C} \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda}}.$$

В резонансе $Z_{x=0} = \infty$, следовательно,

$$1 + \frac{1}{\rho \omega C} \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda} = 0; \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda} = -\rho \omega C. \quad (4.16)$$

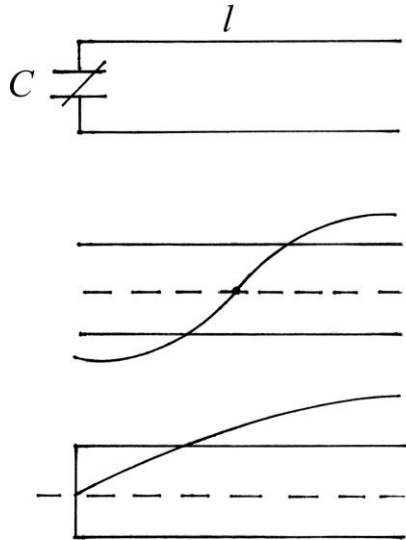


Рис. 4.21. Коэффициент перекрытия резонансной частоты линии

Определим, как меняется резонансная длина волны линии при изменении емкостной нагрузки от C_{\min} до C_{\max} в пределе $C_{\min} = 0$, $C_{\max} = \infty$. При $C = 0$ из (4.16) следует, что $\frac{2\pi\ell}{\lambda_1} = \pi$ и $\lambda_1 = 2\ell$. При $C = \infty$ из (4.16)

следует, что $\frac{2\pi\ell}{\lambda_2} = \frac{\pi}{2}$ и $\lambda_2 = 4\ell$. Коэффициент перекрытия по частоте

$$K_f = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{4\ell}{2\ell} = 2.$$

Распределение эпюр напряжений для этих случаев показано на рис. 4.21. Таким образом, реальный коэффициент перекрытия по частоте для однородной линии не может быть больше двух, $K_f = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} \leq 2$.

Неоднородные линии

Как отмечалось выше, для ускорения протонов до энергии 1 ГэВ в синхроциклотроне ПИЯФ требуется перекрытие по частоте

$$K_f = \frac{\omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{к}}} = \frac{E_0 + W_{\text{к}}}{E_0} \frac{B_0}{B_{\text{к}}} = 2,3,$$

где $\omega_{\text{н}}$ – частота ускоряющей системы в начале цикла ускорения; $\omega_{\text{к}}$ – частота ускоряющей системы в конце цикла ускорения. Обеспечить величину перекрытия $K_f = 2,3$ в однородной линии невозможно, т. к. для нее $K_f \leq 2$. Реализовать $K_f > 2$ возможно в неоднородной линии с переменным по длине линии волновым сопротивлением $\rho(x)$.

Покажем, как изменяется коэффициент K_f в случае использования неоднородной линии. Ограничимся простейшим случаем, когда линия длиной l состоит из двух отрезков длиной l_1 и l_2 , имеющих разные параметры ρ_1 и ρ_2 (рис. 4.22):

$$\rho_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}; \rho_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}.$$

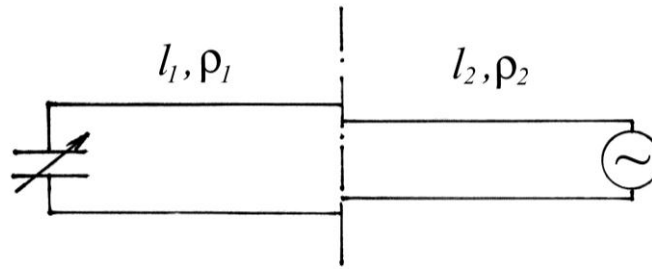


Рис. 4.22. Схема двухступенчатой неоднородной линии

Как известно, в однородной линии $\frac{U}{I} = \rho$. В рассматриваемой линии

$$\frac{U_1}{\rho_1} = \frac{U_2}{\rho_2} = I; \quad \frac{U_2}{U_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

На границе отрезков l_1 и l_2 имеется излом в эюре распределения напряжения и тока. Для простоты будем считать $l_1 = l_2 = l/2$. Сопротивление на стыке двух отрезков при $x = l/2$, согласно (4.13), будет

$$\dot{Z}(l/2) = j\rho_1 \operatorname{tg} \frac{2\pi l/2}{\lambda} = j\rho_1 \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda}.$$

Используя (4.12), найдем входное сопротивление линии $x = l$:

$$\dot{Z}_{\text{вх.}} = \frac{\dot{Z}_{\text{н}} + j\rho_2 \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda}}{1 + j \frac{\dot{Z}_{\text{н}}}{\rho_2} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda}} = \frac{j\rho_1 \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda} + j\rho_2 \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda}}{1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda}} = \frac{j(\rho_1 + \rho_2) \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda}}{1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \operatorname{tg}^2 \frac{\pi l}{\lambda}}.$$

При $C = \infty$ короткозамкнутая линия $\dot{Z}_{\text{вх.}} = 0$:

$$\operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda} = 0; \quad \frac{\pi l}{\lambda} = 2\pi; \quad \lambda = \frac{l}{2}.$$

При $C = 0$ разомкнутая линия $\dot{Z}_{\text{вх.}} = \infty$:

$$1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \operatorname{tg}^2 \frac{\pi l}{\lambda} = 0; \quad \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda} = 1; \quad \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda} = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}};$$

$$\lambda = \frac{\pi \ell}{\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}} = \frac{4\ell}{\frac{4}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}}.$$

Если $\rho_1 = \rho_2$, то $\operatorname{arctg} 1 = \pi/4$ и $\lambda = 4\ell$. Если $\rho_1 > \rho_2$, то $\frac{4}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} < 1$

и $\lambda > 4\ell$. Если $\rho_2 > \rho_1$, то $\frac{4}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} > 1$ и $\lambda < 4\ell$.

Таким образом, коэффициент перекрытия по частоте

$$K_f = \frac{f_{\text{н}}}{f_{\text{к}}} = \frac{\lambda_{\text{к}}}{\lambda_{\text{н}}} = \frac{2}{4\pi \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}},$$

и при $\rho_1 > \rho_2$ $K_f = \frac{f_{\text{н}}}{f_{\text{к}}} > 2$, при $\rho_1 < \rho_2$ $K_f = \frac{f_{\text{н}}}{f_{\text{к}}} < 2$, при $\rho_1 = \rho_2$ $K_f = \frac{f_{\text{н}}}{f_{\text{к}}} = 2$.

В общем случае неоднородной линии, способы расчета которой будут приведены в дальнейшем, для получения коэффициента перекрытия по частоте > 2 необходимо, чтобы волновое сопротивление линии $\rho(x)$ убывало вдоль длины линии x . Заметим, что в качестве предельного случая неоднородной линии можно рассматривать контур с сосредоточенными параметрами L, C ($\rho_1 \rightarrow \infty, \rho_2 \rightarrow 0$), для которого, как известно, коэффициент перекрытия может быть любым, вплоть до ∞ .

Неоднородная линия с переменным волновым сопротивлением

Рассмотрим одномерную задачу. Пусть задана линия, у которой индуктивность $L(x)$ и емкость $C(x)$, рассчитанные на единицу длины, являются функциями от x . В этом случае имеем

$$\frac{1}{\sqrt{L(x)C(x)}} = c; \quad \sqrt{\frac{L(x)}{C(x)}} = \rho(x),$$

где c – скорость света; $\rho(x)$ – волновое сопротивление линии.

Уравнения линии можно записать в виде

$$\frac{dV}{dx} = -j\omega L(x)I(x); \quad \frac{dI}{dx} = -j\omega C(x)V(x).$$

Исключая из этих уравнений I , получим

$$\frac{d^2V}{dx^2} - \frac{\rho'}{\rho} \frac{dV}{dx} + k^2V = 0, \quad \text{где } k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

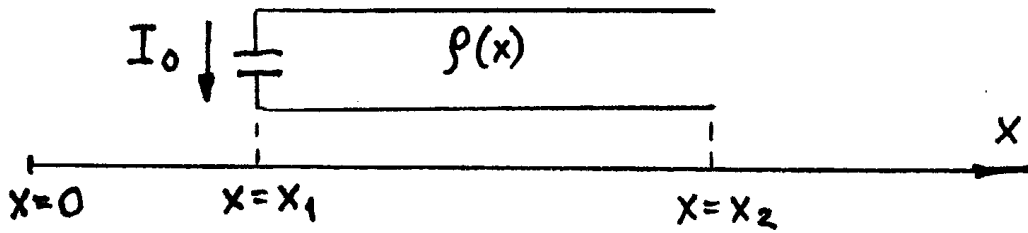


Рис. 4.23. Схема линии с переменным волновым сопротивлением $\rho(x)$

Рассмотрим в качестве примера отрезок линии с переменным волновым сопротивлением, изменяющимся по закону $\rho = \frac{A}{x}$, где $A = \text{const}$, разомкнутый на конце, и к началу которого подключен вариатор частоты (рис. 4.23). В этом случае уравнение линии принимает вид

$$\frac{d^2V}{dx^2} - \frac{1}{x} \frac{dV}{dx} + k^2V = 0.$$

Условия на концах линии записываются в виде

$$\left. \frac{dV}{dx} \right|_{x=x_1} = -j\omega L(x_1)I_0 = -jk\rho(x_1)I_0;$$

$$\left. \frac{dV}{dx} \right|_{x=x_2} = 0.$$

Решение уравнения при заданных граничных условиях имеет вид

$$V(x) = -j\rho(x_1)I_0 \frac{J_0(kx) - N_0(kx) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)}}{N_1(kx_1) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)} - J_1(kx_1)}.$$

Здесь $J_n(kx)$ и $N_n(kx)$ – функция Бесселя 1 и 2-го рода.

Условие последовательного резонанса отрезка линии выражается в виде

$$J_0(kx_1) - N_0(kx_1) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)} = 0.$$

Условие параллельного резонанса

$$N_1(kx_1) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)} - J_1(kx_1) = 0.$$

Входное сопротивление линии

$$Z_{\text{вх.}} = \frac{U(x_1)}{I_0} = -j\rho(x_1) \frac{J_0(kx_1) - N_0(kx_1) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)}}{N_1(kx_1) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)} - J_1(kx_1)}.$$

Коэффициент трансформации напряжения от конца к началу линии

$$n_g = \frac{U(x_1)}{U(x_2)} = \frac{J_0(kx_1) - N_0(kx_1) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)}}{J_0(kx_2) - N_0(kx_2) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)}}.$$

Метод расчета неоднородной линии с переменным волновым сопротивлением

Одной из возможностей аппроксимации дуанта синхроциклотрона является представление его в виде неоднородной ступенчатой линии, состоящей из последовательно соединенных отрезков линии с разными волновыми сопротивлениями (рис. 4.24).

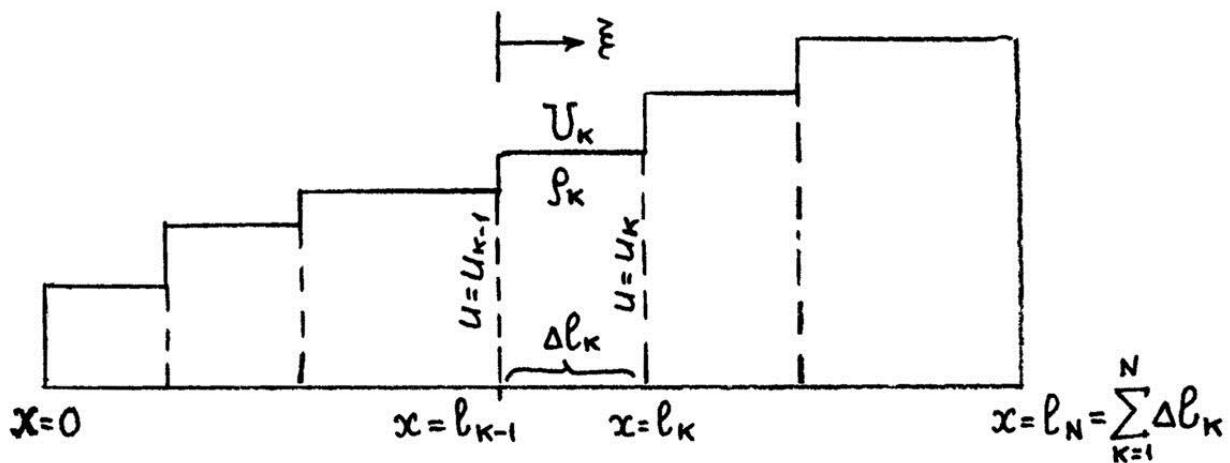


Рис. 4.24. Схема дуанта в виде отдельных участков с разными волновыми сопротивлениями

Разобьем дуант на N участков (отрезков) перпендикулярно его продольной оси. Рассмотрим k -й отрезок, заключенный в пределах от $x = l_{k-1}$ до $x = l_k$. Длины каждого из отрезков обозначим через $\Delta l_k = l_k - l_{k-1}$, а его волновое сопротивление через ρ_k . Входное сопротивление линии в точке $x = l_k$ обозначим через X_k :

$$X_k = \frac{X_{k-1} + \rho_k \operatorname{tg} \frac{2\pi \Delta \ell_k}{\lambda}}{1 - \frac{X_{k-1}}{\rho_k} \operatorname{tg} \frac{2\pi \Delta \ell_k}{\lambda}}.$$

На конце первого отрезка

$$X_1 = -\rho_1 \operatorname{ctg} \frac{2\pi \Delta \ell_1}{\lambda}.$$

Распределение напряжения вдоль каждого из отрезков может быть записано в виде

$$U_k(\xi) = V_k \cos \left(\frac{2\pi \xi}{\lambda} + \varphi_k \right),$$

где V_k – амплитуда напряжения на k -м отрезке, а φ_k – фаза. Координата ξ отсчитывается от начала каждого k -го отрезка.

Найдем рекуррентные соотношения для определения U_k . Для этого заменим отрезок линии, находящийся перед k -м отрезком и имеющий входное сопротивление X_{k-1} , на отрезок линии, разомкнутой на конце и имеющей волновое сопротивление ρ_k и входное сопротивление X_{k-1} . Длину этого отрезка обозначим через ℓ'_{k-1} . Получаем

$$\ell'_{k-1} = \begin{cases} \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{\rho_k}{|X_{k-1}|} & \text{при } X_{k-1} < 0 \\ \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{\rho_k}{X_{k-1}} & \text{при } X_{k-1} > 0 \end{cases}.$$

Таким образом, мы имеем отрезок линии с волновым сопротивлением ρ_k , имеющий длину $\Delta \ell_k + \ell'_{k-1}$ и разомкнутый на конце. Напряжение на левом разомкнутом конце этой линии равно U_k . В начале и в конце k -го отрезка имеем

$$U_k = V_k \cos \frac{2\pi(\Delta \ell_k + \ell'_{k-1})}{\lambda};$$

$$U_{k-1} = V_k \cos \frac{2\pi \ell'_{k-1}}{\lambda} = V_{k-1} \cos \frac{2\pi(\Delta \ell_{k-1} + \ell'_{k-2})}{\lambda}.$$

Отсюда следуют соотношения

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\cos \frac{2\pi \Delta \ell_1}{\lambda}}{\cos \frac{2\pi \ell'_1}{\lambda}};$$

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{\cos \frac{2\pi(\Delta\ell_2 + \ell'_1)}{\lambda}}{\cos \frac{2\pi\ell'_2}{\lambda}}; \dots; \frac{V_k}{V_{k-1}} = \frac{\cos \frac{2\pi(\Delta\ell_{k-1} + \ell'_{k-2})}{\lambda}}{\cos \frac{2\pi\ell'_{k-1}}{\lambda}} \dots$$

Таким образом, получаем выражение для амплитуды напряжения на k -м отрезке в виде

$$\frac{V_k}{V_1} = \frac{\cos \frac{2\pi\Delta\ell_1}{\lambda} \cos \frac{2\pi(\Delta\ell_2 + \ell'_1)}{\lambda} \dots \cos \frac{2\pi(\Delta\ell_{k-1} + \ell'_{k-2})}{\lambda}}{\cos \frac{2\pi\ell'_1}{\lambda} \cos \frac{2\pi\ell'_2}{\lambda} \dots \cos \frac{2\pi\ell'_{k-1}}{\lambda}}.$$

Распределение напряжения вдоль k -го отрезка

$$U_k(\xi) = V_k \cos \frac{2\pi(\xi + \ell'_{k-1})}{\lambda}.$$

Коэффициент трансформации напряжения от начала к концу дуанта выражается в виде

$$n_g = \frac{V_N}{V_1} \cos \frac{2\pi(\Delta\ell_N + \ell'_{N-1})}{\lambda}.$$

Входное сопротивление на конце дуанта

$$X_N = \frac{X_{N-1} + \rho_N \operatorname{tg} \frac{2\pi\Delta\ell_N}{\lambda}}{1 - \frac{X_{N-1}}{\rho_N} \operatorname{tg} \frac{2\pi\Delta\ell_N}{\lambda}}.$$

Отсюда могут быть записаны условия резонанса системы дуант – камера:

$$X_{N-1} + \rho_N \operatorname{tg} \frac{2\pi\Delta\ell_N}{\lambda} = 0 \text{ (последовательный резонанс),}$$

$$1 - \frac{X_{N-1}}{\rho_N} \operatorname{tg} \frac{2\pi\Delta\ell_N}{\lambda} = 0 \text{ (параллельный резонанс).}$$

Метод расчета радиотехнической системы с распределенными параметрами в виде двумерной мембраны

Заметим, что конструкция дуантной системы синхроциклотрона имеет вертикальную симметрию относительно медианной плоскости и ее вертикальные размеры много меньше горизонтальных, поэтому дуант представляет собой систему в виде двухкоординатной мембраны. Заметим также, что характеристики дуантной системы зависят от величины и места присоединения вариаторов, поэтому рассмотрим параметры вол-

новой мембраны, нагруженной по границе контура емкостным сопротивлением.

В общем виде волновое уравнение для двумерной мембраны имеет вид

$$\Delta U + k^2 U = 0,$$

где $U(x, y)$ – напряжение на дуанте в точке x, y ; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновой фактор. Граничные условия записываются в виде

$$\left. \frac{\partial U}{\partial n} \right|_{\text{гран.}} = -j\omega L i_n,$$

где n – нормаль к границе дуанта; L – индуктивность, рассчитанная на единицу площади; i_n – нормальная к границе составляющая плотности тока. Рассчитанные на единицу площади емкость и индуктивность связа-

ны соотношением $c = \frac{1}{\sqrt{CL}}$, где c – скорость света.

Мембрана прямоугольной формы

Рассмотрим в качестве примера дуант в виде мембраны прямоугольной формы с подключенным к нему одним вариатором частоты (рис. 4.25).

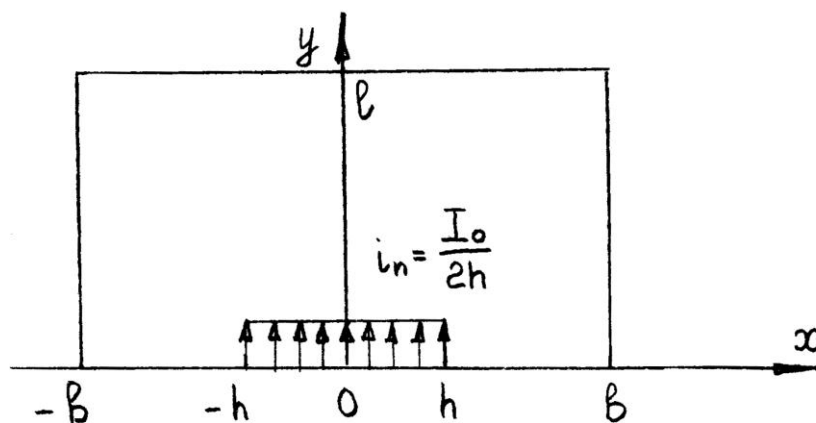


Рис. 4.25. Дуант в виде мембраны прямоугольной формы

Длина дуанта – ρ , ширина – $2b$, ширина подключения вариатора – $2h$, причем $h \leq b$. Волновое сопротивление дуанта вдоль оси OY определяется выражением

$$\rho = \frac{1}{2b} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Будем считать, что распределение тока в месте подключения вариатора равномерное по оси X . Тогда плотность тока $i_n = \frac{I_0}{2h}$.

Волновое уравнение записывается в виде

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + k^2 U = 0.$$

Граничные условия

$$\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x = \pm b} = 0; \quad \left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y = \ell} = 0; \quad \left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y = 0} = \begin{cases} -jk\rho I_0 \frac{b}{h} & (\text{при } |x| \leq h) \\ 0 & (\text{при } |x| > h) \end{cases}.$$

При заданных граничных условиях переменные разделяются, и решение, удовлетворяющее граничным условиям при $x = \pm b$ и при $y = \ell$, может быть записано в виде

$$U(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} D_n \frac{\cos p'(\ell - y)}{\sin p'\ell} \cos px,$$

где $p = \frac{n\pi}{b}$; $p' = \sqrt{k^2 - p^2}$; $n = 0, 1, 2, \dots$

Для того чтобы удовлетворить граничному условию при $y = 0$, разложим функцию $\left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0}$ в ряд Фурье:

$$\left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0} = -jk\rho I_0 \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \cos px \right],$$

где $\beta_n = \frac{n\pi h}{b}$. Используя граничное условие при $y = 0$, получим

$$U(x, y) = -j\rho I_0 \left\{ \frac{\cos k(\ell - y)}{\sin k\ell} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k}{p'} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \frac{\cos p'(\ell - y)}{\sin p'\ell} \cos px \right\}.$$

При $h = b$ имеем

$$U(y) = -j\rho I_0 \frac{\cos k(\ell - y)}{\sin k\ell}; \quad Z_{\text{вх.}} = \frac{U_0}{I_0} = -j\rho \operatorname{ctg} k\ell.$$

Рассмотрим более подробно выражение для p' .

Если $b < \frac{\lambda}{2}$, то $p'_0 = k$, $p'_n = j \sqrt{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - k^2} = jp''_n$ (при $n \geq 1$).

Если $\frac{\lambda}{2} < b < \lambda$, то $p'_0 = k$, $p'_1 = j\sqrt{k^2 - \frac{\pi^2}{b^2}}$, $p'_n = jp''_n$ (при $n \geq 2$)

и т. д.

Замечая, что $\sin j\alpha = j \operatorname{sh} \alpha$ и $\cos j\alpha = \operatorname{ch} \alpha$, находим: при $b < \frac{\lambda}{2}$

$$U(x, y) = -j\rho I_0 \left\{ \frac{\cos k(\ell - y)}{\sin k\ell} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k}{p''_n} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \frac{\operatorname{ch} p''_n(\ell - y)}{\operatorname{sh} p''_n \ell} \cos p_n x \right\};$$

при $\frac{\lambda}{2} < b < \lambda$

$$U(x, y) = -j\rho I_0 \left\{ \begin{aligned} & \frac{\cos k(\ell - y)}{\sin k\ell} + \frac{2k}{p'_1} \frac{\sin \beta_1}{\beta_1} \frac{\cos p'_1(\ell - y)}{\sin p'_1 \ell} \cos p_1 x - \\ & - 2 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{k}{p''_n} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \frac{\operatorname{ch} p''_n(\ell - y)}{\operatorname{sh} p''_n \ell} \cos p_n x \end{aligned} \right\}.$$

Вычислим входное сопротивление дуанта. Для этого вначале вычислим входную проводимость участка dx линии подсоединения вариатора. Имеем

$$dY_{\text{вх.}} = \frac{I_0}{2h} \frac{dx}{U(x, 0)},$$

отсюда получаем

$$Y_{\text{вх.}} = \frac{I_0}{h} \int_0^h \frac{dx}{U(x, 0)}.$$

Входное сопротивление дуанта

$$Z_{\text{вх.}} = \frac{1}{Y_{\text{вх.}}} = \frac{h}{I_0} \frac{1}{\int_0^h \frac{dx}{U(x, 0)}}.$$

При $b < \frac{\lambda}{2}$ имеем

$$Z_{\text{вх.}} = \frac{-j\rho h}{\int_0^h \frac{dx}{\operatorname{ctg} k\ell - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k}{p''_n} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \operatorname{cth} p''_n \ell \cos p_n x}}.$$

Мембрана в форме части сектора

Рассмотрим дуант в форме части кольца, ограниченного двумя концентрическими окружностями с радиусами $r = R_1$ и $r = R_2$ и двумя лучами, исходящими из центра окружностей под углом 2α (рис. 4.26). Вариа́тор частоты подключен к заднему концу дуанта при $r = R_1$ в пределах угла 2ε .

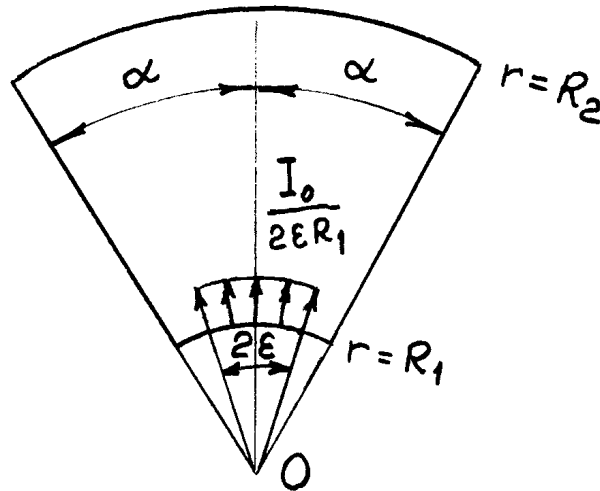


Рис. 4.26. Дуант в виде мембраны в форме части сектора

Уравнение для распределения напряжения по дуанту имеет вид

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + k^2 U = 0, \text{ где } k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Граничные условия

$$\left. \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right|_{\varphi = \pm \alpha} = 0; \quad \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r = R_2} = 0; \quad \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r = R_1} = \begin{cases} -j\omega L \frac{I_0}{2\varepsilon R_1} & (\text{при } |\varphi| \leq \varepsilon) \\ 0 & (\text{при } |\varphi| > \varepsilon) \end{cases}.$$

Нетрудно убедиться, что

$$\omega L \frac{I_0}{2\varepsilon R_1} = \frac{2\pi}{T} \frac{L}{2\alpha R_1} I_0 \frac{\alpha}{\varepsilon} = k\rho(R_1) I_0 \frac{\alpha}{\varepsilon},$$

где $\rho(R_1)$ – волновое сопротивление дуанта, рассматриваемого как одномерная линия при $r = R_1$. Решение уравнения для распределения напряжения, удовлетворяющее граничным условиям при $\varphi = \pm \alpha$ и при $r = R_2$, может быть представлено в виде

$$U(r, \varphi) = \sum C_n \left[J_p(kr) - N_p(kr) \frac{J'_p(kR_2)}{N'_p(kR_2)} \right] \cos p\varphi,$$

где $p = \frac{n\pi}{\alpha}$, а $J_p(kr)$ и $N_p(kr)$ – функции Бесселя 1 и 2-го рода. Коэффициенты C_n могут быть найдены из разложения $\left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=R_1}$ в ряд Фурье. Имеем

$$\left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=R_1} = -jk\rho(R_1)I_0 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \cos p\varphi \right\},$$

где $\beta_n = \frac{n\pi\varepsilon}{\alpha}$. Отсюда выражение для $U(r, \varphi)$ принимает вид

$$U(r, \varphi) = -j\rho I_0 \left\{ \begin{aligned} & \frac{J_0(kr) - N_0(kr) \frac{J'_0(kR_2)}{N'_0(kR_2)}}{J'_0(kR_1) - N'_0(kR_1) \frac{J'_0(kR_2)}{N'_0(kR_2)}} + \\ & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \frac{J_p(kr) - N_p(kr) \frac{J'_p(kR_2)}{N'_p(kR_2)}}{J'_p(kR_1) - N'_p(kR_1) \frac{J'_p(kR_2)}{N'_p(kR_2)}} \cos p\varphi \end{aligned} \right\},$$

где

$$J'_p(kr) = \frac{p}{kr} J_p(kr) - J_{p+1}(kr); \quad N'_p(kr) = \frac{p}{kr} N_p(kr) - N_{p+1}(kr).$$

Входное сопротивление дуанта определяется из выражения

$$Z_{\text{вх.}} = \frac{\varepsilon}{I_0} \frac{1}{\int_0^{\varepsilon} \frac{d\varphi}{U(R_1, \varphi)}}.$$

4.3. Расчет потерь высокочастотной мощности

Определение потерь мощности в элементах ВЧ ускоряющей системы синхротрона связано с определенными трудностями как из-за наличия эффекта скин-слоя, так и из-за учета тангенса угла потерь в реактивных элементах системы сложной геометрической формы. Отметим, что удельные потери мощности зависят от частоты.

Скин-слой

Толщина эквивалентного проводящего скин-слоя дается выражением

$$S = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu f}} \text{ (см).}$$

Здесь удельная проводимость ρ выражена в Ом · см, а частота f – в герцах, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ Гн/см. Если выражать S в микронах, ρ – в Ом · см, а f – в мегагерцах, то

$$S = 5,03 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (мк).}$$

Значения удельной проводимости для различных материалов дано в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Удельная проводимость для различных материалов

Материал	$\rho \cdot 10^6$, Ом · см
Серебро	1,62
Медь	1,72
Алюминий	2,82
Латунь	7
Сплав АМГ-6	7,1
Хром	15
Никель	7,24
Нерж. сталь	70

Удельное поверхностное сопротивление проводника при частоте f определяется как

$$\rho' = \frac{\rho}{S} \text{ (Ом).}$$

Если ρ измеряется в Ом · см, а f – в мегагерцах, то

$$\rho' = 0,2 \sqrt{\rho f} \text{ (Ом).}$$

В табл. 4.2 представлены величины толщины эквивалентного проводящего слоя в микронах и величины удельного поверхностного сопротивления для различных материалов в интересующем нас диапазоне частот.

Таблица 4.2

**Величины толщины эквивалентного проводящего слоя
и удельного поверхностного сопротивления**

f	Серебро		Медь		Алюминий		Латунь	
	МГц	мк	МОм	мк	МОм	мк	МОм	мк
30	11,6	1,39	12,0	1,44	15,3	1,84	24,2	2,90
27	12,2	1,32	12,6	1,36	16,2	1,75	25,5	2,75
24	13,0	1,25	13,4	1,29	17,1	1,65	27,0	2,59
21	13,9	1,17	14,3	1,20	18,3	1,54	28,9	2,42
18	15,0	1,08	15,5	1,11	19,8	1,42	31,2	2,25
15	16,4	0,99	16,9	1,02	21,7	1,30	34,2	2,05
12	18,3	0,88	18,9	0,91	24,2	1,16	38,2	1,83

f	АМГ-6		Хром		Никель		Нерж. сталь	
	МГц	мк	МОм	мк	МОм	мк	МОм	мк
30	24,3	2,91	35,4	4,24	24,6	2,95	76,4	9,17
27	25,6	2,77	37,3	4,03	25,9	2,80	80,5	8,70
24	27,2	2,61	39,5	3,79	27,5	2,64	85,4	8,20
21	29,1	2,44	42,3	3,55	29,4	2,47	91,3	7,67
18	31,4	2,26	45,6	3,29	31,7	2,28	98,6	7,10
15	34,4	2,06	50,0	3,00	34,7	2,08	108	6,48
12	38,5	1,85	55,9	2,68	38,8	1,86	121	5,80

Тангенс угла потерь

Выведем формулы для тангенса угла потерь в индуктивностях и конденсаторах. Как известно, $\operatorname{tg} \delta$ представляет собой отношение активного тока к реактивному в рассматриваемом элементе, поэтому активная мощность, выделяемая в индуктивности, будет

$$P = \frac{I^2 \omega L}{2} \operatorname{tg} \delta = \frac{V^2}{2 \omega L} \operatorname{tg} \delta,$$

а мощность, выделяемая в пластинах конденсаторов,

$$P = \frac{V^2 \omega C}{2} \operatorname{tg} \delta = \frac{I^2}{2 \omega C} \operatorname{tg} \delta.$$

С другой стороны, для индуктивностей и конденсаторов

$$P = \frac{I^2 R_n}{2} = \frac{V^2}{2R_n},$$

где R_n – сопротивление потерь.

Сравнивая выражения для вычисления мощностей, найдем: для индуктивностей

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R_n}{\omega L};$$

для емкостей

$$\operatorname{tg} \delta = R_n \omega C.$$

Рассмотрим несколько частных случаев.

Прямолинейный цилиндрический проводник вблизи заземленного угла

Прямолинейный цилиндрический проводник вблизи заземленного угла представлен на рис. 4.27.

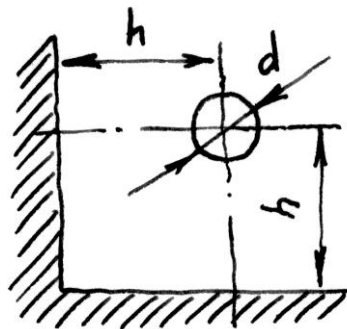


Рис. 4.27. Цилиндрический проводник вблизи угловой плоскости

Если измерять S в сантиметрах, ρ – в Ом · см, а частоту f – в герцах, то

$$S = 5,03 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (см)}.$$

Потери на 1 см цилиндрического проводника диаметром d определяются как

$$\frac{dR}{dx} = \frac{\rho}{\pi d S} = 0,632 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{\rho f}{d}}.$$

Таким образом, для цилиндрического проводника длиной ℓ (см)

$$R_n = 0,632 \cdot 10^{-4} \sqrt{\rho f} \frac{\ell}{d}.$$

Индуктивность проводника зависит от его формы и расстояния до заземленных поверхностей. Для прямолинейного проводника, расположенного вблизи заземленного прямого угла (рис. 4.27), индуктивность может быть вычислена по формуле

$$L = \frac{1}{9 \cdot 10^{16}} \frac{\ell}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(1,41 \frac{2h}{d} \right) \text{ (Гн)},$$

где $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ (Ф/м), ℓ измеряется в метрах. Если L выразить в сантиметрах единицы индуктивности, а ℓ в сантиметрах линейной длины, то

$$L = 2\ell \cdot \ln \left(2,82 \frac{h}{d} \right) \text{ (см)}.$$

Так, например, для $d = 4$ см и $h = 5$ см имеем $L = 2,52 \ell$ (см).

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{10^4}{2d \ln \left(2,82 \frac{h}{d} \right)} \sqrt{\frac{\rho}{f}},$$

где d выражено в сантиметрах, ρ – в Ом · см, f – в герцах. Для медного проводника диаметром 4 см при $h = 5$ см имеем

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,3}{\sqrt{f \text{ (Гц)}}} = \frac{1,3 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{f \text{ (МГц)}}}.$$

Конденсатор из двух пластин

Конденсатор из двух пластин представлен на рис. 4.28.

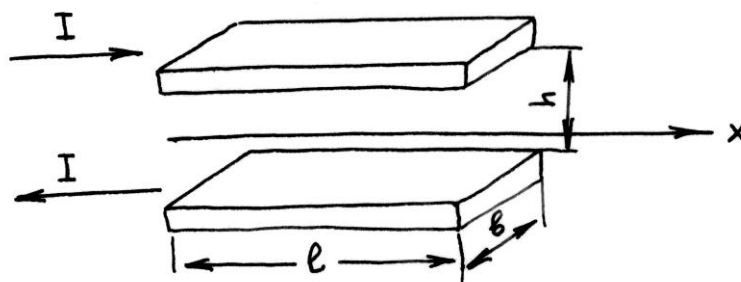


Рис. 4.28. Схема конденсатора из двух пластин

Если ток входит в конденсатор по одной из сторон при $x = 0$, то распределение тока вдоль оси X будет (рис. 4.28)

$$i = \frac{Ix}{\ell}.$$

Рассмотрим участок dx . Сопротивление этого участка $dR = \frac{\rho dx}{Sb}$, а мощность, выделяемая на этом участке на обеих пластинах, есть $dP = i^2 dR$. Суммарная мощность

$$P = \int_0^{\ell} i^2 dR = \frac{I^2 \rho \ell}{3Sb}.$$

Отсюда, переходя к величине сопротивления потерь, получим

$$R_n = 1,33 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{\rho f} \ell}{b}.$$

Емкость конденсатора

$$C = \frac{0,9 \cdot 10^{-12} b \ell}{4\pi h}.$$

Тангенс угла потерь определится как

$$\operatorname{tg} \delta = 0,6 \cdot 10^{-16} \frac{\ell^2 \sqrt{\rho} f^{3/2}}{h}.$$

Так, например, для конденсатора из сплава АМГ-6 при $\ell = 10$ см, $h = 0,4$ см имеем

$$\operatorname{tg} \delta = 4 \cdot 10^{-17} f^{3/2} \text{ (Гц)} = 4 \cdot 10^{-8} f^{3/2} \text{ (МГц)}.$$

Приведенные в главе 4 соотношения использовались нами при расчете ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона, в частности параметров его вариаторов частоты, дуанта, системы прямой и обратной связи генератора с дуантной системой, а также при расчете системы растяжки с С-электродом и др.

Рекомендуемая литература

1. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М., 1976.
2. Мейнке Х., Гундлах Ф. В. Радиотехнический справочник. М.–Л., 1960.
3. Власов В. Ф. Курс радиотехники. М.–Л., 1962.
4. Скрипников Ю. Ф. Колебательный контур. М., 1970.
5. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М., 1971.
6. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М., 1984.

Глава 5

Высокочастотная ускоряющая система синхроциклотрона ПИЯФ

5.1. Структурные схемы высокочастотных ускоряющих систем крупнейших синхроциклотронов мира

Разработка проекта ВЧ-системы синхроциклотрона ФТИ была выполнена в НИИЭФА^{1,2}. В ходе разработки проекта был проведен анализ уже существовавших к тому времени ВЧ-систем синхроциклотронов в Дубне³, Беркли⁴, ЦЕРН⁵ и других местах. Были проанализированы возможности использования для синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ 1/4-, 1/2- и 3/4-волновых резонансных систем.

Ниже приведены конструктивные решения ВЧ-систем крупнейших синхроциклотронов мира. На рис. 5.1а приведена схема ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона ОИЯИ на энергию 680 МэВ. Дуант «удлиннен» коаксиальной вставкой. На рис. 5.1б показаны распределения амплитуд при низшей (I) и высшей (II) частотах ускоряющего напряжения.

На рис. 5.2 представлен дуант синхроциклотрона ЦЕРН на энергию 600 МэВ. Дуант имеет ускоряющую кромку сильно скошенной формы, что уменьшает величину прироста энергии за оборот, но обеспечивает постоянство амплитуды ускоряющего напряжения вдоль ускоряющей кромки.

На рис. 5.3 приведена схема ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона ЦЕРН. Для «удлинения» системы между дуантом и вариатором включена согласующая коаксиальная вставка.

¹ Отчет НИИЭФА им. Д. В. Ефремова. № 1055. 1961.

² Ройфе И. М., Середенко Е. В. // ЖТФ. Т. 41, № 9. 1971. С. 1797.

³ Минц А. Л., Невяжский И. К., Поляков Б. И. // Радиотехника и электроника. Т. 1. Вып. 7. 1956. С. 893–902.

⁴ Smith B. H., MacKenzie K. R., Riedel J., Kerns Q., Baker W. R., Park C. W., Thornton R. L. Preprint UCRL 3779. 1957. P. 28.

⁵ Krienen F. // NIM 5. No. 5. 1959. P. 280–299.

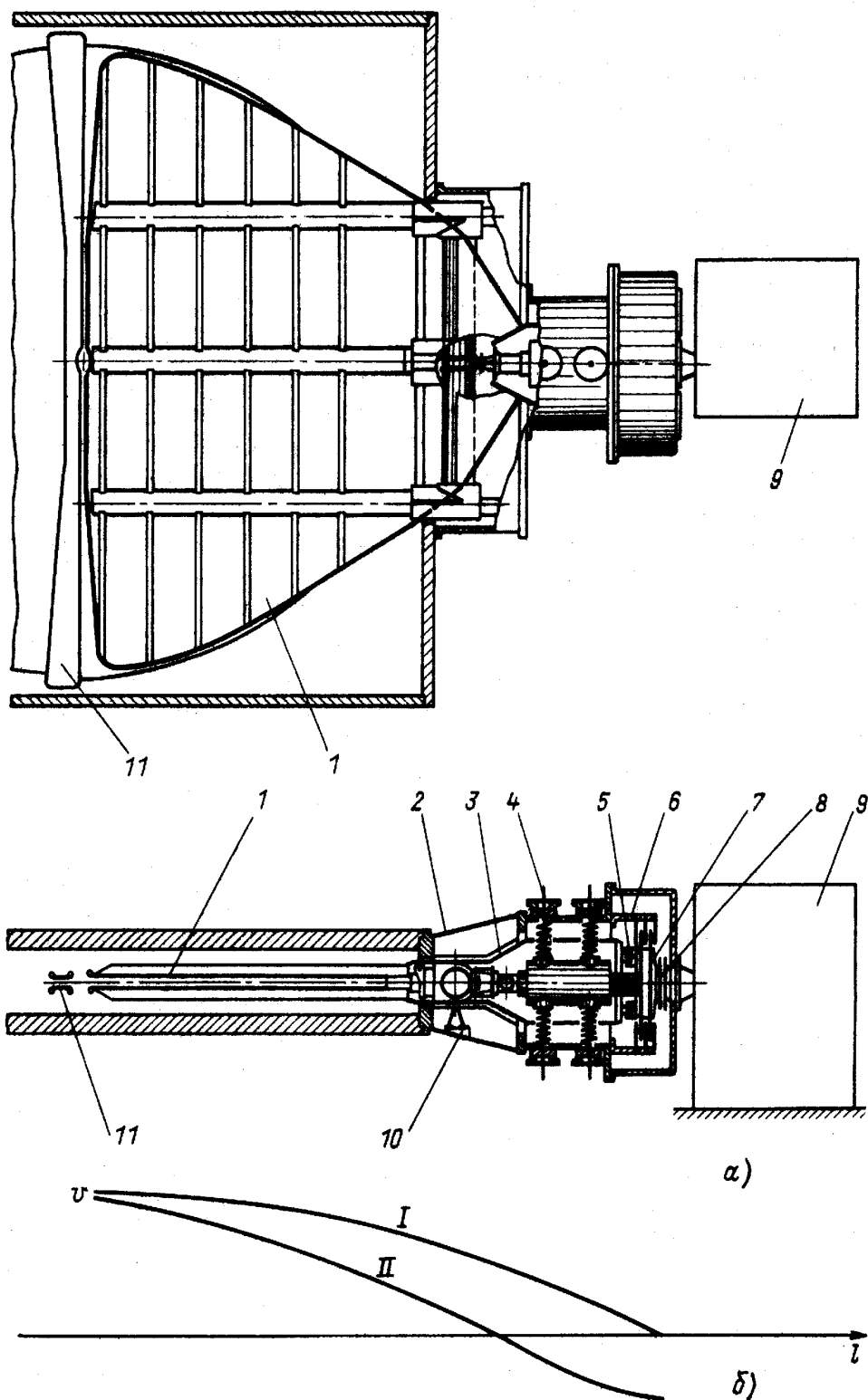


Рис. 5.1. ВЧ ускоряющая система синхроциклотрона 680 МэВ (ОИЯИ, Дубна):

а) схема: 1 – дуант; 2, 3 – внутренний и внешний проводники коаксиала; 4 – спиральная опора; 5 – блокирующие конденсаторы двигателя; 6 – статор вариатора; 7 – ротор вариатора; 8 – конденсатор связи; 9 – генератор; 10 – изолятор; 11 – антидуантная рамка; б) распределение напряжений: I, II – низшая и высшая частоты

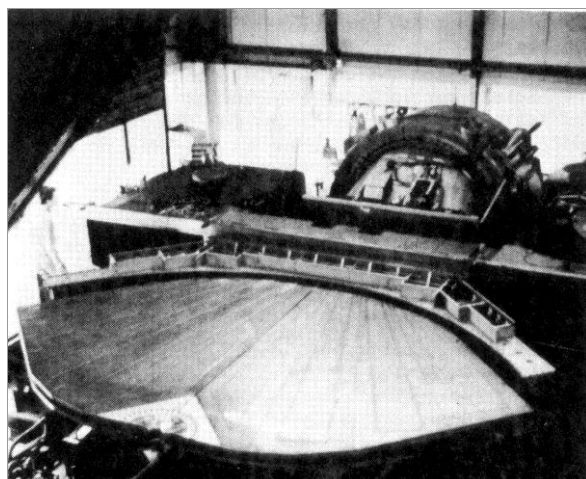


Рис. 5.2. Дуантная система синхроциклотрона 600 МэВ (ЦЕРН, Женева)

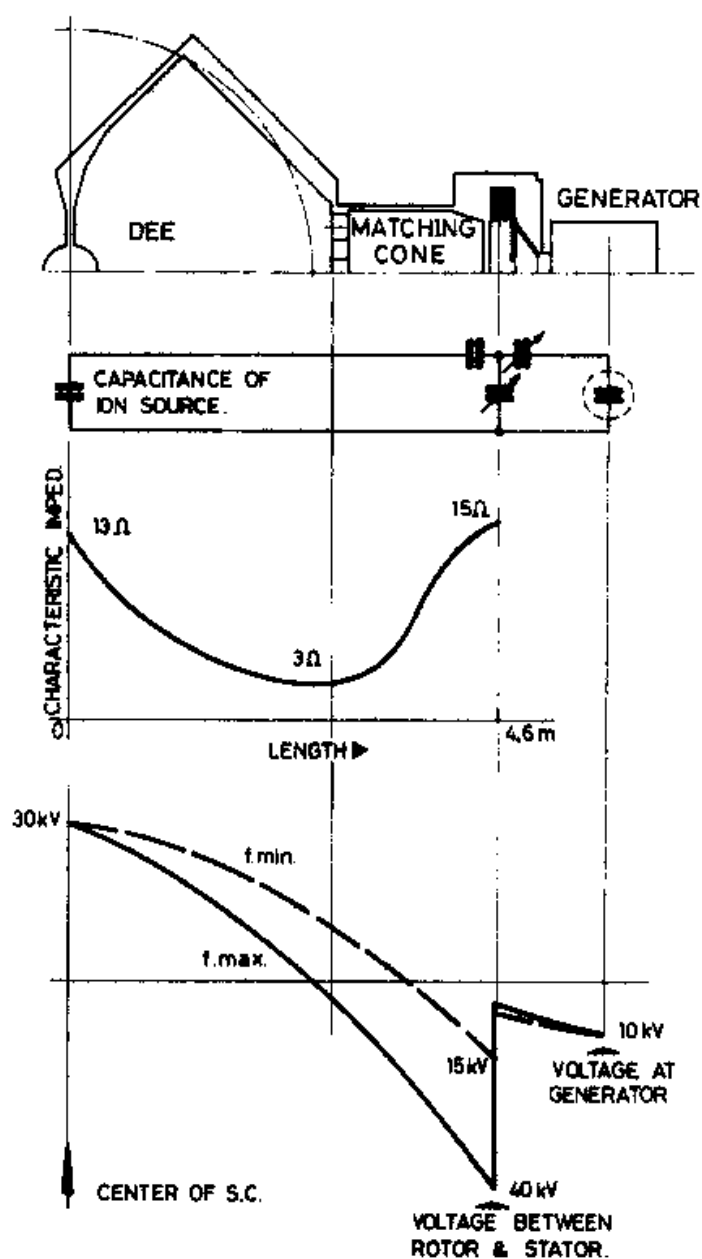


Рис. 5.3. Схема ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона ЦЕРН

На рис. 5.4, 5.5 приведены конструкция и схемное решение ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона на энергию 570 МэВ Лаборатории НЕВИС (США).

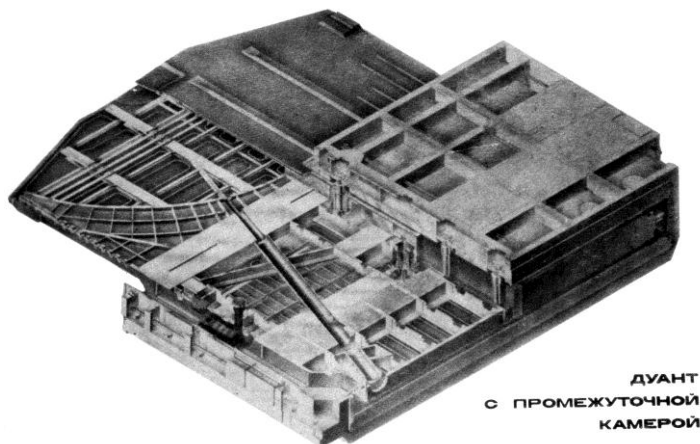


Рис. 5.4. Конструкция ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона 570 МэВ (Лаборатория НЕВИС, США)

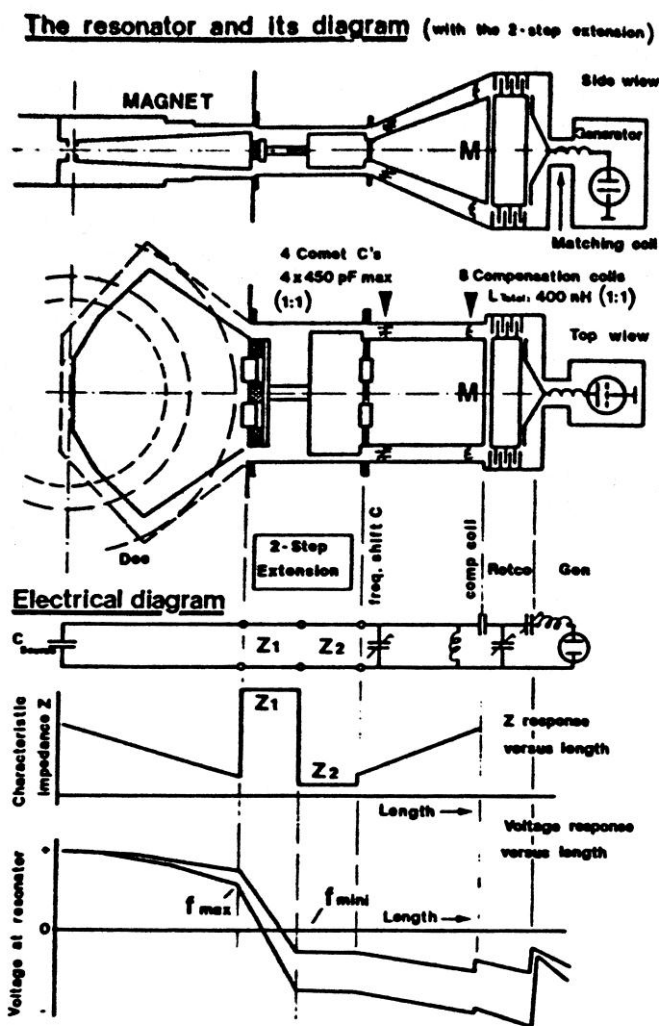


Рис. 5.5. Схема ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона 570 МэВ (Лаборатория НЕВИС, США)

Схема ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ изображена на рис. 5.6, 5.7.

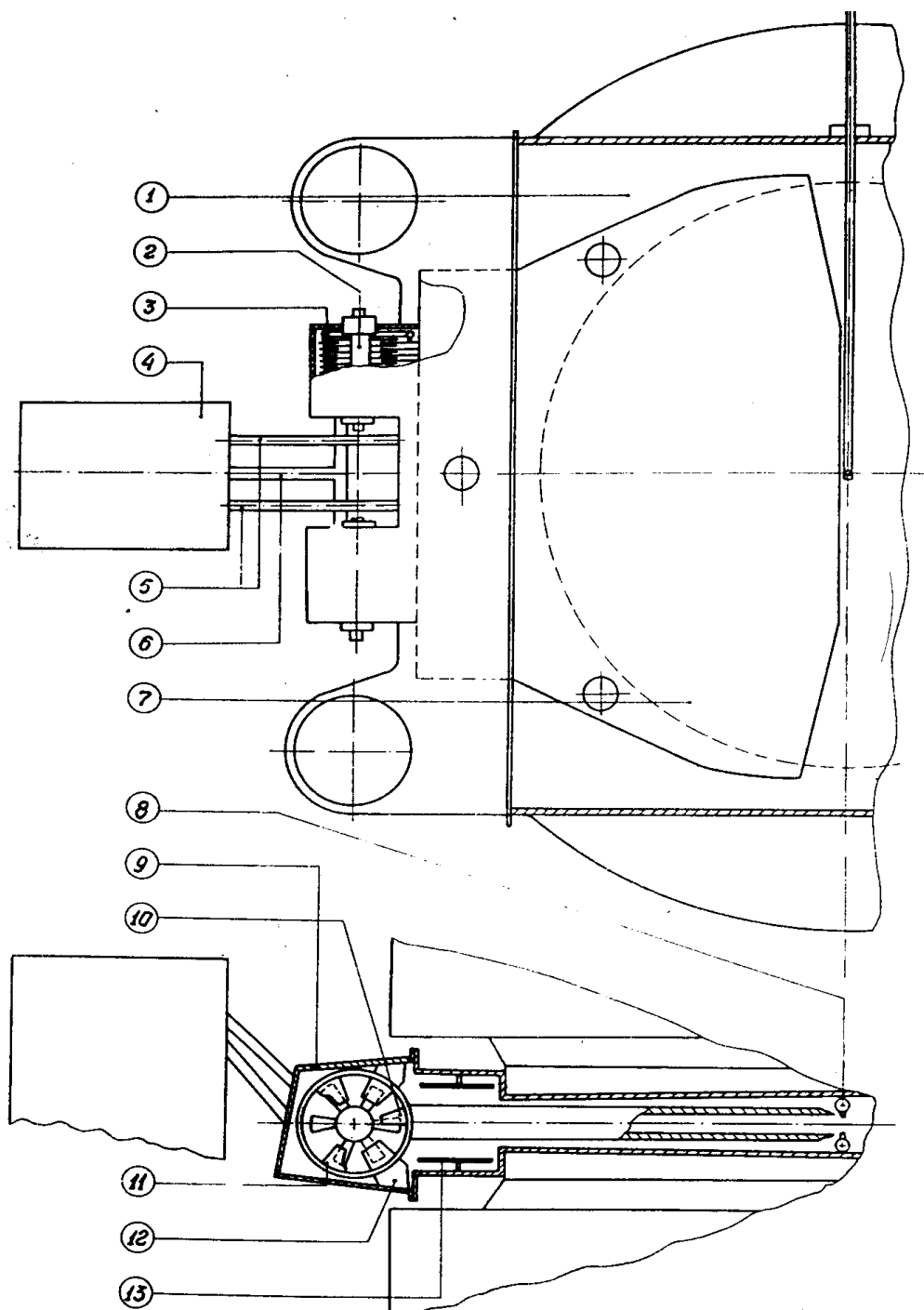


Рис. 5.6. Схема ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ: 1 – вакуумная камера; 2 – ротор вариатора частоты; 3 – статорные емкостные пакеты; 4 – ВЧ-генератор; 5 – фидеры прямой связи; 6 – фидер обратной связи; 7 – дуант; 8 – ионный источник Пеннинга; 9 – кожух вариатора; 10 – дуантный емкостный пакет пластин вариатора; 11 – индуктивный емкостный пакет вариатора; 12 – заземляющий емкостный пакет пластин; 13 – регулируемые пластины плакировки камеры

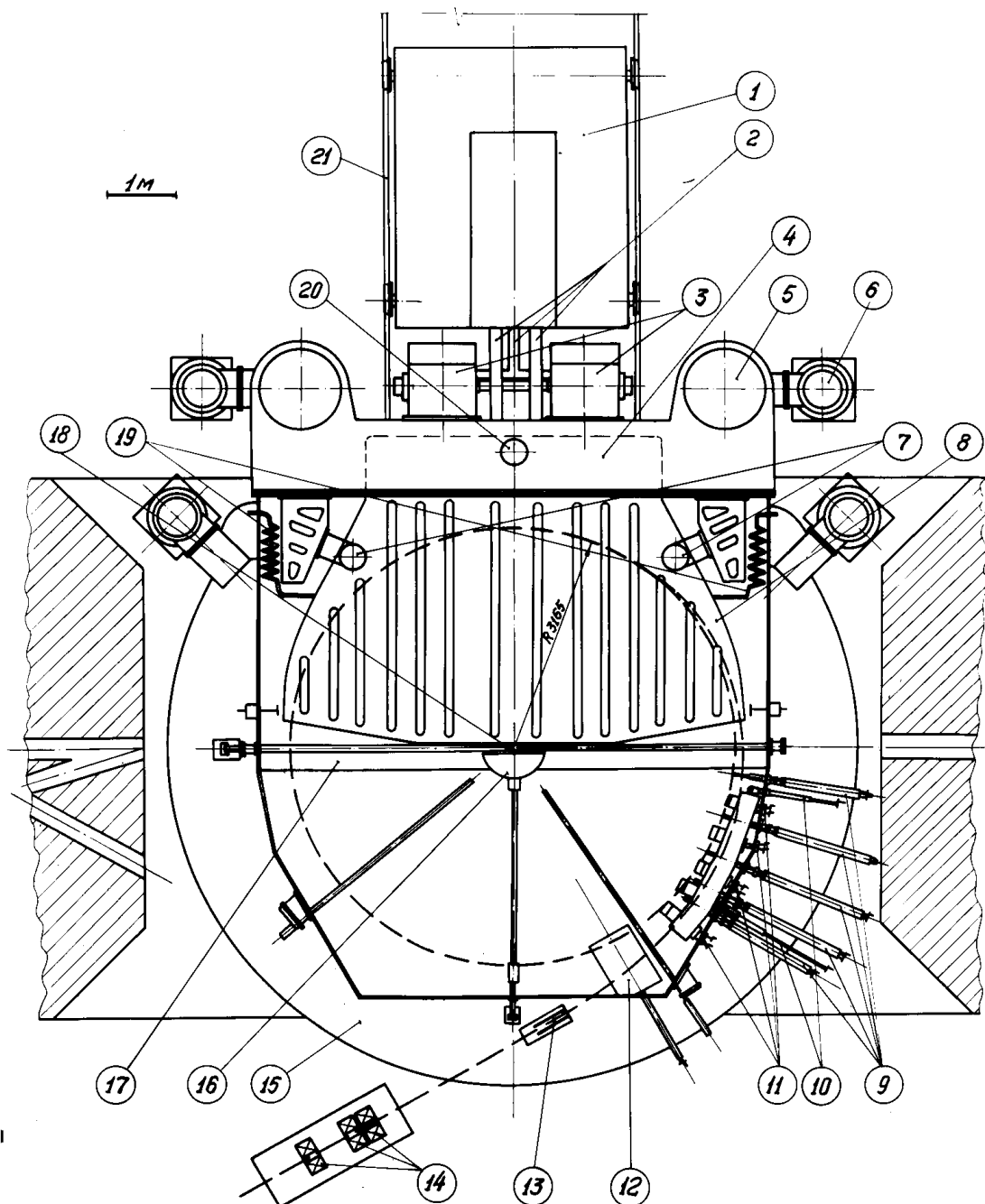


Рис. 5.7. Расположение ВЧ-системы

в вакуумной камере синхроциклотрона ПИЯФ:

1 – ВЧ-генератор; 2 – фидеры связи; 3 – вариаторы частоты; 4 – отсек камеры; 5, 6 – высоковакуумные насосы; 7 – керамические опоры дуанта; 8 – дуант; 9 – пробники; 10, 11 – приводы магнитного канала; 12 – регенератор; 13 – фокусирующая секция магнитного канала; 14 – линзы МЛ-3А; 15 – обмотка электромагнита; 16 – фокусирующий электрод; 17 – плакировка камеры; 18 – ионный источник; 19 – дроссели системы охлаждения; 20 – пружинная опора дуанта; 21 – рельсовый путь

Перейдем к описанию основных требований к ускоряющей системе синхроциклотрона ПИЯФ.

5.2. Основные требования к высокочастотной ускоряющей системе синхроциклотрона ПИЯФ

Наиболее сложной проблемой при создании синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ с азимутально-симметричным магнитным полем оказалась проблема, связанная с разработкой, изготовлением и наладкой ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона, что явилось следствием высокой, близкой к предельно возможной для данного типа ускорителей, энергии ускоряемых протонов. Основные требования к ВЧ-системе синхроциклотрона могут быть сформулированы в следующем виде.

1. ВЧ-система должна обеспечить ускорение протонов от нулевой энергии до энергии 1 ГэВ, что при выбранных параметрах магнитного поля соответствует расчетному диапазону изменения частоты ускоряющего напряжения в течение цикла ускорения от 28,88 до 13,18 МГц и перекрытию по частоте, равному 2,2. Учитывая необходимость обеспечения отличных от нуля значений производной частотной программы в начале и конце цикла ускорения, диапазон частот и коэффициент перекрытия по частоте должны быть несколько больше. Реальный диапазон частот должен быть по крайней мере от 30 до 13 МГц, а перекрытие по частоте – 2,3.

2. Важными параметрами ВЧ-системы синхроциклотрона, определяющими условия захвата частиц в режим ускорения и фазовую устойчивость пучка в процессе ускорения, являются: форма зависимости частоты резонансной системы от времени – частотная программа $f(t)$ и связанная с ней зависимость от времени амплитуды ускоряющего напряжения на дуанте – амплитудная программа $V(t)$. Благодаря наличию автофазировки, формы этих зависимостей в случае синхроциклотрона не являются критичными и в определенных пределах могут изменяться. С точки зрения получения максимальной интенсивности ускоряемого пучка оптимальные частотная и амплитудная программы должны обеспечить:

- оптимальные условия для захвата частиц в режим ускорения в центре ускорителя;
- отсутствие фазовых потерь пучка в процессе ускорения;
- минимальное время ускорения сгустка и, как следствие этого, максимально возможную частоту повторения ускорения;
- максимально возможное отношение длительности цикла ускорения к периоду модуляции ускоряющего напряжения (коэффициент использования цикла).

3. Для получения высокой интенсивности ускоряемого пучка ВЧ-система должна обеспечить получение достаточно высокой амплитуды ускоряющего напряжения во всем диапазоне частот.

4. ВЧ-система должна обладать высокими эксплуатационными характеристиками: отсутствием пробоев и перегревов отдельных частей системы, надежностью и стабильностью при работе в длительном режиме.

Рассмотрим более подробно, к каким параметрам ВЧ-системы приводят указанные выше требования.

В связи с разработкой синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ – самого большого ускорителя этого типа – необходимо было рассмотреть комплекс вопросов построений ВЧ-системы с параметрами, обеспечивающими ускорение протонов до энергии, в 1,5–2 раза превышающей полученную на существующих синхроциклотронах.

Известно, что с ростом энергии ускоренных частиц возрастают трудности построений дуантной системы. Для протонного синхроциклотрона на сверхвысокие энергии, т. е. на энергии порядка 1 ГэВ и выше, вопрос ставится не только о выборе наиболее целесообразной схемы и конструкции дуантной системы, но и ее осуществимости вообще, что обусловлено как расширением диапазона рабочих частот, так и тем, что с увеличением энергии относительные размеры дуанта возрастают и становятся соизмеримыми с длинами волн ускоряющего напряжения.

В подавляющем большинстве синхроциклотронов применяется дуантная ускоряющая система, где полые электроды – дуанты – помещены между полюсами электромагнита. Изменение частоты ускоряющего напряжения осуществляется изменением резонансной частоты дуантной системы, являющейся анодным контуром генератора, с помощью введенного в этот контур элемента с периодически меняющимися параметрами. Сравнительно низкая скорость изменения частоты обуславливает возможность применения механических средств – переменных конденсаторов с вращающимся или вибрирующим ротором. Такие устройства получили название вариаторов частоты. Осуществление частотной модуляции с помощью других методов (применение реактивной лампы, ферритов и т. д.), как показывают оценки, требует гораздо большей (до мегаватт) мощности, что для синхроциклотрона на сверхвысокие энергии неприемлемо.

Таким образом, ВЧ ускоряющая система состоит из дуанта, вариатора частоты, подключенного к дуанту непосредственно или через соединительную линию, и устройства связи генератора с дуантом.

Минимальный продольный размер дуанта (продольным названо направление, перпендикулярное ускоряющему краю дуанта) определяется конечным радиусом ускоренных частиц. С ростом энергии ускорителя увеличиваются габариты дуанта. Для мощных синхроциклотронов размеры дуанта становятся соизмеримыми с длиной волны ускоряющего напряжения.

В полуволновой системе эквивалентная схема представляет собой разомкнутую на ускоряющем крае линию длиной больше $1/4 \lambda_{\min}$, к другой стороне которой подключен вариатор, вынесенный из области магнитного поля. Если линия однородная, то максимальный возможный коэффициент перекрытия частоты будет равен 2 при изменении емкости вариатора от 0 до ∞ . Расширение диапазона частот в полуволновой системе осуществляется за счет подключения к вариатору сосредоточенных индуктивностей и применения неоднородной линии дуантной камеры.

Строго говоря, дуант, помещенный в камеру, представляет собой объемный резонатор сложной конфигурации. Однако, т. к. зазор между дуантом и крышкой камеры мал по сравнению с размерами дуанта и длиной волны, ускоряющую систему можно рассматривать как двумерную систему. Рассмотрение волновых свойств дуанта проведено для случая подключения к нему двух вариаторов симметрично продольной оси системы. Такие схемы применялись на крупнейших синхроциклотронах.

В ВЧ-системах с двумя вариаторами частоты возможно нарушение симметрии относительно продольной оси, вызванное неодинаковым реактивным сопротивлением вариаторов из-за отклонения от расчетных размеров. Оценка допустимой поперечной асимметрии позволяет определить возможность использования разных конструкций элементов дуантной системы и допуски на точность их изготовления.

Поперечная асимметрия дуантной системы, вызванная неодинаковым сопротивлением вариаторов, приводит к изменению распределения ВЧ-напряжения и тока в системе. Результаты анализа показывают, что если входные сопротивления дуанта для продольного и поперечного типов колебаний отличаются, т. е. частоты рабочих и поперечных колебаний разнесены, а сопротивления двух вариаторов отличаются на несколько процентов, то имеет место «перекос» ускоряющего напряжения вдоль кромки дуанта. При этом имеет место увеличение напряжения на одном из вариаторов. В случае если входные сопротивления дуанта на частотах продольных и поперечных колебаний близки или равны, то небольшая асимметрия вариаторов может привести к весьма значительному перераспределению напряжения в системе и даже к «перескоку» частоты.

Величина ВЧ-мощности ускоряющей системы значительно возрастает при переходе к большим энергиям (при одном и том же ускоряющем напряжении). Это объясняется тем, что с ростом энергии ускорителя неизбежно падает волновое сопротивление дуанта из-за увеличения его поперечных размеров и уменьшения зазора дуант – камера. Последнее связано с вынужденным увеличением конструктивной высоты дуанта для сохранения его механической жесткости при большей площади. Поэтому при одном и том же ускоряющем напряжении увеличиваются ток и вели-

чина рассеиваемой в дуанте и вариаторе ВЧ-мощности. Потери в вариаторе составляют бóльшую часть суммарных потерь в ускоряющей системе и достигают сотни кВт в ускорителе на высокие энергии.

Ось ротора вариатора должна быть расположена перпендикулярно продольной оси системы, что обеспечивает значительное снижение потерь из-за токов Фуко в роторе (~ 13 кВт при 2 500 об./мин) и позволяет за счет приближения вариатора к краю полюса (вариатор расположен между катушками магнита) сократить длину дуанта.

В синхроциклотроне на сверхвысокие энергии частоты ряда паразитных колебаний лежат внутри рабочего диапазона, причем частота некоторых типов колебаний меняется с изменением емкости вариатора. Это поперечные колебания дуанта и вариатора, объемные колебания камеры, высшая гармоника продольных колебаний дуанта. При проектировании дуантной системы были приняты меры по исключению совпадения частот рабочих и паразитных колебаний. В частности, частоты рабочих и поперечных колебаний могут быть разнесены выбором формы дуанта, ширины и места подключения вариатора к дуанту.

Отметим, что при выборе параметров ускоряющей системы мы стремились к осуществлению варианта с минимально возможными величинами коэффициента перекрытия по емкости вариатора $K_C = C_{\max} / C_{\min}$ и коэффициента перенапряжения в вариаторе $K_U = U_B / U_0$, где U_B – напряжение в емкостном зазоре вариатора; U_0 – ускоряющее напряжение. Основным критерием выбора того или иного вариатора было требование минимального значения произведения $K_C K_U$.

5.3. Дуантная система синхроциклотрона ПИЯФ

Геометрия дуанта и его конструкция

При проектировании ВЧ ускоряющей системы для синхроциклотрона ПИЯФ рассматривались различные формы дуантов. Расчет параметров дуанта проводился несколькими способами. При анализе дуант рассматривали в виде одномерной неоднородной линии или двумерной мембраны. После изготовления макета дуанта его параметры измерялись экспериментально. В результате была выбрана геометрия дуанта, изображенная на рис. 5.8.

Конструкция дуанта синхроциклотрона ПИЯФ показана на рис. 5.9, а его продольный разрез – на рис. 5.10.

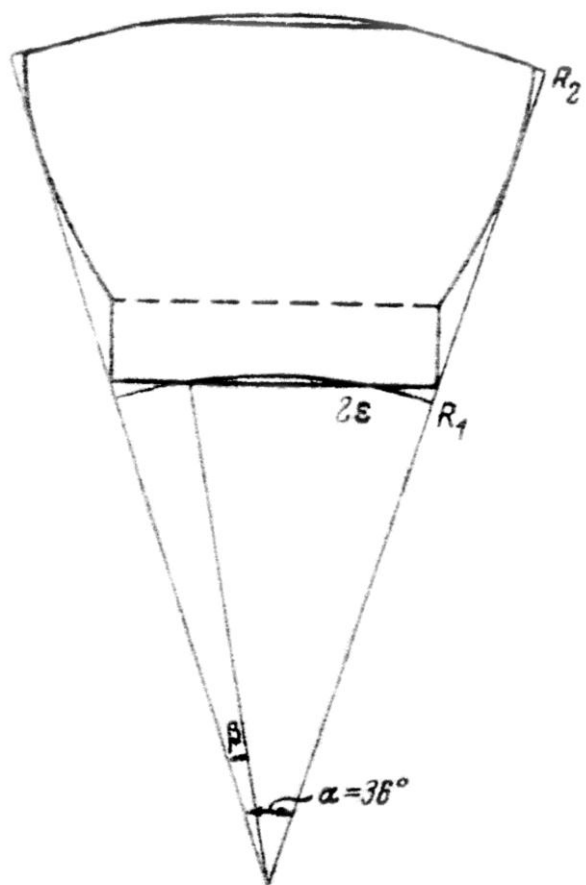


Рис. 5.8. Геометрия дуанта



Рис. 5.9. Ремонтные работы на дуанте, выдвинутом из камеры синхроциклотрона ПИЯФ

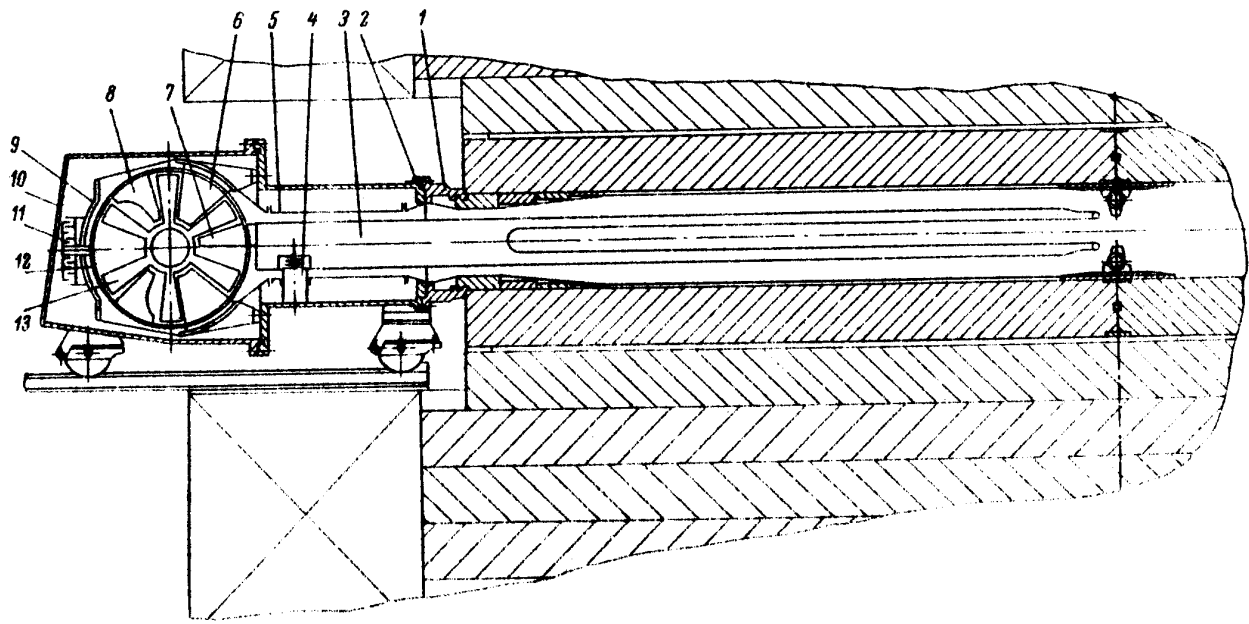


Рис. 5.10. Продольный разрез дуанта в камере ускорителя

Дуант имеет форму, которая довольно хорошо вписывается в систему полярных координат с центральным углом $\alpha = 36^\circ$. Длина дуанта от ускоряющей кромки до места подключения вариаторов частоты равна 4 470 мм (т. е. $\ell \approx R_2 - R_1 = 4,5$ м). Зазор между дуантом и камерой равен ~ 95 мм. Однородность зазора между дуантом и камерой изменяется в районе больших радиусов, где шиммы магнитного поля имеют значительную толщину (рис. 5.10).

Дуант выполнен в виде С-образного каркаса из немагнитной стали, плакированного медными охлаждаемыми листами. Центральная часть дуантной плакировки поддерживается и в небольших пределах регулируется по высоте шарнирно закрепленными в задней части каркаса балками. Высота дуанта – 270 мм, апертура дуанта меняется от 130 мм в центре до 100 мм на конечном радиусе. Опорами дуанта служат два полых стеатитовых изолятора, обдуваемых для охлаждения сжатым воздухом. Место их установки выбрано из условия минимальности рассеиваемой в них ВЧ-мощности, усредненной по циклу модуляции частоты. Задняя часть дуанта поддерживается металлической опорой, выполненной для увеличения индуктивности в виде спиральной пружины. Собственная частота контура, образованного этой опорой, лежит выше 45 МГц, поэтому ее влиянием на характеристики резонансной системы можно пренебречь. Подвод охлаждающей воды к дуанту и связанным с ним элементам вариаторов осуществляется через навитые из медных трубок дроссели, собственная частота которых находится вне рабочего диапазона.

Конструкцией, несущей дуант и вариаторы частоты, является откатной отсек вакуумной камеры, присоединенный непосредственно к уско-

рительной камере (рис. 5.7). Внутренние поверхности отсека и при-
мыкающей к нему половины ускорительной камеры плакированы
охлаждаемой медной оболочкой. Верхняя и нижняя плакировки отсека
и расположенные против них участки плакировки дуанта (длиной 1 м)
выполнены в виде подвижных панелей, позволяющих менять зазор
дуант – камера без нарушения вакуума. Подвижные панели используются
для построения диапазона рабочих частот. С их помощью производится
также симметрирование ВЧ-системы в вертикальном направлении для
устранения возможности возбуждения объемных колебаний камеры, ча-
стота которых лежит в рабочем диапазоне частот.

Измерение радиочастотных параметров системы дуант – камера

В марте 1967 года на системе дуант – камера синхроциклотрона (без
вариаторов и основного генератора) проводилась серия радиочастотных
измерений. Целью измерений было определение собственных резонанс-
ных частот системы входного реактивного сопротивления дуанта x_d со
стороны подключения вариаторов в диапазоне рабочих частот коэффици-
ента передачи напряжения n_d , определяемого как отношение напряжений
в ускоряющей щели к напряжению в месте подключения вариаторов,
а также выяснение наличия паразитных резонансов системы дуант –
камера [1]. Измерения проводились методом возбуждения дуанта мало-
мощным генератором с перестраиваемой частотой, а также методом
измерения напряжений в различных точках дуанта при помощи датчиков
ВЧ-напряжения. Информация с датчиков подавалась через коммутатор
к цифровому вольтметру и в автоматическом режиме выводилась на пе-
чать. Подробно методика измерений описана в [2].

Перестройка резонансной частоты системы производилась путем
подключения к дуанту конденсаторов определенной величины. Конден-
саторы были изготовлены в виде двух пластин размером $500 \times 100 \text{ мм}^2$
с диэлектриком из полиэтилена или плексигласа разной толщины и под-
соединялись к дуанту по всей ширине подключения каждого из вариа-
торов.

На рис. 5.11 приведена зависимость изменения резонансных частот
системы дуант – камера от величины емкости, подключаемой к дуанту
(кривая I). Расстояние между дуантом и задней регулируемой плакиров-
кой было сделано максимально возможным ($h = 160 \text{ мм}$).

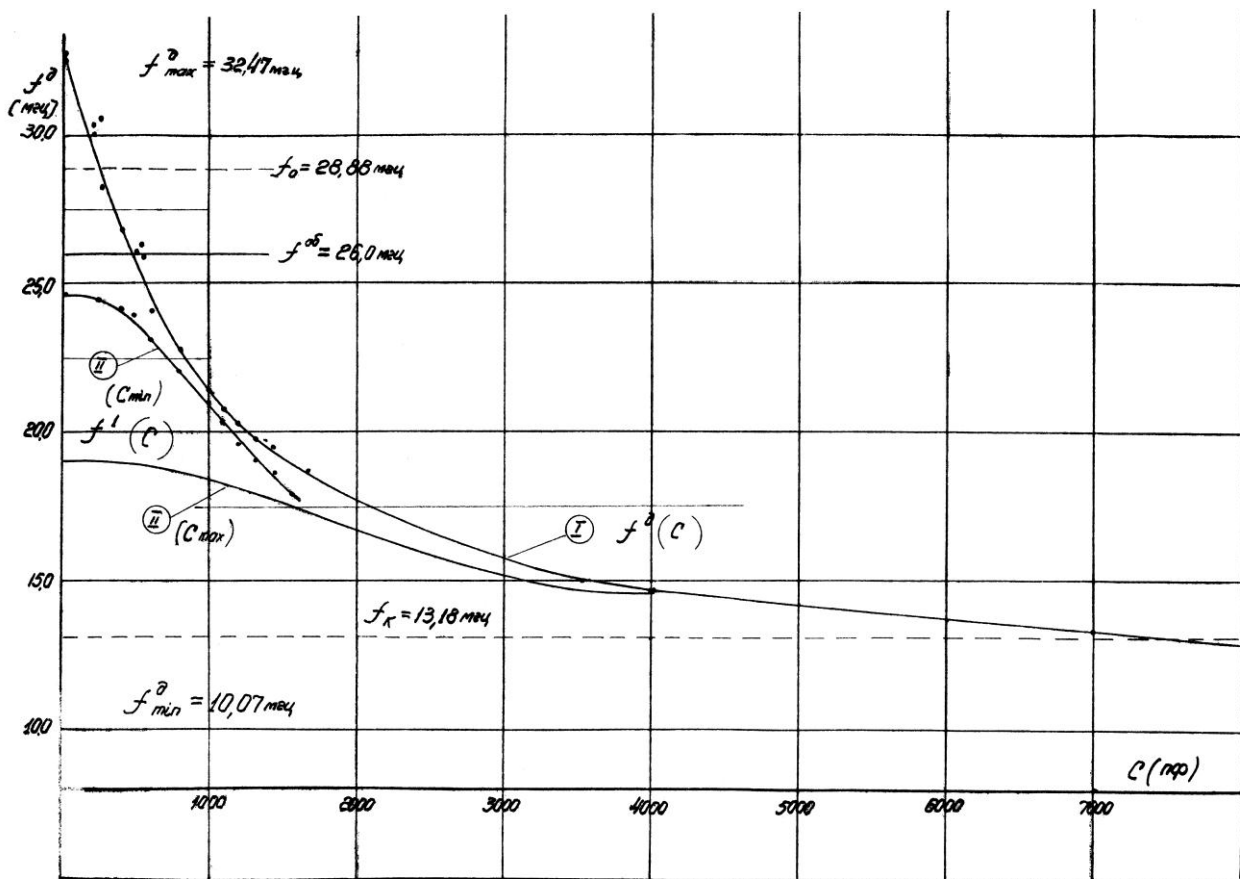


Рис. 5.11. Зависимость резонансных частот системы дуант – камера от величины емкости, подключаемой к дуанту

Из рис. 5.11 видно, что граничные частоты при полностью разомкнутом и замкнутом на конце дуанте соответственно равны

$$f_{\max} = 32,47 \text{ МГц}; f_{\min} = 10,07 \text{ МГц},$$

что перекрывает значения f_0 и f_k для граничных частот, необходимых для ускорения протонов до энергии 1 ГэВ. При этом коэффициент перекрытия системы дуант – камера

$$K_f = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = 3,04.$$

Граничные частоты при минимально возможном расстоянии между дуантом и задней плакировкой $h = 60$ мм соответственно равны

$$f_{\max} = 30,37 \text{ МГц}; f_{\min} = 12,0 \text{ МГц},$$

$$K_f = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = 2,53.$$

Величины входного реактивного сопротивления дуанта $x_d(f)$ и коэффициента передачи напряжения $n_d(f)$ в зависимости от частоты приведены на рис. 5.12 и 5.13 (кривые I). Значения x_d рассчитывались из кривой $f(C)$, а величины n_d измерялись экспериментально.

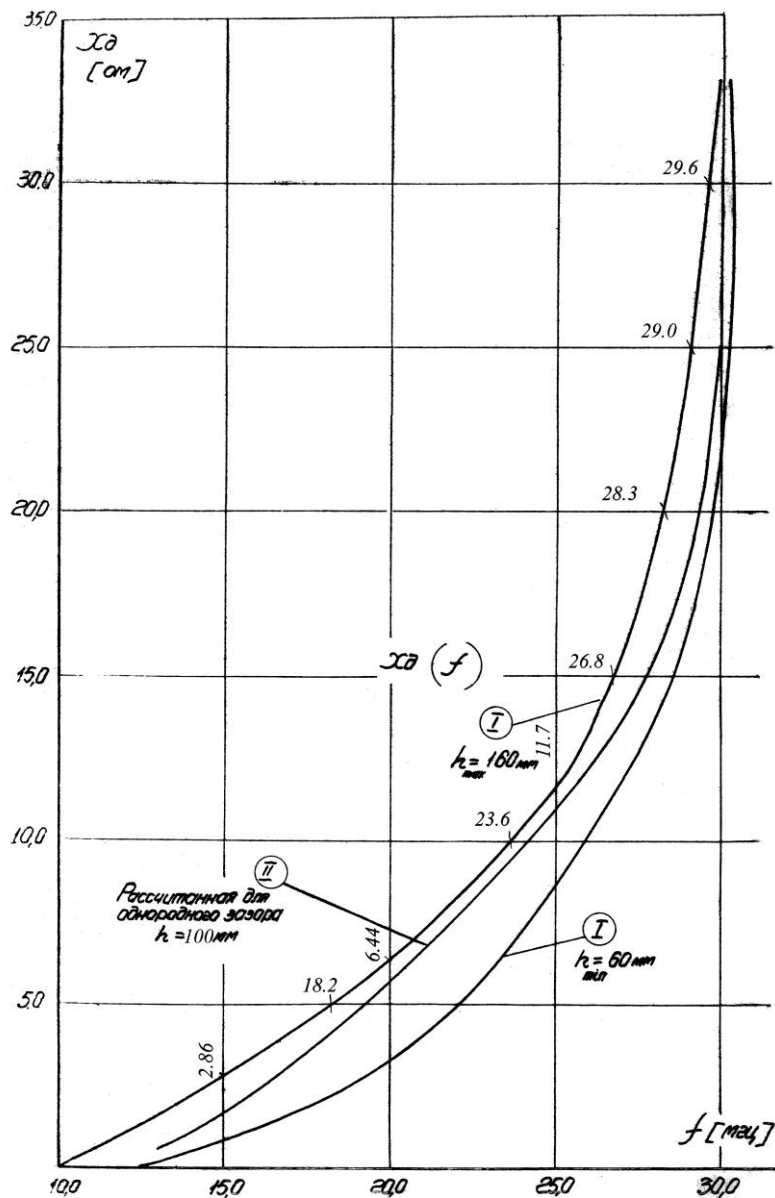


Рис. 5.12. Зависимость реактивного сопротивления дуанта от частоты

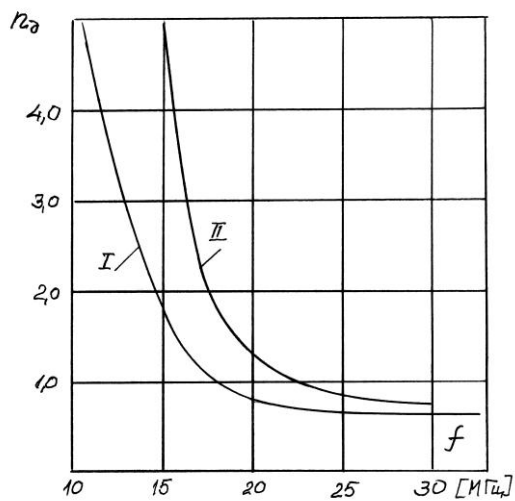


Рис. 5.13. Зависимость коэффициента передачи напряжения дуанта от частоты

При измерении n_d запитка системы производилась от внешнего генератора, подключенного в месте подсоединения вариаторов. При определении напряжения в ускоряющей щели производилось усреднение по показаниям всех шести датчиков, расположенных вдоль щели сверху и снизу кромок дуанта.

На этих рисунках приведены расчетно-теоретические кривые для дуанта в виде усеченного сектора для однородного зазора по всей длине дуанта (кривые II взяты из работы Б. И. Полякова¹). Совпадение кривых достаточно хорошее. При анализе кривых необходимо учитывать, что паразитная индуктивность подсоединения емкостей к концу дуанта несколько занижает значения резонансных частот $f = f(C)$.

Добротность системы дуант – камера измерялась методом расстройки резонансной частоты при запитке ее от внешнего генератора. Величина добротности системы, измеренная на частоте $f_{\max} = 32,47$ МГц, при нулевой емкости на конце дуанта $Q = 3 \cdot 10^3$. Измерение добротности на других частотах дает величины Q , заниженные на порядок, что объясняется потерями в диэлектрике конденсаторов, подключаемых к дуанту.

Входное сопротивление дуанта

Входное сопротивление дуанта x_d , измеренное экспериментально при максимальном и минимальном расстояниях между дуантом и регулируемой плакировкой (160 и 60 мм), приведено на рис. 5.12, а реактивные параметры дуанта в зависимости от частоты, измеренные на расстоянии 160 мм, представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Реактивные параметры дуанта в зависимости от частоты

f , МГц	x_d , Ом	B_d , Ом ⁻¹ · 10 ⁻²	$C_{\text{экв.}}$, пФ
10,07	0	$-\infty$	∞
15,0	5,72	-17,5	1 850
18,2	10,0	-10,0	875
20,0	12,88	-7,76	620
23,6	20,0	-5,0	338
25,0	23,4	-4,27	272
26,8	30,0	-3,33	198
28,3	40,0	-2,5	141
30,0	61,7	-1,62	86
32,47	∞	0	0

¹ Поляков Б. И. Высокочастотная система фазотрона. Дис. ... д. ф.-м. н. 1956. 175 с.

В табл. 5.2 представлены экспериментальные данные по величине коэффициента трансформации напряжения вдоль дуанта от его ускоряющей кромки к месту подсоединения вариаторов частоты $n_d = \frac{U_{\text{вар.}}}{U_{\text{уск.}}}$.

Таблица 5.2
**Коэффициент трансформации дуанта
в зависимости от частоты**

f , МГц	n_d
10,55	0,2
11,48	0,25
12,8	0,33
14,7	0,5
18,0	1,0
20,0	1,23
25,0	1,56
30,0	1,61
35,0	1,61

Представленные экспериментальные зависимости могут быть аппроксимированы формулами:

$$B_d = \begin{cases} -\frac{2,014}{(52,47 - f) \operatorname{tg}[0,0701(f - 10,07)]} & (\text{при } f > 21,8) \\ -\frac{8,859}{(156,7 - f) \operatorname{tg}[0,0701(f - 10,07)]} & (\text{при } f < 21,8) \end{cases},$$

$$C_{\text{экв.}} = \begin{cases} \frac{3,2055 \cdot 10^5}{f(52,47 - f) \operatorname{tg}[0,0701(f - 10,07)]} & (\text{при } f > 21,8) \\ \frac{1,410 \cdot 10^6}{f(156,7 - f) \operatorname{tg}[0,0701(f - 10,07)]} & (\text{при } f < 21,8) \end{cases},$$

$$n_d = \begin{cases} 7,013 \cdot 10^{-3}(f - 10,07)^2 + 6,819 \cdot 10^{-2}(f - 10,07) & (\text{при } f < 16,0) \\ -5,655 \cdot 10^{-3}(f - 32,47)^2 + 3,491 \cdot 10^{-2}(32,47 - f) + 1,61 & (\text{при } f > 16,0) \end{cases}.$$

В формулах частота f измеряется в мегагерцах, B_d – в Ом^{-1} , а $C_{\text{экв.}}$ – в пикофарадах. Формулы справедливы при $10,07 \leq f \leq 32,47$. При $f = 32,47$ МГц величины B_d и $C_{\text{экв.}}$ обращаются в нуль, а при $f = 10,07$ МГц – в бесконечность.

Паразитные колебания в системе дуант – камера

В ВЧ ускоряющей системе синхроциклотрона наряду с электромагнитными колебаниями рабочего типа, используемыми для ускорения частиц, могут возникать паразитные колебания, которые нарушают нормальный процесс ускорения.

Известно, что в действующих моделях синхроциклотронов имели место следующие виды паразитных колебаний:

- объемные;
- поперечные;
- колебания паразитных контуров, образованных вспомогательными конструктивными элементами системы;
- высшие моды продольных колебаний;
- паразитные колебания в вариаторе;
- паразитные колебания элементов генератора и фидеров связи.

Значения частот паразитных резонансов определяются параметрами ускоряющей системы. Частота многих из них изменяется с изменением емкости вариатора.

Ниже рассмотрены паразитные колебания, наблюдавшиеся в системе дуант – камера синхроциклотрона ПИЯФ.

Объемные колебания

Резонансные частоты объемных колебаний камеры зависят от размеров и формы ее полости. Полость камеры синхроциклотрона ПИЯФ представляет собой неправильную призму, основания которой не являются плоскостями из-за наличия магнитных шиммов. Высота внутренней полости камеры уменьшается по мере увеличения радиуса полюса магнита.

При проведении измерений на системе дуант – камера наблюдалось возбуждение объемных колебаний в полости камеры на частоте 27 МГц, по виду напоминающих мод E_{010} для цилиндрической полости (рис. 5.14). Частота определялась по максимуму амплитуды ВЧ-напряжения, получаемого с датчика, подключенного к верхней и нижней крышкам камеры вблизи ее центра. Мод колебаний определялся микроамперметром с ВЧ-термопреобразователем, имеющим наружную ориентируемую в пространстве рамку.

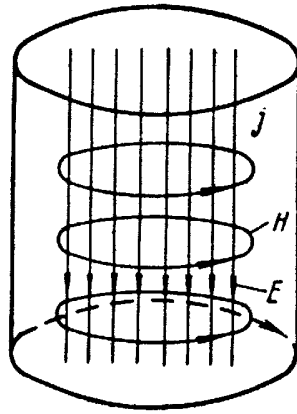


Рис. 5.14. Схема возбуждения объемных колебаний в цилиндрическом резонаторе

Как известно, резонансная частота мода для цилиндрической полости радиуса R определяется выражением

$$f_{(\text{МГц})} = \frac{115}{R(\text{м})}.$$

Резонансную частоту камеры синхроциклотрона ПИЯФ можно оценить как среднюю между резонансными частотами двух цилиндров, один из которых является вписанным в объем камеры, а другой описанным вокруг нее:

$$f_{(\text{МГц})}^{\text{об.}} = \frac{230}{R^{\text{вп.}}(\text{м}) + R^{\text{оп.}}(\text{м})}.$$

Для камеры синхроциклотрона ПИЯФ $R^{\text{вп.}} \approx 3,7$ м, $R^{\text{оп.}} \approx 4,3$ м, отсюда $f^{\text{об.}} = 28,8$ МГц.

Рассчитанное таким способом значение резонансной частоты камеры примерно на 2 МГц выше измеренной. Это можно объяснить тем, что при расчете не учитывалось влияние дуанта, который увеличивает собственную емкость камеры и понижает ее резонансную частоту. Было выяснено, что с помощью регулировочных приспособлений, находящихся в камере (центральные симметрирующие пластины и задняя регулируемая плакировка), не удастся сдвинуть резонансную частоту объемных колебаний более чем на $\pm 0,5$ МГц. Таким образом, резонансная частота объемных колебаний камеры, приблизительно равная 27 МГц, находится внутри рабочего диапазона ускоряющей системы.

Возбуждение объемных колебаний камеры при нормальной работе ускорителя может происходить в случае несимметричного расположения дуанта относительно средней плоскости, проходящей между основаниями камеры, за счет появления вертикальной составляющей электрического поля. При совпадении частоты рабочей программы с частотой объем-

ных колебаний из-за возникновения связи между основными и объемными колебаниями часть энергии генератора будет расходоваться на поддержание объемных колебаний и при достаточно сильной связи между ними будет приводить к разрыву частоты основной программы.

Впоследствии было проверено, что резонансную систему дуант – камера возможно отсимметризовать с помощью центральных регулируемых пластин сверху и снизу камеры, а также независимо с помощью задней регулируемой плакировки у вариаторов так, чтобы объемные колебания не возбуждались.

Поперечные колебания

Резонансные частоты поперечных колебаний дуанта определяются не только его формой, размерами и положением относительно поверхностей камеры, но и величиной подключенной к нему емкости, т. е. зависят от угла поворота вариаторов.

При возбуждении в системе основного мода поперечных колебаний узел напряжений располагается на продольной оси симметрии дуанта, амплитуда ВЧ-напряжения растет слева и справа от продольной оси, достигая максимума по боковой периферии дуанта, и имеет противоположные фазы. Для возбуждения поперечных колебаний достаточно, чтобы в автоколебательной системе существовала асимметрия относительно вертикальной плоскости, проходящей вдоль оси дуанта.

В системе дуант – камера синхроциклотрона ПИЯФ наблюдалось возбуждение основного мода поперечных колебаний, лежащих в диапазоне частот 25–15 МГц. На рис. 5.11 (кривые II) приведены зависимости частоты поперечных колебаний от величины емкости, подключаемой к дуанту, при двух крайних положениях боковых регулировочных конденсаторов, предназначенных по проекту НИИЭФА для симметрирования системы относительно продольной оси и для изменения резонансных частот поперечных колебаний. Величины емкости каждого из них в крайних положениях равны $C_{\max} \approx 400$ пФ, $C_{\min} \approx 50$ пФ.

Таким образом, резонансные частоты основного мода поперечных колебаний лежат внутри рабочего диапазона частот ускоряющей системы и довольно близко подходят к основной рабочей частоте системы.

Колебания паразитных контуров в системе дуант – камера

При измерениях, проводимых на системе дуант – камера, был обнаружен паразитный резонанс на частоте 24 МГц, который обуславливался резонансом дросселей водяного охлаждения. Дроссели по 17 витков диаметром 270 мм были выполнены из 8 медных трубок в параллель диаметром по 18 мм каждая. Чтобы вывести паразитную резонансную частоту

дросселей за диапазон рабочих частот, пришлось уменьшить общую длину трубок, образующих дроссель. При длине трубок ~ 5 м полуволновой резонанс сместился на частоту 32 МГц.

Таким образом, выполнив радиочастотные измерения на системе дуант – камера (без вариаторов и основного генератора), можно сделать следующие выводы:

1) диапазон частот системы дуант – камера $f_{\max} = 32,47$ МГц, $f_{\min} = 10,07$ МГц и коэффициент перекрытия $K_f = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = 3,04$ превышают

необходимые значения f_0 и f_k для протонного и дейтонного диапазонов;

2) паразитная частота объемных колебаний камеры лежит внутри частот рабочего диапазона, что может приводить к его разрыву;

3) паразитные резонансные частоты основного мода поперечных колебаний $f^1 \approx 25-15$ МГц также лежат в пределах частот рабочего диапазона, что может приводить к перескоку генератора дуанта с частоты рабочей программы на частоту поперечных колебаний.

5.4. Вариаторы частоты синхроциклотрона ПИЯФ

Принцип работы и схема вариаторов

Как отмечалось, перестройка резонансной частоты ускоряющей системы синхроциклотрона производится с помощью переменной емкости, выполненной в виде двух вращающихся конденсаторов (вариаторов частоты), подключенных к хвостовой части дуанта. Оба вариатора выполнены идентично, и принципиальная схема одного из них представлена на рис. 5.15.

Вариатор имеет ротор с шестью группами лопастей и за один оборот обеспечивает шесть полных периодических циклов изменения резонансной частоты ускоряющей системы. Один период изменения частоты соответствует повороту ротора на угол 60° , причем от 0 до 39° происходит увеличение эффективной емкости вариатора (рабочий ход изменения частоты программы), а от 39 до 60° – уменьшение эффективной емкости вариатора (нерабочий, обратный, ход изменения частотной программы).

При вращении вариатора пластины ротора (9), угловая протяженность которых 21° , входят в статорные пластины, которые разбиты по угловой протяженности и месту их расположения на два отдельных пакета: дуантный пакет (8) и два индуктивных пакета (1).

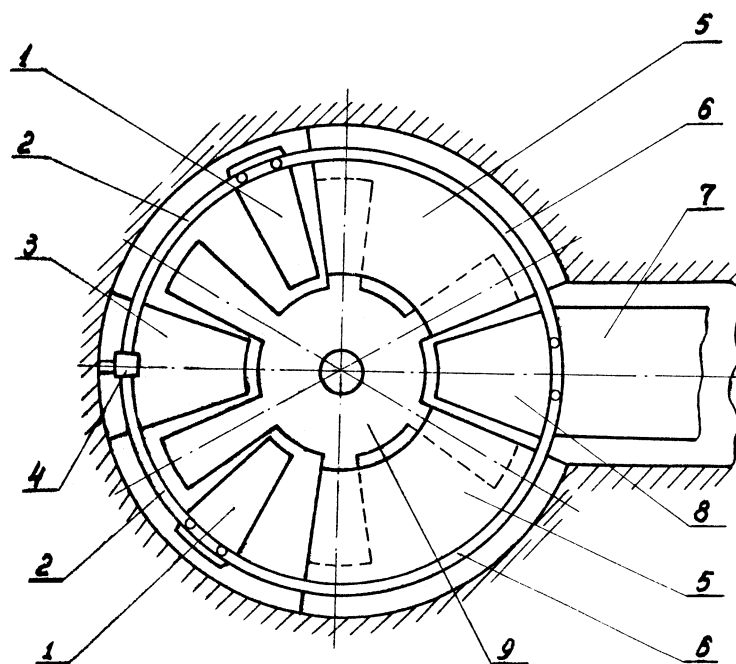


Рис. 5.15. Схема вариатора частоты (ротор показан в положении $\alpha = 0^\circ$): 1 – верхние и нижние индуктивные пакеты; 2 – задние части индуктивных колец; 3 – задний «земляной» пакет; 4 – задняя заземляющая дужка; 5 – верхний и нижний «земляные» пакеты; 6 – передняя часть индуктивных колец; 7 – дуант; 8 – дуантный пакет; 9 – вал ротора вариатора

На рис. 5.16 показаны графики изменения геометрической емкости при вращении ротора для каждого из пакетов: C_1 – дуантного, C_2 – индуктивного.

Заметим, что дуантные и индуктивные пластины имеют потенциал, близкий к потенциалу дуанта, т. е. $\sim 10\text{--}20$ кВ, роторные пластины должны иметь нулевой потенциал по высокой частоте. Такое заземление роторных пластин осуществляется при помощи трех «земляных» пакетов (рис. 5.15): заднего «земляного» пакета и верхнего и нижнего «земляных» пакетов. Дополнительно ротор вариатора заземлен полицилиндрическими конденсаторами, служащими одновременно и для защиты его подшипников от протекания по ним ВЧ-токов.

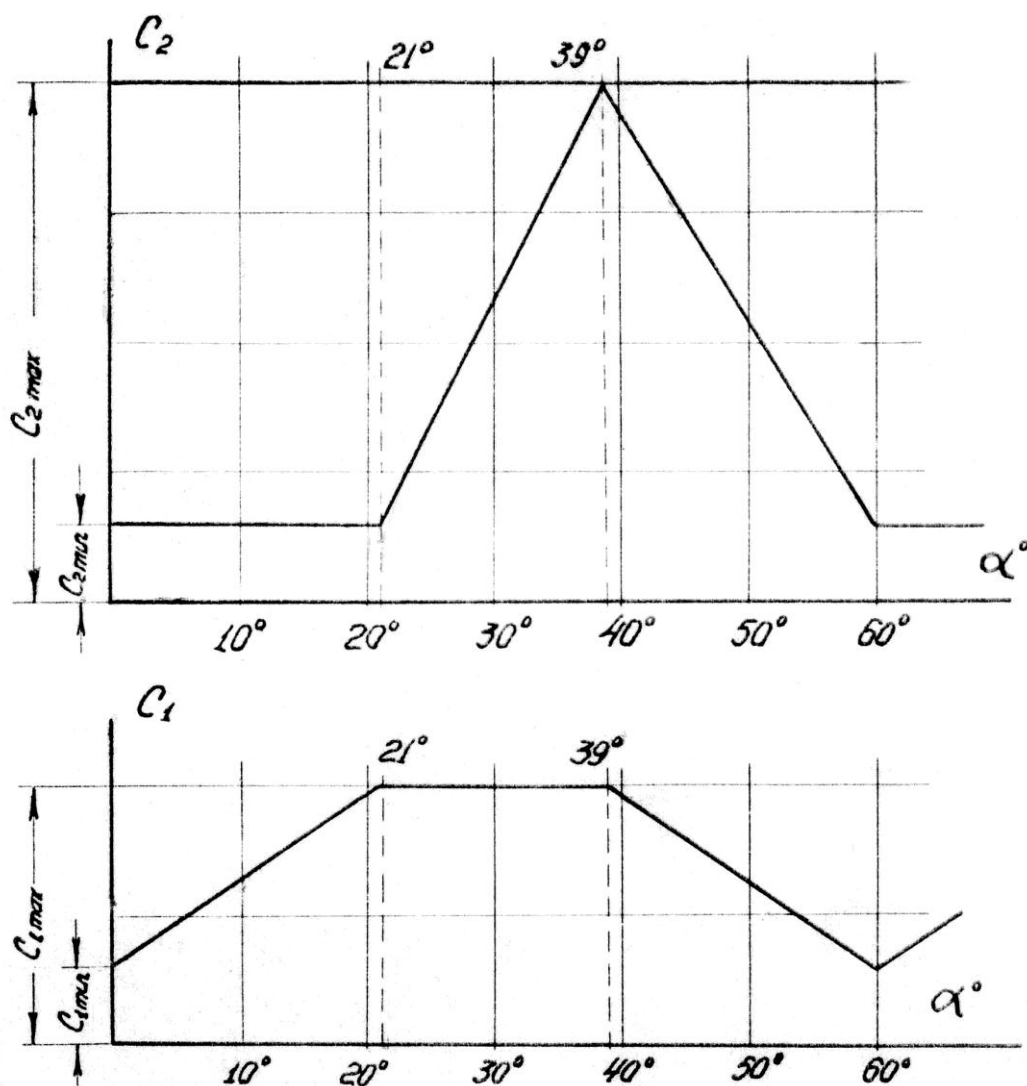


Рис. 5.16. Графики изменения геометрической емкости пакетов при вращении ротора вариатора

Эквивалентная схема вариатора частоты

Как было показано выше, для того чтобы осуществить для дуантной системы перекрытие по частоте от 30 до 13,2 МГц, необходимо изменять величину емкости на конце дуанта от $C_{\min} = 200$ пФ до $C_{\max} = 7\,500$ пФ. То есть вариатор должен обеспечивать изменение емкости с коэффициентом перекрытия по емкости $K_C = C_{\max} / C_{\min} = 37,5$ (см. рис. 5.11). Можно показать, что при помощи вариатора в виде пластинчатого конденсатора невозможно достичь такого большого коэффициента. Поэтому вариатор имеет сложную схему с добавлением индуктивностей и использованием резонансных свойств LC -контуров. При этом эффективная емкость вариатора может быть сделана больше ее геометрической емкости, а $K_C \approx 40$. Для этого между дуантом и индуктивным пакетом была

добавлена индуктивность в виде индуктивных дуг (колец) L_1 , а параллельно индуктивным пакетам C_2 добавлена шунтирующая индуктивность L_2 .

Размеры основных конструктивных элементов вариатора по порядку величины соизмеримы с длиной волны ускоряющего напряжения, поэтому вариатор следует рассматривать как систему с распределенными параметрами, расчет которой из-за сложной геометрической формы элементов крайне затруднен. Поэтому для оценки параметров вариатора мы использовали приближение, в котором вариатор представляет собой систему с сосредоточенными параметрами.

Упрощенная эквивалентная схема для двух вариаторов приведена на рис. 5.17а, а полная схема каждого из вариаторов – на рис. 5.17б.

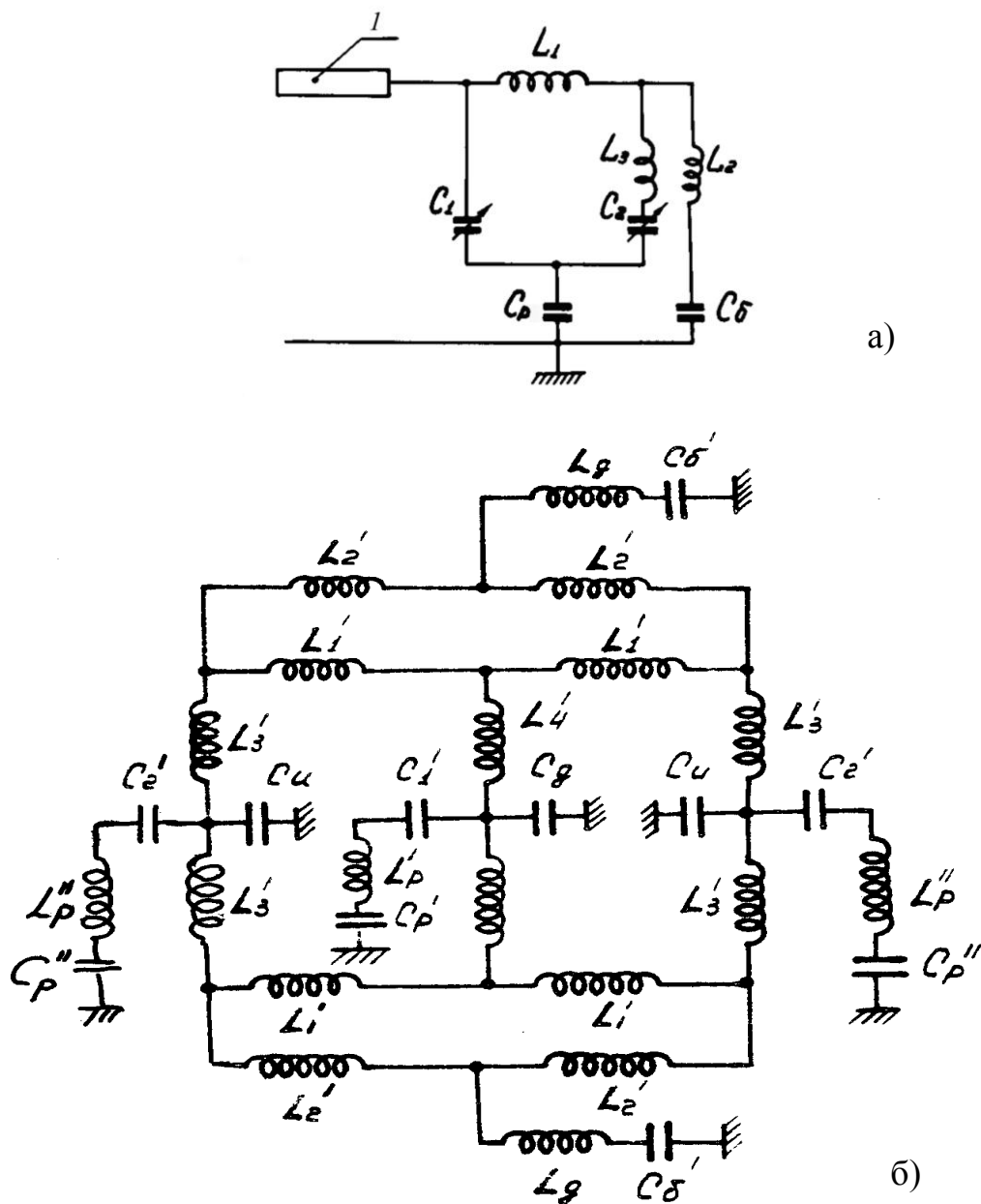


Рис. 5.17. Схемы вариаторов:

- а) упрощенная эквивалентная схема для двух вариаторов;
- б) эквивалентная схема каждого из вариаторов

На рис. 5.17а введены обозначения: 1 – дуант; $C_1 = 2C'_1$ и $C_2 = 4C'_2$ – переменные емкости дуантного и индуктивного пакетов вариаторов на ротор; $L_1 = L'_1/8$ и $L_2 = L'_2/8 + L_d/4$ – индуктивности дуг индуктивных колец; $L_3 = L'_3/8$ – индуктивность конструкции подсоединения индуктивных пакетов к индуктивным кольцам; C_p – емкость ротора вариаторов на землю, образованная «земляными» пакетами и полицилиндрическими конденсаторами; C_6 – емкость задних блокировочных конденсаторов, заземляющих индуктивные кольца вариаторов по ВЧ.

На рис. 5.17б: L'_1 – индуктивность части дуги от дуантного до индуктивного пакета; L'_2 – индуктивность части дуги от индуктивного пакета до заземляющей дужки; L_d – индуктивность заземляющей дужки; L'_3 – индуктивность подсоединения дуантного пакета к дугам; L'_4 – индуктивность подсоединения индуктивного пакета к дугам; L'_p, L''_p – индуктивности ротора; C'_1 – емкость дуантного пакета на ротор; C'_2 – емкость индуктивного пакета на ротор; C'_p, C''_p – емкости ротора на землю; C'_6 – емкость блокировочного конденсатора; $C''_и$ – емкость индуктивного пакета на землю; $C'_д$ – емкость дуантного пакета на землю.

Сложение последовательных и параллельных индуктивностей и емкостей в схеме на рис. 5.17б приводит к схеме, представленной на рис. 5.18а, б.

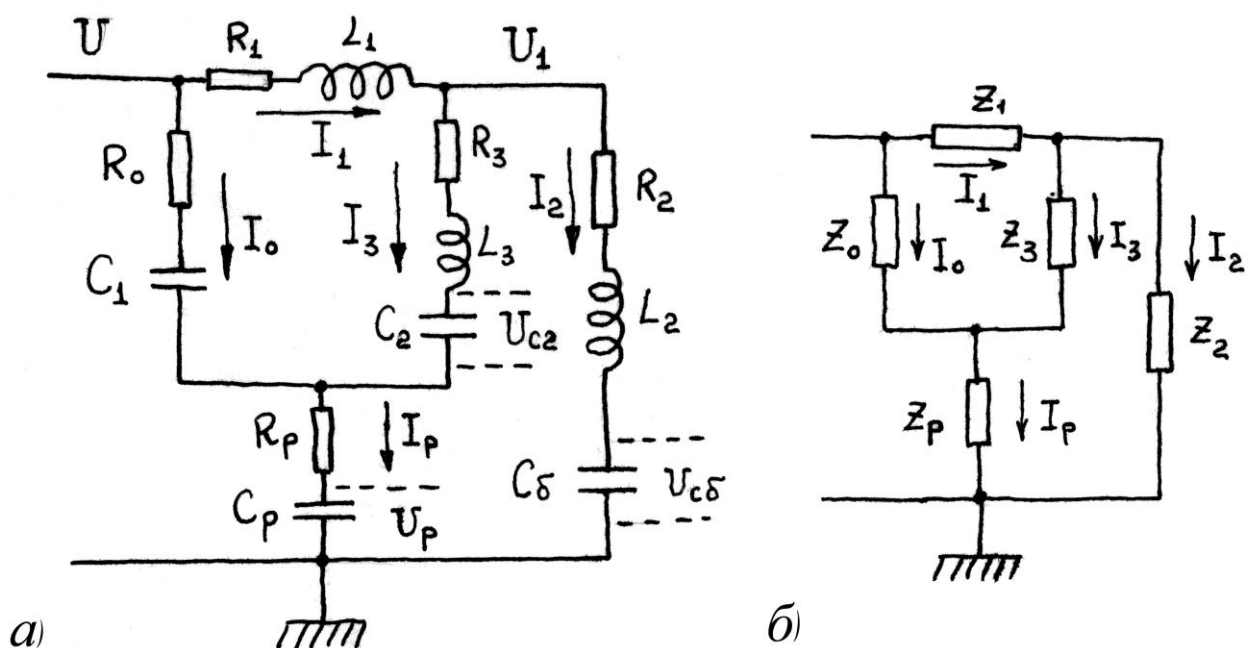


Рис. 5.18. Сложение последовательных (а) и параллельных (б) индуктивностей и емкостей

На рис. 5.18 введены обозначения: C_1 – емкость дуантного пакета на ротор; C_2 – емкость двух индуктивных пакетов на ротор; C_p – емкость ротора на землю; C_6 – емкость заднего блокировочного конденсатора; L_1 – индуктивность передней части дуг от дуантного пакета до индуктивного; L_2 – суммарная индуктивность задней части дуг и шунтов; L_3 – индуктивность подсоединения индуктивных пакетов к дугам; R_0, R_1, R_2, R_3 и R_p – соответствующие сопротивления потерь элементов вариатора; U – амплитуда напряжения в месте подключения вариатора к дуанту:

$$U = \frac{U_{\text{уск.}}}{n_d},$$

где $U_{\text{уск.}}$ – амплитуда ускоряющего напряжения на дуанте, а n_d – коэффициент трансформации напряжения от ускоряющей щели к месту подключения вариатора.

Параметрами вариатора, определяющими его характеристики в случае вариатора без потерь, являются три значения индуктивности L_1, L_2 и L_3 , два значения емкости C_p и C_6 и две функции $C_1(\alpha)$ и $C_2(\alpha)$, определяющие зависимость емкостей C_1 и C_2 от угла поворота вариатора.

Если известны начальная f_0 и конечная f_k частоты системы вариатор – дуант, то могут быть написаны два условия, из которых можно определить какие-либо два параметра вариатора, например L_2 и L_3 , при заданных остальных параметрах. Если, кроме того, задана необходимая частотная программа $f(\alpha)$, то дополнительно может быть определена одна функция от угла, например $C_2(\alpha)$.

Ниже мы найдем формулы для выражения этих параметров.

Упрощенная схема вариатора частоты

Для облегчения анализа процессов, происходящих в вариаторе, схема вариатора без потерь может быть упрощена. Поскольку величины емкостей C_p и C_6 велики по сравнению с C_1 и C_2 (рис. 5.18а), их можно положить равными бесконечности. В этом случае схема вариатора приобретает вид, представленный на рис. 5.19.

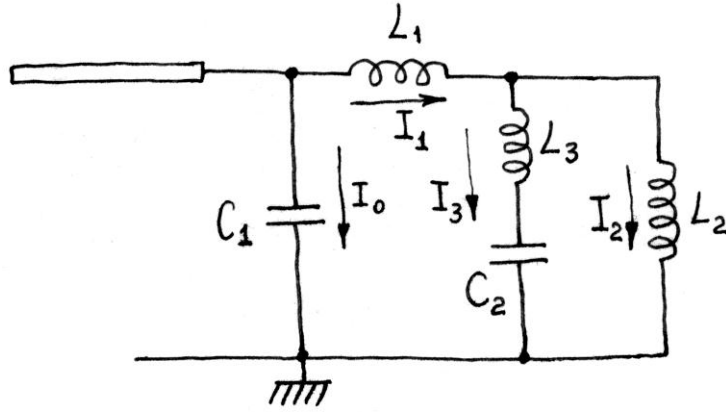


Рис. 5.19. Упрощенная схема вариатора

Полагая входное сопротивление вариатора $Z_p = 0$, получим его входную проводимость $y_{\text{вх.}} = \frac{1}{z_0} + \frac{z_2 + z_3}{z_1 z_2 + z_1 z_3 + z_2 z_3}$. Заменяя величины z их выражениями через L_1, L_2, L_3, C_1, C_2 и ω , найдем

$$y_{\text{вх.}} = j\omega C_1 - j \frac{1}{\omega(L_1 + L_2)} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2},$$

где $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{C_2(L_3 + \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2})}}$; $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{C_2(L_2 + L_3)}}$.

Представляя входную проводимость вариатора в виде $y_{\text{вх.}} = j\omega C_{\text{экв.}}$, получим выражение для эквивалентной емкости вариатора

$$C_{\text{экв.}} = C_1 - \frac{1}{\omega^2(L_1 + L_2)} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2}.$$

Введем обозначения: $\omega_3 = \frac{1}{\sqrt{C_2 L_3}}$; $\omega_4 = \frac{1}{\sqrt{C_1(L_1 + L_2)}}$;

$$\omega_{p1, p2} = \frac{\omega_1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_4}{\omega_2}\right)^2 \pm \sqrt{\left[1 + \left(\frac{\omega_4}{\omega_2}\right)^2\right]^2 - 4 \left(\frac{\omega_4}{\omega_1}\right)^2}}.$$

Легко видеть, что имеет место соотношение $\omega_2 < \omega_1 < \omega_3$. Используя эти обозначения, входную проводимость вариатора можно представить в виде

$$y_{\text{вх.}} = j\omega C_1 \frac{\left[1 - \left(\frac{\omega_{p1}}{\omega}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega_{p2}}{\omega}\right)^2\right]}{1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2}.$$

Соответственно, входное сопротивление вариатора будет

$$Z_{\text{вх.}} = -j \frac{1}{\omega C_1} \frac{1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega_{p1}}{\omega}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega_{p2}}{\omega}\right)^2\right]}.$$

Частоты ω_{p1} и ω_{p2} являются частотами параллельных резонансов вариатора, а частота ω_1 – частотой последовательного резонанса. Из общей теории цепей следует, что при любых значениях параметров вариатора имеет место соотношение

$$\omega_{p1} < \omega_1 < \omega_{p2}.$$

В соответствии с этим входное сопротивление вариатора без потерь имеет вид, представленный на рис. 5.20.

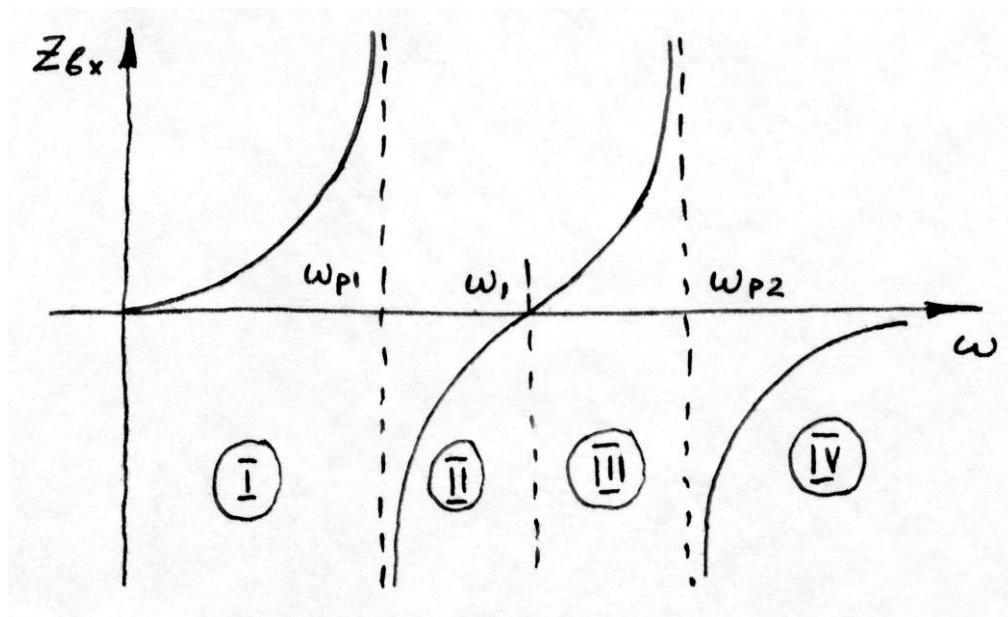


Рис. 5.20. Входное сопротивление вариатора в зависимости от частоты

В областях I и III входное сопротивление вариатора носит индуктивный характер, в областях II и IV – емкостный. Рабочей областью вариатора является область II, в которой цепочка, составленная из L_3 и C_2 , работает как емкость.

Выражения для токов в различных цепях вариатора имеют вид (направления токов приняты исходя из рис. 5.19)

$$I_1 = \frac{U}{Z_4} = -j \frac{U}{\omega(L_1 + L_2)} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2};$$

$$I_2 = -j \frac{U}{\omega(L_1 + L_2)} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_3}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2};$$

$$I_3 = I_1 - I_2 = j \frac{U L_2}{L_1 + L_2} \frac{\omega C_2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2};$$

$$I_0 = j \omega C_1 U.$$

Выражения для амплитуд напряжений U_1 и U_{C2} имеют вид

$$U_1 = I_2 j \omega L_2 = \frac{U L_2}{L_1 + L_2} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_3}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2};$$

$$U_{C2} = \frac{I_3}{j \omega C_2} = \frac{U L_2}{L_1 + L_2} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2};$$

$$U_{C2} = \frac{U_1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_3}\right)^2}.$$

Эпюры распределения амплитуд напряжения по элементам вариатора представлены на рис. 5.21.

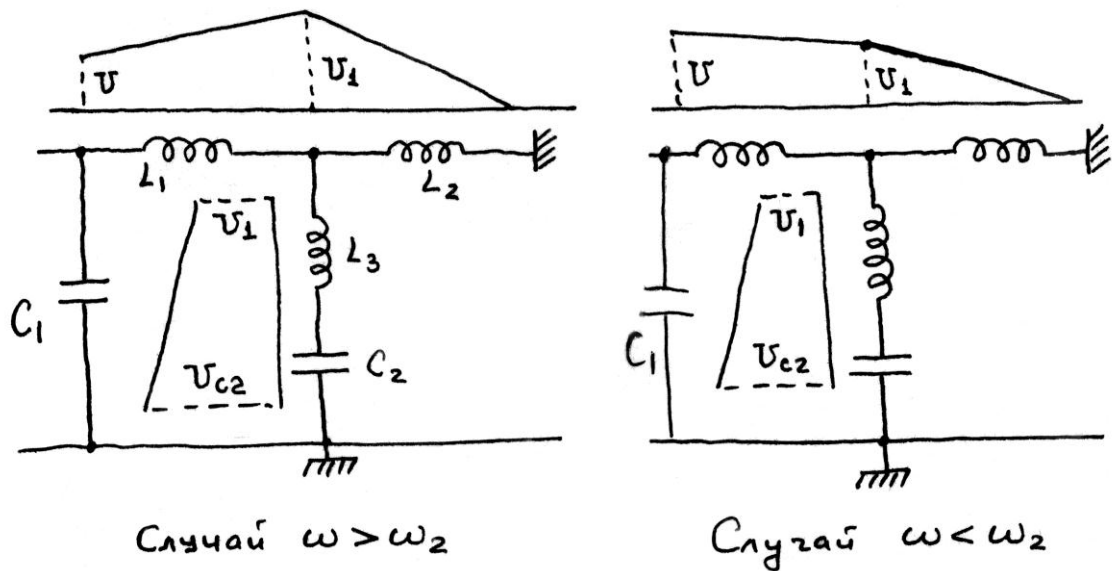


Рис. 5.21. Эпюры распределения амплитуд напряжения по элементам вариатора

При $\omega = \omega_2$ величина $U_1 = U$. Выражения для токов I_2 и I_3 можно представить в виде

$$I_2 = I_1 \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_3}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}; \quad I_3 = -I_1 \frac{\omega^2 L_2 C_2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}.$$

Общий ток вариатора

$$I = I_0 + I_1 = jU \left(\omega C_1 - \frac{1}{\omega(L_1 + L_2)} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2} \right)$$

или

$$I = U y_{\text{вх.}} = jU \omega C_1 \frac{\left[1 - \left(\frac{\omega_{p1}}{\omega}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega_{p2}}{\omega}\right)^2\right]}{1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2}.$$

На рис. 5.22 представлены зависимости токов I_1 , I_2 и I_3 от частоты при фиксированном угле поворота вариатора. Отрицательные значения токов соответствуют индуктивному току, положительные – емкостному. Рабочей области II на рис. 5.20 соответствует область изменения ω , лежащая левее ω_1 .

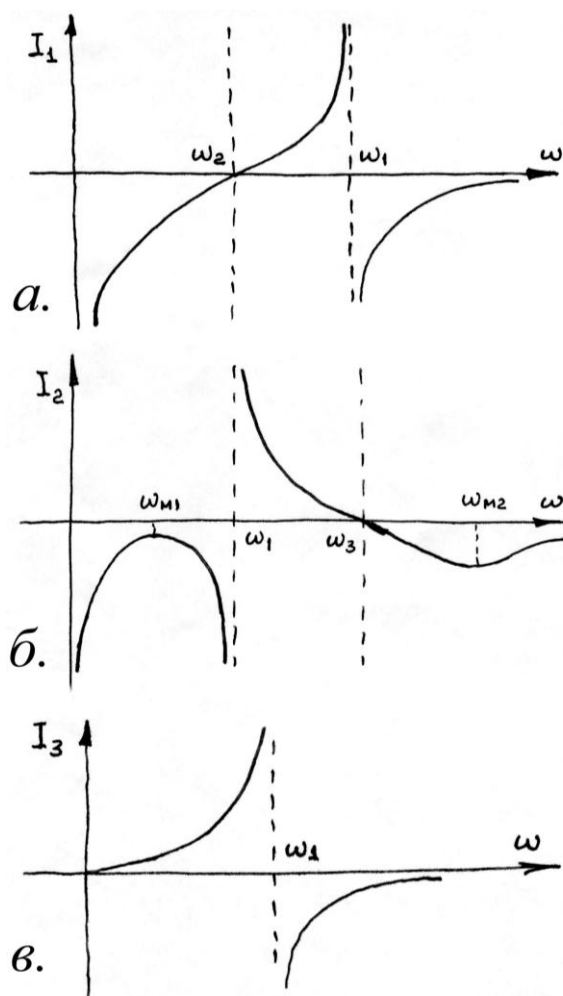


Рис. 5.22. Зависимости токов I_1 , I_2 и I_3 от частоты при фиксированном угле поворота вариатора

Полученные выше формулы позволяют рассчитать основные параметры вариатора, если будут известны величины емкостей и индуктивностей, входящих в их конструкцию. Эти параметры оценивались по формулам, приведенным в главе 4, а уточнение полученных величин проводилось экспериментально на реальном вариаторе, размещенном на стенде.

Прежде чем перейти к методике измерения параметров вариатора, остановимся на кратком описании его конструкции.

Конструкция вариатора частоты

Конструкция одного из вариаторов (левого) приведена на рис. 5.23. На валу ротора находится шесть лопастей, каждая из которых при вращении ротора последовательно входит в емкостное зацепление с пластинами, прикрепленными к дуанту непосредственно (дуантный пакет) или через индуктивные дуги (индуктивные пакеты). Заземление ротора по высокой частоте производится через емкостные «земляные» пакеты. (Более подробное описание конструкции вариатора приведено в главе 6.)

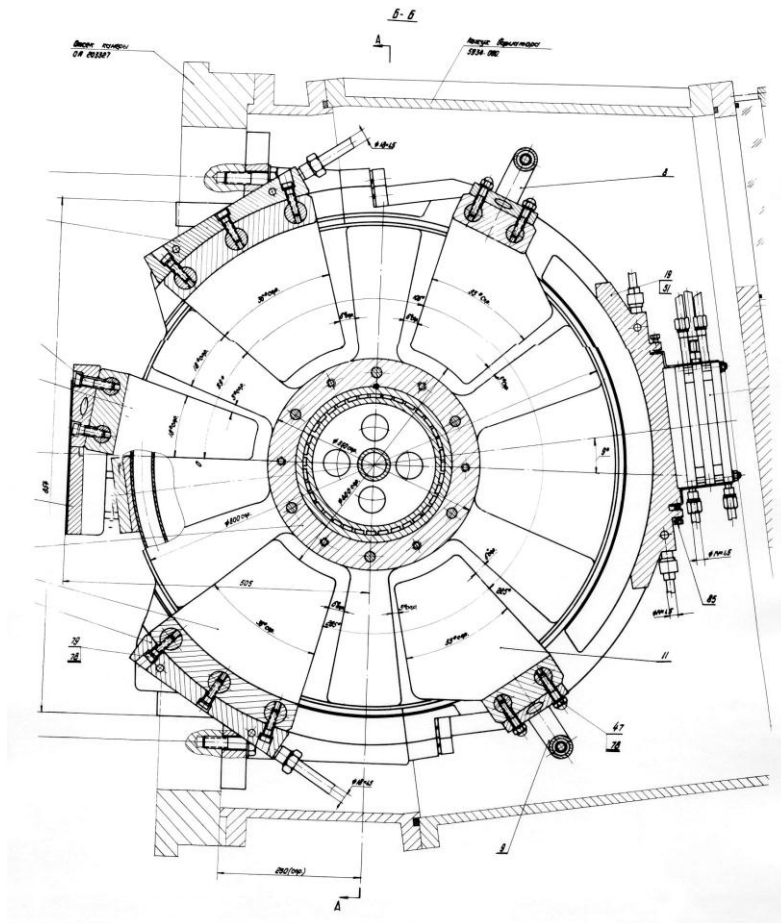
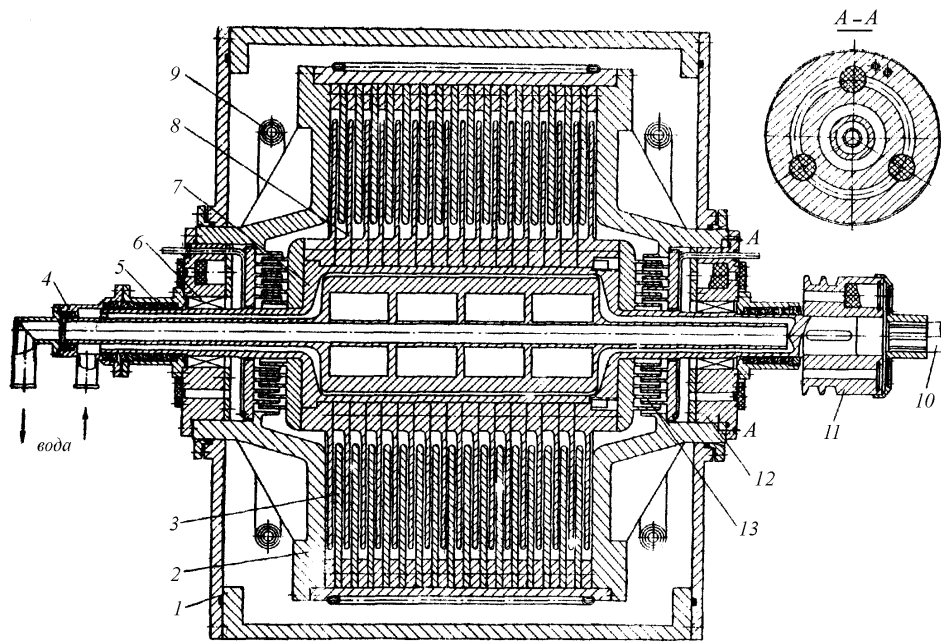


Рис. 5.23. Вариатор частоты (левый):

1 – кожух вакуумный; 2 – несущий корпус; 3 – «земляной» пакет (в разрезе условно); 4 – муфта водораспределительная; 5 – вакуумное уплотнение вала; 6 – узел подшипника с маслоуплотнением; 7 – вал ротора; 8 – диски ротора; 9 – индуктивное кольцо; 10 – соединительный вал; 11 – приводной шкив; 12 – несущая изоляционная обойма; 13 – полицилиндрический конденсатор

Измерение радиочастотных параметров вариатора частоты

С февраля по май 1967 года на изолированном от ускоряющей системы вариаторе проводились радиочастотные измерения с целью определения его параметров¹. Были измерены параметры отдельных элементов вариатора, определены значения резонансных частот f_{p1} , f_1 и f_{p2} , измерены величины его эффективных емкостей $C_{\text{эфф.}}^{\min}$ и $C_{\text{эфф.}}^{\max}$, и выявлены паразитные резонансы, обусловленные конструктивными особенностями вариатора [3].

Необходимо отметить, что вариатор представляет собой систему с распределенными параметрами, поэтому проведение измерений представляет известные трудности, а полученные в результате измерений его параметры необходимо считать ориентировочными.

Измерение максимальных величин емкостей дуантных и индуктивных пакетов

Из-за конструктивных особенностей вариатора независимое измерение величин C_1 и C_2 представляет известные трудности. Поэтому оценка величин C_1 и C_2 производилась следующим образом: при разомкнутой индуктивности L_2 (рис. 5.19) была измерена величина суммарной емкости $C = C_1 + C_2$ при различных углах поворота ротора α . Измерения производились универсальным мостом типа УМ-3 по методу двух вольтметров и эталонной емкости на частоте ~ 10 кГц. Полученные этими двумя способами величины C отличались не более чем на 5 % друг от друга, и их средние значения в зависимости от угла α приведены на рис. 5.24.

Величина их разности хорошо согласуется с суммарной геометрической величиной емкостей C_1 и C_2 при $\alpha = 39^\circ$, рассчитанной только исходя из величины площадей роторных лопаток без учета краевых эффектов:

$$C_{\max} - C_{\min} = 4\,700 \text{ пФ}; [C_1(39^\circ) + C_2(39^\circ)] \text{ геом.} = 4\,400 \text{ пФ.}$$

Так как при $\alpha = 39^\circ$ емкость C_{\max} образована двумя группами лопаток ротора, полностью находящимися в дуантных пакетах, и четырьмя группами лопаток ротора, находящимися в индуктивных пакетах, то можно считать, что

$$C_{1\max} = 2\,000 \text{ пФ} = 1\,800 \text{ см}; C_{2\max} = 4\,000 \text{ пФ} = 3\,600 \text{ см.}$$

¹ Измерения проводились на одном вариаторе, и все величины, соответственно, пересчитывались на два вариатора.

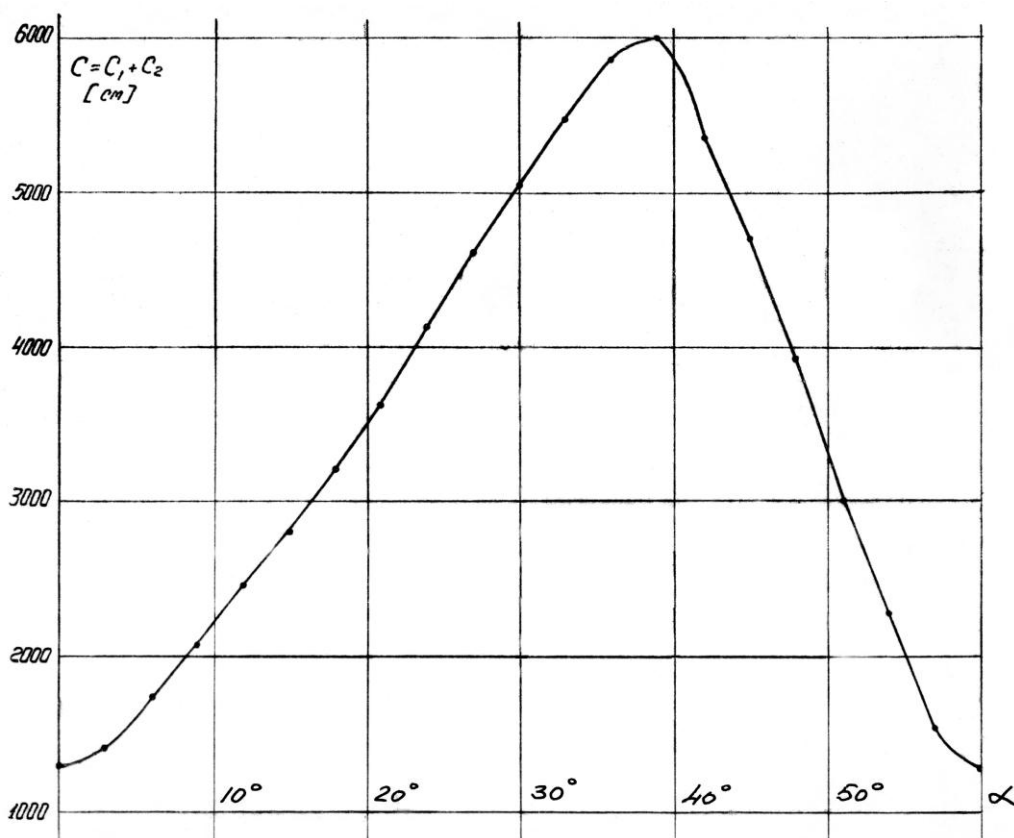


Рис. 5.24. Зависимость емкости C вариатора от угла поворота α ротора вариатора. Крайние значения C при $\alpha = 0^\circ$ и 39° равны: $C_{\min} = 1\,300$ пФ = $1\,170$ см, $C_{\max} = 6\,000$ пФ = $5\,400$ см

Измерение индуктивностей L_1 и L_2

Величины L_1 и L_2 были получены из значений резонансных частот контуров, образованных отдельными элементами вариатора, а также независимо при полностью изолированном от вариатора индуктивном кольце (рис. 6.6). Полученные этими двумя методами величины индуктивностей L_1 и L_2 практически совпадают. Для дальнейших расчетов принимаем $L_1 = 34$ см, $L_2 = 40$ см.

Измерение минимальных величин емкостей дуантных и индуктивных пакетов

Определение минимальных величин емкостей $C_{1\min}$ и $C_{2\min}$ производилось следующим образом: при закороченной дуантной емкости C_1 и разомкнутой индуктивности L_2 резонанс параллельного контура $L_1 C_2$ ($L_3 \ll L_1$) при $\alpha = 0^\circ$ наблюдался на частоте $f = 33$ МГц, что позволяет найти по формуле $f = 1/\sqrt{LC}$ $C_{2\min} = 690$ пФ = 620 см. Аналогично, при закороченной C_2 , найдем $C_{1\min} = 610$ пФ = 550 см.

Все измеренные параметры вариатора приведены в табл. 5.3, там же приведены значения параметров вариатора по проекту НИИЭФА.

Таблица 5.3

Параметры элементов вариатора

	Измеренные, см	По проекту НИИЭФА, см
$C_{1\min}$	550	300
$C_{2\min}$	620	400
$C_{1\max}$	1 800	1 800
$C_{2\max}$	3 600	3 600
L_1	34	—
L_2	40	—

Необходимо отметить значительное расхождение в величинах для минимальных значений $C_{1\min}$ и $C_{2\min}$. Измеренные значения оказались значительно больше ожидаемых по проекту НИИЭФА.

Измерение эффективной емкости вариатора частоты

Измерение $C_{\text{эфф}}$ вариатора проводилось по методу двух вольтметров и эталонного резистора R .

Измеренные величины $C_{\text{эфф}}(0^\circ)$ в диапазоне частот 25–33 МГц и $C_{\text{эфф}}(39^\circ)$ в диапазоне 12–16 МГц приведены на рис. 5.25.

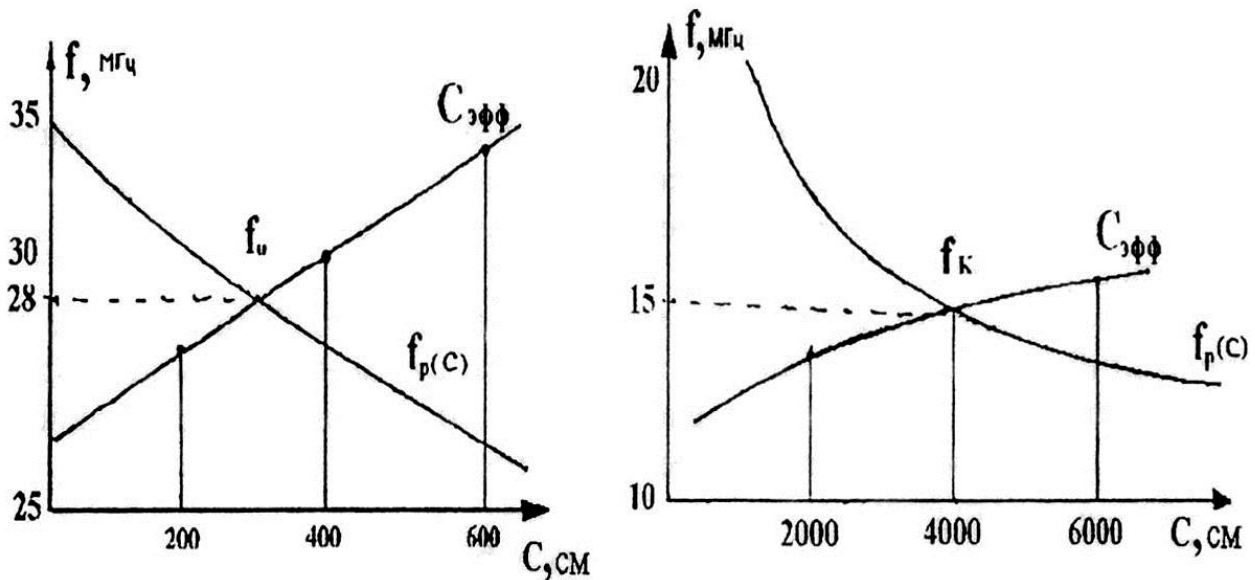


Рис. 5.25. Определение начальной f_0 и конечной f_k резонансных частот системы дуант – вариатор

Здесь же нанесена зависимость резонансной частоты дуанта от величины емкости, подключаемой к его концу, $f_d(C)$. Пересечение этих кривых дает значение граничных частот f_0 и f_k всей системы в целом и вели-

чины эффективных суммарных емкостей вариаторов на этих частотах:
 $C_{\min}^{\text{эфф.}} = 300 \text{ пФ}$; $C_{\max}^{\text{эфф.}} = 3\,800 \text{ пФ}$.

В дальнейшем было выяснено, что измеренные величины f_0 и f_k хорошо согласуются со значениями граничных частот, полученных на полностью собранной ускоряющей системе.

Паразитные колебания вариатора частоты

При измерениях, проводимых на вариаторе, были обнаружены два паразитных колебания, обусловленных особенностями конструкции вариатора, значения частот которых попадали в рабочий диапазон.

Продольное колебание

Один из паразитных резонансов вариатора f_1^B , обнаруженный на частоте 25,5 МГц, был обусловлен полуволновым продольным возбуждением ротора вариатора с максимумом амплитуды в середине оси ротора (рис. 5.26а).

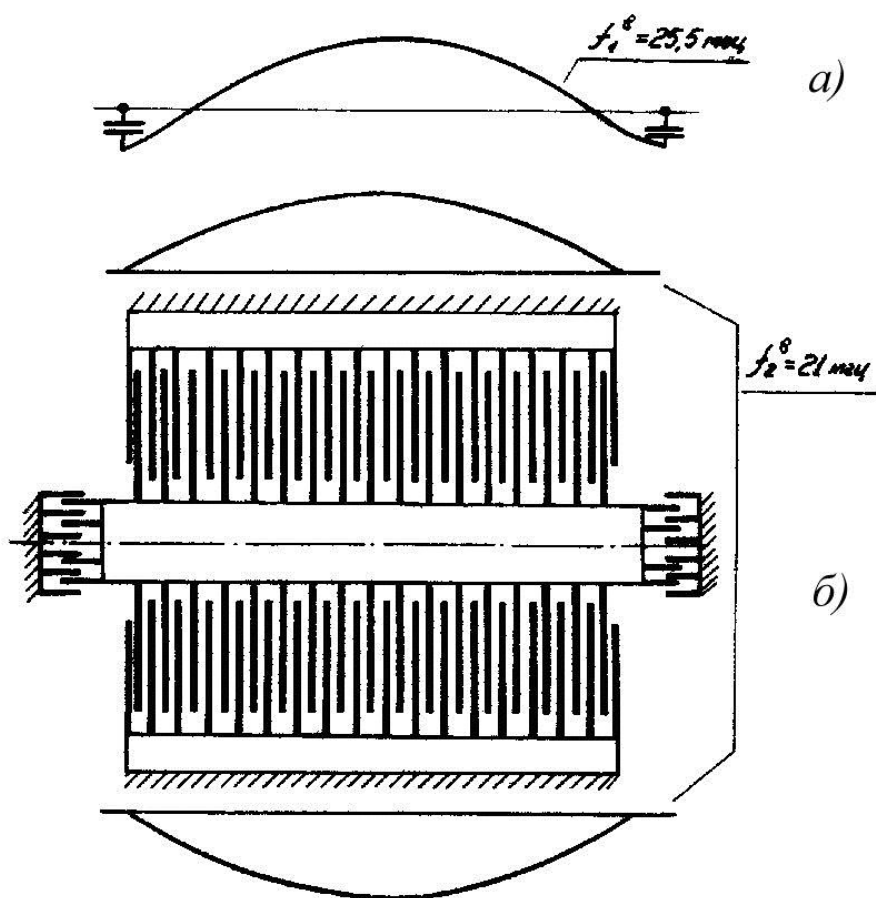


Рис. 5.26. Схема распределения амплитуд паразитных колебаний вариатора:
а) продольное колебание; б) кольцевое колебание

Распределение амплитуды определялось прибором типа Swob Н-3 фирмы Rohe und Schwarz, Мюнхен (измеритель частотных характеристик), при запитке между осью ротора и любым из «земляных» пакетов. Величина f_1^B слабо зависела ($\pm 0,5$ МГц) от положения лопаток ротора относительно «земляных» пакетов.

Было выяснено, что в продольном направлении оси ротора его лопатки совместно с «земляными» пакетами образуют резонансную линию, а полицилиндрические конденсаторы, находящиеся на концах оси ротора, играют роль сосредоточенных емкостей, подключенных к концам этой резонансной линии. С увеличением величины емкостей, подключаемых параллельно полицилиндрическим конденсаторам, значение f_1^B уменьшалось, и, наоборот, чтобы увести этот паразитный резонанс за границу рабочего диапазона, была снята часть внутренних колец полицилиндрических конденсаторов. При этом паразитный резонанс f_1^B переместился вверх, на частоту 33 МГц, т. е. за границу рабочего диапазона.

Кольцевое колебание

При подключении выхода измерителя частотных характеристик между ротором и «земляными» пакетами одновременно с продольным резонансом ротора f_1^B наблюдался еще один резонанс f_2^B на частоте 21 МГц. Величина f_2^B также не зависела от угла, и распределение амплитуды имело максимум в середине оси ротора. В отличие от f_1^B величина f_2^B не зависела и от величины емкости полицилиндрических конденсаторов. В дальнейшем было выяснено, что верхние и нижние «земляные» пакеты совместно с лопатками ротора образуют кольцевую резонансную линию. Примерное распределение амплитуды вдоль «земляных» пакетов показано на рис. 5.26б. Фазы напряжения на верхних и нижних «земляных» пакетах, измеренные фазометром, описанным в [2], были сдвинуты на 180° . При снятии верхнего или нижнего «земляного» пакета паразитный резонанс вариатора f_2^B не наблюдался.

Таким образом, в результате радиочастотных измерений, проведенных на вариаторе, были сделаны следующие выводы:

1) требуется разработать необходимые конструктивные изменения элементов вариатора, т. к. получившийся диапазон граничных частот $f_0 = 28,0$ МГц, $f_k = 15,0$ МГц значительно меньше необходимого для достижения энергии ускоренных протонов 1 ГэВ:

$$f_0 = 28,88 \text{ МГц}; f_k = 13,18 \text{ МГц};$$

2) необходимо исследовать поведение паразитных резонансов вариатора

$$f_1^B = 25,5 \text{ МГц}; \quad f_2^B = 21 \text{ МГц},$$

попадающих в диапазон рабочих частот на полностью собранной системе, т. к. при прохождении основной частоты программы через значения этих паразитных резонансов возможны разрывы частоты основной программы.

Экспериментально измеренные радиочастотные параметры дуанта и вариатора позволили перейти к измерению параметров системы дуант – вариатор.

Измерение радиочастотных параметров системы дуант – вариатор

В мае 1967 года оба вариатора частоты были полностью смонтированы на дуанте системы синхроциклотрона. С мая 1967 по ноябрь 1968 года производились экспериментальные измерения радиочастотных параметров и наладка всей резонансной системы в целом, а также работы, связанные с запуском ускорителя и получением пучка ускоренных протонов на внутренней мишени [4].

Основные этапы наладки резонансной системы дуант – вариатор (без основного генератора) включали в себя получение необходимого рабочего протонного диапазона, устранение разрывов в частотной программе из-за паразитных резонансов, симметрирование системы, а также частичное исправление формы частотной кривой.

Возбуждение резонансной системы производилось как от внешних задающих генераторов, так и от генератора самой системы. Измерения напряжений и фаз в различных точках резонансной системы проводились по методике, приведенной в работе [2].

На рис. 5.27 приведены зависимости всех резонансных частот системы дуант – вариатор от угла поворота ротора вариаторов, полученные на полностью смонтированной системе без вакуума. Возбуждение системы производилось от внешнего задающего генератора через фидер прямой связи, и амплитуда электрического напряжения в ускоряющей щели дуанта составляла величину несколько В.

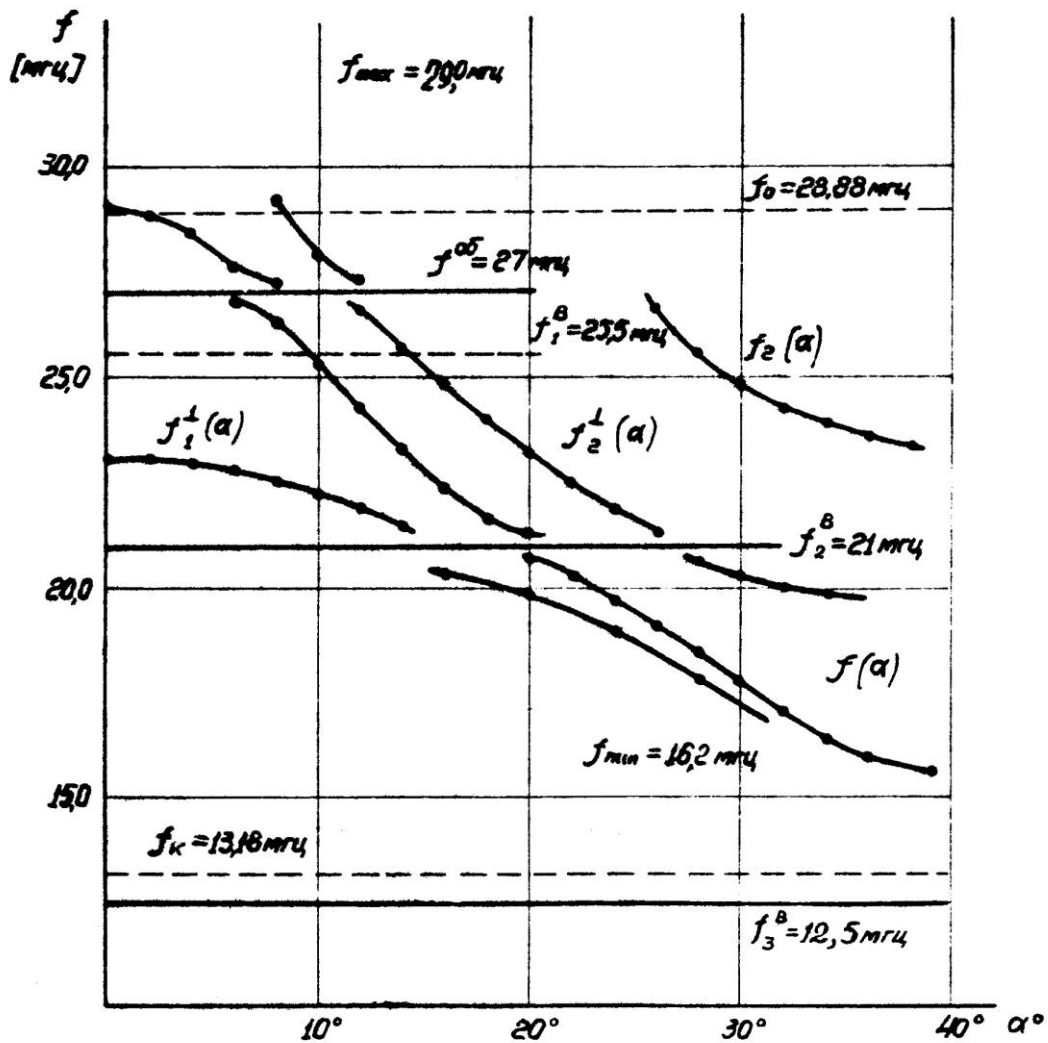


Рис. 5.27. Резонансные частоты системы дуант – вариатор.

$f(\alpha)$ – рабочая частота системы, соответствующая основному продольному模у колебаний; $f_2(\alpha)$ – вторая частота системы, также соответствующая основному模у колебаний, обусловленная вторым емкостным диапазоном $Z_{вх.}$ вариаторов при $\omega > \omega_{p2}$ (см. рис. 5.20); $f_1^\perp(\alpha)$ и $f_2^\perp(\alpha)$ – частоты поперечных колебаний системы; $f^{об.}$ – паразитная частота объемных колебаний камеры; f_1^B, f_2^B, f_3^B – паразитные частоты возбуждения вариатора

Из рис. 5.27 следует, что получившийся рабочий диапазон для резонансной системы $f_{max} = 29,0$ МГц, $f_{min} = 15,5$ МГц меньше необходимого для ускорения протонов до энергии 1 ГэВ и хорошо согласуется с величинами, полученными независимо при измерениях на дуанте (см. рис. 5.25). Все паразитные резонансы: $f^{об.}$, f_1^B и f_2^B , обнаруженные ранее, приводят к разрывам рабочей частотной программы. Нерабочие частотные программы $f_2(\alpha)$, $f_1^\perp(\alpha)$ и $f_2^\perp(\alpha)$ также претерпевают разрывы

в местах совпадения с частотами паразитных резонансов. Отсутствие разрывов в районе 25,5 МГц объясняется тем, что при снятии кривых (рис. 5.27) паразитный резонанс вариаторов $f_1^B = 25,5$ МГц был предварительно уведен вверх, за пределы рабочего диапазона, за счет снятия части полицилиндрических конденсаторов с осей роторов вариаторов.

На основе вышеприведенных измерений можно сделать следующие выводы:

1) конструкция ВЧ-системы не позволяет получить необходимый для ускорения диапазон частот 30–13,18 МГц;

2) все паразитные резонансы будут мешать процессу ускорения, и их необходимо устранить.

5.5. Настройка высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ

Получение рабочего диапазона частот, необходимого для ускорения протонов до энергии 1 ГэВ

Для ускорения на синхроциклотроне протонов до энергии 1 ГэВ необходимо иметь рабочий диапазон частот $f_{\max} \approx 30$ МГц, $f_{\min} \approx 13,18$ МГц (запас на ~ 1 МГц в величине f_{\max} диктуется необходимостью получения достаточной величины $df/d\alpha$ в области частоты захвата $f_0 = 28,88$ МГц).

Таким образом, полученный диапазон частот $f_{\max} = 29,0$ МГц, $f_{\min} = 15,5$ МГц необходимо было расширить на 1 МГц в область верхних частот и на 2,3 МГц в область нижних частот.

По проекту НИИЭФА вариатор не имел регулируемых элементов, позволявших менять его параметры, поэтому расширение диапазона могло быть получено лишь путем конструктивной переделки отдельных элементов вариатора.

Проанализируем полученное выше выражение для эквивалентной емкости вариатора:

$$C_{\text{экв.}}(\alpha) = C_1(\alpha) \frac{\left(1 - \frac{f_{p1}^2(\alpha)}{f^2(\alpha)}\right) \left(1 - \frac{f_{p2}^2(\alpha)}{f^2(\alpha)}\right)}{1 - \frac{f_1^2(\alpha)}{f^2(\alpha)}}$$

где $f_1(\alpha) = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_2(\alpha) \left(L_3 + \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}\right)}}$; $f_2(\alpha) = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_2(\alpha) (L_2 + L_3)}}$;

$$f_3(\alpha) = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1(\alpha)(L_1 + L_2)}};$$

$$f_{p1}(\alpha), f_{p2}(\alpha) = \frac{f_1(\alpha)}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{f_3^2(\alpha)}{f_2^2(\alpha)} \pm \sqrt{\left(1 + \frac{f_3^2(\alpha)}{f_2^2(\alpha)}\right) - 4 \frac{f_3^2(\alpha)}{f_1^2(\alpha)}}}.$$

Из выражения для $C_{\text{экв}}$ следует, что для уменьшения начальной емкости вариатора необходимо так выбрать входящие в него индуктивности, чтобы на верхнем конце диапазона частота параллельного резонанса f_{p1} была близка к начальной частоте ускоряющего напряжения. В этом случае эквивалентная емкость будет пропорциональна расстройке $\Delta f = f - f_{p1}$ и при достаточно малой величине расстройки будет значительно меньше геометрической емкости дуантного и индуктивных пакетов. В нижней части диапазона для увеличения конечной емкости вариатора необходимо, чтобы частота последовательного резонанса была близка к конечной частоте ускоряющего напряжения. В этом случае эквивалентная емкость вариатора будет обратно пропорциональна расстройке $\Delta f = f_1 - f$ и при достаточно малой расстройке будет значительно больше геометрической емкости дуантного и индуктивных пакетов.

Анализ выражения для $C_{\text{экв}}$ показал, что для уменьшения начальной емкости вариатора необходимо увеличить частоту f_{p1} , а для увеличения конечной емкости уменьшить частоту f_1 .

Из эквивалентной схемы вариатора следует, что для расширения диапазона в область нижних частот необходимо уменьшить значение

$$f_1(39^\circ) = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_2(39^\circ) \left[\frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} + L_3 \right]}},$$

а чтобы расширить в область высших частот, необходимо увеличить $f_{p1}(0^\circ)$. Изменение значений резонансных частот $f_1(39^\circ)$ и $f_{p1}(0^\circ)$ может быть произведено как за счет изменения величин емкостей $C_2(39^\circ)$, $C_1(0^\circ)$ и $C_2(0^\circ)$, так и за счет изменения величин индуктивностей L_1 , L_2 и L_3 .

Изменение величин C_1 и C_2 требует значительных конструктивных переделок дуантных и индуктивных пакетов, т. к. увеличение $C_2(39^\circ)$ возможно лишь путем уменьшения зазоров между роторными лопатками и пластинами индуктивных пакетов, а уменьшение $C_1(0^\circ)$ и $C_2(0^\circ)$ (минимальные емкости дуантных и индуктивных пакетов) возможно, по-видимому, лишь путем уменьшения угловой протяженности этих пакетов.

Изменение величин индуктивностей вариатора L_1 и L_3 также представляет известные конструктивные трудности. Величину L_2 в небольшом диапазоне (относительно просто) можно менять за счет изменения индуктивностей заземляющих дужек L_d . На первом этапе было решено расширить диапазон за счет конструктивного изменения величин индуктивностей L_2 и L_3 .

Увеличение индуктивности L_3 приводит к уменьшению $f_1(39^\circ)$ и расширению рабочего диапазона в область нижних частот. Уменьшение L_2 приводит как к увеличению $f_{p1}(0^\circ)$, так и к нежелательному увеличению $f_1(39^\circ)$. Однако можно показать, что относительный выигрыш в изменении частотной программы приводит к расширению диапазона в область верхних частот, т. к. за счет изменения величины индуктивности значение резонанса $f_{p1}(0^\circ)$ изменяется больше, чем значение $f_1(39^\circ)$.

Экспериментальная проверка влияния величины индуктивности L_2 на изменение граничных частот резонансной системы f_{\max} и f_{\min} показала, что при изменении L_2 на величину ΔL_2 величина $\frac{\Delta f_{\max}}{\Delta f_{\min}} \approx 3$. Исходя из

этого, для расширения диапазона рабочих частот величина индуктивности L_2 была уменьшена за счет новой конструкции задних заземляющих дужек L_d , а величина L_3 увеличена за счет полной переделки конструкции крепления индуктивных пакетов. Если в конструкции вариатора по первоначальному проекту НИИЭФА L_3 – это паразитная индуктивность подсоединения пакетов, то в новой конструкции индуктивность L_3 была образована с помощью П-образных стоек крепления индуктивных пакетов к кольцевым дугам. Скользящие закоротки позволяли легко менять величину индуктивности L_3 (см. рис. 6.7). Варьируя величины L_2 и L_3 , можно независимо регулировать верхнюю и нижнюю границы рабочего диапазона.

Проведенные изменения в конструкции вариатора позволили получить необходимый диапазон частот:

$$f_{\max} = 30,3 \text{ МГц}; f_{\min} = 13,23 \text{ МГц}.$$

Устранение разрывов рабочей частотной программы

Устранение разрыва программы, обусловленного объемным колебанием камеры

Отмечалось, что паразитный резонанс объемных колебаний камеры $f^{\text{об.}} = 27 \text{ МГц}$ не удастся сместить за пределы рабочего диапазона. Поэтому в районе пересечения основной частоты с частотой паразитных объемных колебаний камеры происходит разрыв рабочей программы. Величина этого разрыва зависела от положения центральных пластин

и задних регулируемых плакировок и могла достигать 1 МГц. С помощью пластин и плакировок можно было независимо отсимметрировать систему так, чтобы на рабочем ходе изменения частоты программы объемные колебания не возбуждались и, как было выяснено в дальнейшем, при переходе частоты через 27 МГц не наблюдалось потери частиц ускоренных протонов.

Устранение разрывов программы, обусловленных паразитными колебаниями вариаторов

Как отмечалось выше, паразитные резонансы вариатора, попадающие в рабочий диапазон, приводят к разрывам программы в районе частот $f_1^B = 25,5$ МГц и $f_2^B = 21$ МГц. Величина разрывов достигла нескольких МГц. При асимметрии вариаторов, например по углу α , можно было наблюдать по два разрыва, отстоящих друг от друга примерно на 0,5–1 МГц. В области разрывов величина $R_{\text{оз}}$, определяемая как резонансное сопротивление всей системы в целом, приведенное к аноду генератора, падала почти до нуля. Если паразитный резонанс вала ротора f_1^B удавалось сместить за границу рабочего диапазона путем уменьшения величины емкости полицилиндрических конденсаторов, то для ликвидации разрывов из-за паразитного кольцевого резонанса вариатора f_2^B не удалось найти никакого другого способа, кроме полной переделки конструкции «земляных» пакетов. При этом необходимо было учитывать, что уменьшение емкости ротора вариатора на землю C'_p как за счет полицилиндрических конденсаторов, так и за счет «земляных» пакетов будет приводить к возрастанию напряжения на валу ротора вариатора, величина которого по проекту не должна превышать 4,5–5 кВ. Так как максимальное напряжение в ускоряющей щели составляет ~ 15 кВ, то коэффициент перенапряжения на валу вариаторов $K = \frac{U_{\text{вала}}}{U_{\text{щели}}}$ не должен превышать 0,3–0,4.

Новые «земляные» пакеты были сконструированы так, чтобы величина емкости ротора вариатора на землю увеличивалась с увеличением угла α (с уменьшением частоты) и достигала бы своего максимального значения в конце рабочей программы. Так как величина емкости «земляных» пакетов определяет величины паразитных резонансов f_1^B и f_2^B , то при новой конструкции пакетов значения этих резонансов становятся зависящими от угла α . Новые верхние и нижние «земляные» пакеты имели 36-градусную ширину (вместо 78-градусных старых) и были расположе-

ны по окружности (по углу α) так, чтобы значения $f_1^B(\alpha)$ и $f_2^B(\alpha)$ лежали выше частоты $f(\alpha)$ во всем рабочем диапазоне. При этом вхождение лопаток ротора в «земляные» пакеты начиналось при $\alpha = 3^\circ$.

Симметрирование ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ

При наладке ускоряющей системы синхроциклотрона особое внимание было уделено ее симметрированию. Как известно, к симметрированию предъявляются следующие требования:

- с точки зрения получения постоянного напряжения вдоль ускоряющей щели, а также сверху и снизу от кромки дуанта система должна быть электрически симметрична по отношению как к медианной, так и к вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось системы. Такая симметрия должна соблюдаться во всем диапазоне рабочих частот;
- с точки зрения устранения влияния паразитных колебаний на основную программу (объемные колебания камеры, поперечные колебания системы и др.) вся система в целом или отдельные ее элементы должны быть отсимметрированы таким образом, чтобы эти паразитные колебания не возбуждались.

В принципе, эти требования не совпадают и требуют компромиссного решения.

Симметрирование ускоряющей системы для получения постоянного напряжения вдоль ускоряющей щели

Симметрирование системы с целью получения постоянного напряжения вдоль ускоряющей щели, а также сверху и снизу от кромки дуанта производилось путем тщательной сборки ее элементов. Особое внимание было уделено положению дуанта относительно крышек камеры и симметрированию вариаторов.

Дуант был выставлен с точностью до нескольких миллиметров симметрично относительно верхней и нижней крышек камеры, и его положение можно визуальнo контролировать с помощью системы реперных точек.

Вариаторы симметрировались как по отдельным элементам конструкции каждого из вариаторов, так и между собой. Отсутствие симметрии между отдельными элементами каждого из вариаторов приводило к неравномерному распределению напряжений между их верхними и нижними пакетами, правыми и левыми полицилиндрами, дугами и т. п., а также к уменьшению R_{09} всей системы, измеряемого на аноде генера-

тора. П-образные регулируемые стойки крепления индуктивных пакетов позволяли частично выравнивать напряжения на отдельных элементах вариаторов.

Требования к симметрии вариаторов оказались жесткими. Так, например, при развороте одного из вариаторов по углу α относительно другого на величину $\Delta\alpha \approx 1^\circ$ перекося в напряжении вдоль ускоряющей щели достигал величины 20–30 %. Асимметрия между вариаторами по углу α сильно сказывалась и на R_{09} системы, которое уменьшалось на 20–30 % при сдвиге между вариаторами $\Delta\alpha = 20'–30'$.

Было выяснено, что с точки зрения получения оптимальных R_{09} системы при любом угле α_1 одного из вариаторов требуется вполне определенный сдвиг $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ для второго вариатора. Поэтому практически симметрирование вариаторов по углу производилось только в середине программы на частоте 20 МГц. Такое симметрирование системы позволило получить почти постоянное с 10%-ной точностью распределение напряжений по щели дуанта.

Симметрирование ускоряющей системы для устранения влияния паразитных объемных колебаний камеры на рабочую программу

Как отмечалось выше, для устранения возбуждения объемных колебаний камеры (рис. 5.14, 5.27) производилось симметрирование системы относительно медианной плоскости на частоте $f^{об.} = 27$ МГц с помощью либо задних регулируемых плакировок, либо центральных пластин. При этом, если симметрирование производилось на частоте $f^{об.} = 27$ МГц рабочего хода изменения частоты, то на обратном ходе наблюдался разрыв частотной программы $\sim 0,3$ МГц, и наоборот. Отсимметрировать систему одновременно на рабочем и обратном ходе изменения частоты с помощью регулировок, находящихся только в камере, невозможно, т. к. вариаторы несимметричны относительно медианной плоскости при любых углах поворота ротора вариаторов α .

Из-за пересечения кривой рабочих частот $f(\alpha)$ с частотой паразитных объемных колебаний камеры требования к симметрированию системы на частоте $f^{об.} = 27$ МГц достаточно критичны. Так, например, если система была отсимметрирована до включения магнитного поля ускорителя и паразитный резонанс $f^{об.} = 27$ МГц не возбуждался, то после его включения из-за сближения крышек камеры система оказывалась настолько рассимметрированной на частоте $f^{об.} = 27$ МГц, что из-за возбуждения объемных колебаний камеры разрыв частоты основной программы достигал величины 0,3 МГц. Смещение задних плакировок на несколько миллиметров также приводит к полному разрыву частоты рабочей программы.

Так как доступ к центральным регулируемым пластинам затруднен и конструкция привода их перемещением достаточно сложна, то в дальнейшем центральные пластины были удалены полностью. Для задних плакировок была сделана дистанционная регулировка их положения с пульта управления синхроциклотрона. Симметрирование системы производилось на частоте $f^{об.} = 27$ МГц по форме огибающей амплитуды ВЧ-напряжения, получаемого с емкостного делителя, расположенного около ускоряющей щели.

Такой способ симметрирования системы позволил полностью избавиться от возбуждения паразитных объемных колебаний и их влияния на основную программу.

Симметрирование ускоряющей системы для устранения влияния паразитных поперечных колебаний камеры на рабочую программу

В связи с тем что из-за высокой энергии ускоряемых протонов поперечные размеры дуанта оказались соизмеримыми с его продольными размерами, в резонансной системе синхроциклотрона наряду с продольными модами колебаний возникают полуволновые поперечные моды колебаний, частота которых попадает в рабочий диапазон. Попытки подавления поперечных колебаний дуанта путем тщательного симметрирования системы результата не дали. Был рассмотрен вариант подавления поперечных колебаний путем введения по оси симметрии дуанта, где имеет место пучность тока, продольного разреза плакировки дуанта, как это было сделано в ЦЕРН¹. Однако при разработке системы связи ВЧ-генератора с резонансной системой был найден другой эффективный способ подавления поперечных колебаний.

Влияние поперечных колебаний на основную программу сказывается двояким образом: во-первых, при близости частоты поперечных колебаний к частоте основной программы может происходить перекося в распределении напряжений в системе из-за наложения поперечного мода колебаний на основной; во-вторых, если $R_{0\omega}$ системы на частоте поперечных колебаний соизмеримо с $R_{0\omega}$ системы для основного мода колебаний, то при возникновении положительной обратной связи для поперечных колебаний может происходить перескок частоты основного генератора с основной программы на частоту поперечных колебаний. Из кривых рис. 5.27 видно, что частота поперечных колебаний в области углов $\alpha = 20-30^\circ$ близко подходит к частоте основной программы $f(\alpha)$. Было выяснено, что боковые регулируемые конденсаторы дуанта сдвигают ча-

¹ Beger H., Fiebig A. // Conf. on High-Energy Cycl. Improv. Williamsburg, Feb. 6-8, 1964. P. 3.

стоты поперечных колебаний и при минимальной величине их емкостей поперечные колебания имеют наибольшие частоты. Однако максимальное сближение кривых $f(\alpha)$ и $f_1^\perp(\alpha)$ при любой величине этих емкостей оставалось в пределах 0,3–0,5 МГц. В дальнейшем боковые конденсаторы были полностью удалены, и зависимость $f_1^\perp(\alpha)$ имела вид, показанный на рис. 5.27. Максимальное сближение частот поперечного и основного мода колебаний происходило в области $\alpha \approx 30^\circ$ и достигало величины 0,5 МГц.

Так как добротность системы на частоте основных и поперечных колебаний $Q \approx 500$, то их резонансные кривые не перекрывались и наложения поперечного мода колебаний на основной мод не происходило, поэтому никакого дополнительного симметрирования системы на частотах поперечного возбуждения не производилось.

Заметим, что в окончательном варианте устройство связи резонансной системы с блоком генераторных ламп было сделано симметричным относительно продольной оси системы. Симметричная конструкция обратной связи позволила значительно понизить R_{03} системы на частотах поперечных колебаний по сравнению с R_{03} системы на частотах основного мода, и появилась возможность симметрировать систему путем изменения напряжений, подводимых к резонансной системе через левый и правый фидеры прямой связи. При симметричной прямой и обратной связи R_{03} системы на частотах $f_1^\perp(\alpha)$ и $f_2^\perp(\alpha)$ было на порядок меньше R_{03} для основной частоты.

Симметрирование ускоряющей системы для устранения влияния паразитного колебания вариаторов f_3^B

На полностью собранной резонансной системе был обнаружен еще один паразитный резонанс вариаторов, который при измерениях, проводимых на изолированных от системы вариаторах, остался незамеченным. Частота этого паразитного резонанса ($f_3^B = 12,5$ МГц для левого вариатора и $f_3^B = 12,8$ МГц для правого) не зависела от угла α и уменьшалась с увеличением емкости полицилиндрических конденсаторов. Амплитуды напряжений на концах осей роторов каждого из вариаторов имеют противоположные фазы. Так и не выяснено, какими элементами вариаторов обусловлен этот паразитный резонанс. Так как полуширина этого резонанса ~ 1 МГц, то в низкочастотной части диапазона при приближении частоты основной программы к частоте f_3^B из-за перекрытия их резонансных кривых происходил значительный перекося напряжений по валу

ротора каждого из вариаторов. Напряжения на внутренних блоках полицилиндрических конденсаторов (со стороны промежуточного вала) были в 8–10 раз больше напряжений на наружных блоках. Чтобы резонанс f_3^B не возбуждался от основной программы, этот паразитный контур был отсимметрирован с помощью изменения величин емкостей полицилиндрических конденсаторов на наружных и внутренних блоках. С наружных блоков было снято по одному кольцу, что позволило выровнять напряжение на концах валов каждого из вариаторов в низкочастотной части диапазона.

Таким образом, в результате наладки ВЧ ускоряющей системы синхротрона и конструктивных изменений некоторых узлов вариатора были получены следующие результаты:

1) получен диапазон рабочих частот ускоряющей системы $f_{\max} = 30,3$ МГц, $f_{\min} = 13,23$ МГц путем уменьшения величины индуктивности L_2 и введения индуктивности L_3 ;

2) устранен разрыв в частотной программе на частоте объемных колебаний камеры $f^{\text{об.}} = 27$ МГц путем тщательного симметрирования системы относительно средней плоскости с помощью задних регулируемых плакировок;

3) устранены разрывы программы на частотах возбуждения вариатора $f_1^B = 25,5$ МГц и $f_2^B = 21$ МГц путем изготовления новых 36-градусных верхних и нижних «земляных» пакетов;

4) выяснено поведение поперечных типов колебаний, и устранено их влияние на рабочую программу путем симметричной связи резонансной системы с блоком генераторных ламп через два фидера прямой и обратной связи;

5) выяснено влияние асимметрии вариаторов на R_{03} всей системы;

6) проведено симметрирование паразитного контура вариатора на частоте $f_3^B = 12,5$ МГц за счет снятия одного кольца с наружных блоков полицилиндрических конденсаторов, и выяснен способ понижения резонансной частоты этого паразитного контура.

Таким образом, конструкция системы дуант – вариатор как эквивалентный LC резонансный контур обладала необходимой частотной характеристикой и частотным диапазоном, в котором при возбуждении ее от генератора возможно получение ускоряющего напряжения, необходимого для ускорения протонов до энергии 1 ГэВ.

5.6. Высокочастотный генератор синхроциклотрона ПИЯФ. Разработка системы связи генератора с ускоряющей системой

Одним из требований, предъявляемых к схеме генератора, является поддержание постоянства ускоряющего напряжения в диапазоне рабочих частот. Задача осложняется тем, что в дуантном контуре синхроциклотрона в любых точках, пригодных для подключения генератора, напряжение значительно изменяется по диапазону. Связь ВЧ-генератора с дуантным контуром, обеспечивающая примерное постоянство ускоряющего напряжения в рабочем диапазоне частот, трудно осуществить без применения узлов с переменными во времени параметрами.

В первоначальном проекте ВЧ-системы связь генератора с резонансной системой предполагалось осуществить с помощью вращающегося переменного конденсатора обратной связи, вращение которого было механически синхронизировано с вращением вариаторов частоты. Однако в связи со сложностью этой конструкции от нее пришлось отказаться.

Были предприняты попытки реализации нескольких вариантов связи с постоянными параметрами, не перестраиваемыми по частотному диапазону [5].

Схема высокочастотного генератора

Принципиальная схема ВЧ-генератора представлена на рис. 5.28. К аноду генератора через разделительный конденсатор $C_{рк} = 3\ 000$ пФ подсоединен фидер прямой связи. Земляное подсоединение фидера выполнено по всей ширине заземления сеток ламп. В разделительном конденсаторе в качестве диэлектрика использован полиэтилен толщиной 5 мм. Согласующая емкость анод – земля $C_1 = 2\ 000$ пФ – воздушный конденсатор с зазором 15 мм. К катоду (к восьми выводам ламп) через разделительные конденсаторы $C_{рк} = 2\ 000$ пФ подсоединен фидер обратной связи. Согласующая емкость катод – земля $C_2 = 2\ 000$ пФ. В качестве диэлектрика в конденсаторах $C_{рк}$ и C_2 применена фторопластовая пленка. Конденсаторы $C_{рк}$ и C_2 объединены в два блока. Такой блок уменьшил индуктивности подсоединения и позволил избавиться от ряда паразитных контуров, которые образовывались при применении типовых керамических и вакуумных конденсаторов.

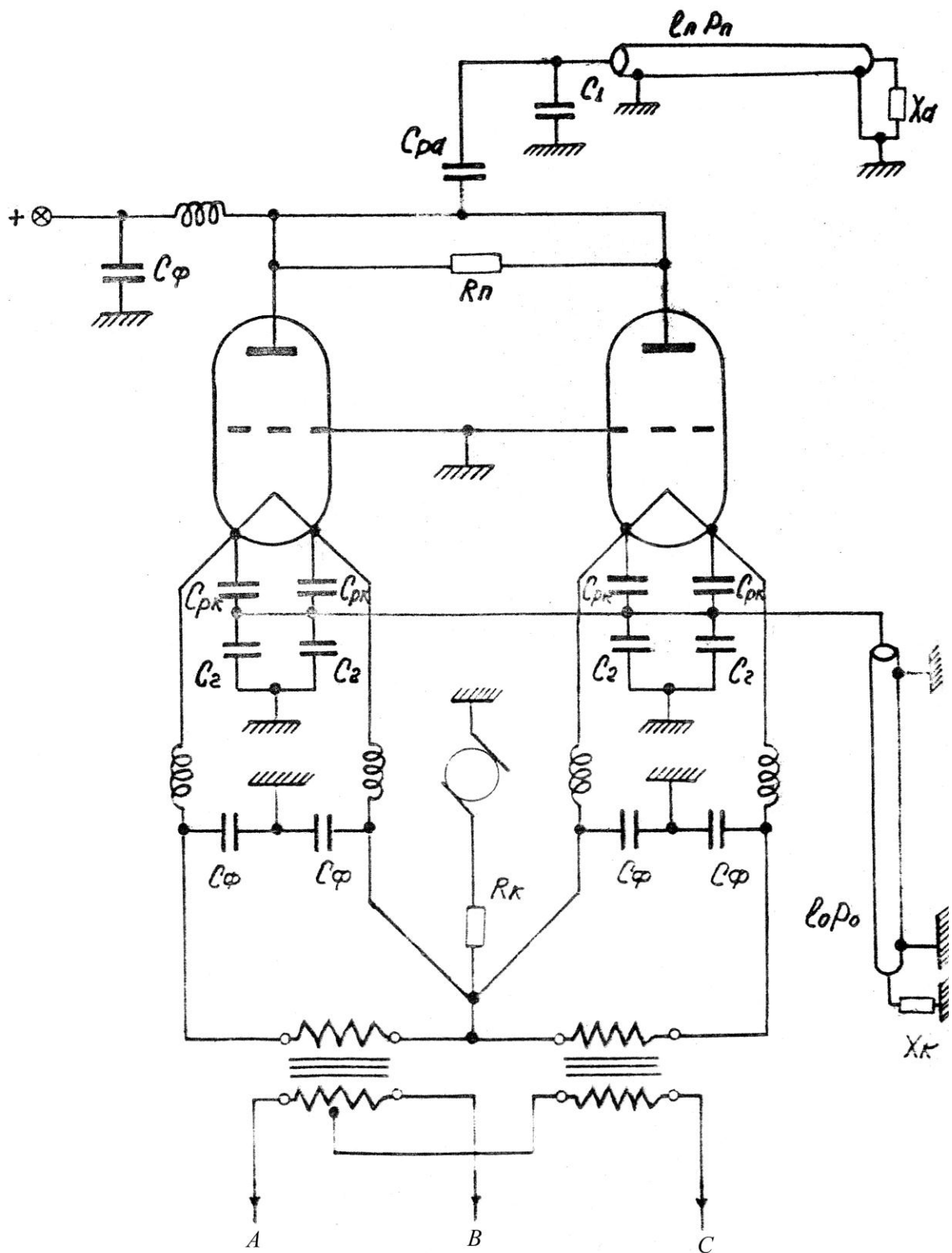


Рис. 5.28. ВЧ-генератор ускоряющей системы синхроциклотрона

Катодные и анодные части генератора разделены экранирующим листом, к которому подсоединены непосредственно сетки ламп и «земля» фидеров прямой и обратной связи. Для подавления пушпульных паразитных колебаний в ламповом блоке аноды ламп разделены силовыми сопротивлениями. Сеточное смещение на лампах образуется катодным

сопротивлением $R_k = 5 \text{ Ом}$, а для регулирования рабочей точки в катод генератора включена машина постоянного тока.

Для уменьшения 100 Гц модуляции ВЧ-напряжения за счет магнетронного эффекта накал запитан по схеме Скотта со сдвигом накальных напряжений ламп на 90° . Ламповый блок заключен в магнитный экран, т. к. работает в полях $\sim 300 \text{ Э}$. Генератор работает при анодном напряжении около 10 кВ и анодном токе порядка 20 А в каждой лампе.

Основные требования к генератору и системе его связи с ускоряющей системой синхроциклотрона

Мощность генератора должна быть достаточной для возбуждения необходимой величины ускоряющего напряжения. Если задать амплитуду ускоряющего напряжения $U_d = 15 \text{ кВ}$, то при $R_{эд} \approx 200 \text{ Ом}$ ($R_{эд}$ – эквивалентное сопротивление системы дуант – вариатор при резонансе, измеренное со стороны щели дуанта) необходим ламповый блок с отдаваемой мощностью

$$P_{\sim} = \frac{U_d^2}{2R_{эд}} \approx 500 \text{ кВт}.$$

Система связи должна обеспечить необходимый коэффициент трансформации ВЧ-напряжения от анодов генераторных ламп к ускоряющей щели, который для постоянства ускоряющего напряжения в течение цикла ускорения должен быть постоянным во всем рабочем диапазоне частот, т. е. $n = U_d / U_a = n_0 = \text{const}$. В связи с этим коэффициент трансформации напряжения n_{ϕ} по фидеру прямой связи от анодов ламп к месту подсоединения вариатора частоты должен удовлетворять соотношению

$$n_{\phi} = \frac{U_{в}}{U_a} = \frac{n_0}{n_d},$$

где $n_d = \frac{U_d}{U_{в}}$ – коэффициент трансформации и напряжения от места подсоединения вариатора к ускоряющей щели.

Для оптимального режима работы генераторных ламп необходимо, чтобы:

- величина эквивалентного активного сопротивления системы при резонансе $R_{эа}$ в месте ее подсоединения к анодам генераторных ламп равнялась паспортной величине оптимальной анодной нагрузки выбранных генераторных ламп;
- величина коэффициента обратной связи k от анодов генераторных ламп к катодам (при схеме с заземленной сеткой) была величиной

постоянной во всем рабочем диапазоне частот и соответствовала паспортным данным выбранных генераторных ламп:

$$K = n_{\phi} n_{\text{вос.}} n_{\text{ос.}},$$

где $n_{\text{вос.}}$ – коэффициент трансформации напряжения от места подключения вариатора к месту подключения фидера обратной связи, а $n_{\text{ос.}}$ – коэффициент трансформации напряжения вдоль фидера обратной связи от места его подсоединения к катодам генераторных ламп;

- сдвиг фаз напряжения между анодами и катодами генераторных ламп $\Delta\varphi$ во всем рабочем диапазоне частот был достаточно мал, чтобы не влиять на устойчивую работу генераторных лампового блока:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\phi} + \Delta\varphi_{\text{вос.}} + \Delta\varphi_{\text{ос.}},$$

где $\Delta\varphi_{\phi}$ – сдвиг фаз напряжения по фидеру прямой связи; $\Delta\varphi_{\text{вос.}}$ – сдвиг фаз напряжения между местом подсоединения вариатора и фидера обратной связи; $\Delta\varphi_{\text{ос.}}$ – сдвиг фаз напряжения по фидеру обратной связи. В связи с высокой добротностью системы можно считать, что $\Delta\varphi_{\text{вос.}} = 0$.

Необходимо отметить, что удовлетворить всем этим требованиям одновременно не представляется возможным, т. к. имеет место соотношение

$$n_0^2 = \frac{R_{\text{эд}}}{R_{\text{за}}},$$

которое при заданной величине активных потерь в системе $R_{\text{эд}}$ однозначно связывает величины $R_{\text{за}}$ и n_0 . Таким образом, величина n_0 в конечном итоге определяется паспортными данными генераторных ламп. Кроме того, из приведенного соотношения видно, что, т. к. величина активных потерь в системе $R_{\text{эд}}$ зависит от частоты, требование постоянства n_0 и $R_{\text{за}}$ во всем рабочем диапазоне частот также не может быть выполнено, и здесь следует искать компромиссное решение.

Кроме указанных выше основных требований система связи должна обеспечить возбуждение только основного типа продольных колебаний резонансной системы и исключить возможность возбуждения резонансной системы на поперечных, объемных или других типах паразитных колебаний. Конструкция ВЧ-генератора также должна исключить возможность возникновения паразитных колебаний на паразитных контурах самого блока.

В процессе наладки системы связи ускоряющей системы были испытаны несколько вариантов схемных решений.

Асимметричная система возбуждения высокочастотных колебаний с индуктивной обратной связью

Принципиальная схема этой системы приведена на рис. 5.29. Эта система связи подобна системе, примененной на синхроциклотроне в Беркли¹. Такая система связи обеспечивает возможность подавления поперечных колебаний, т. к. положительная обратная связь имеет место лишь для продольных типов колебаний дуанта, а для поперечных обратная связь является отрицательной.

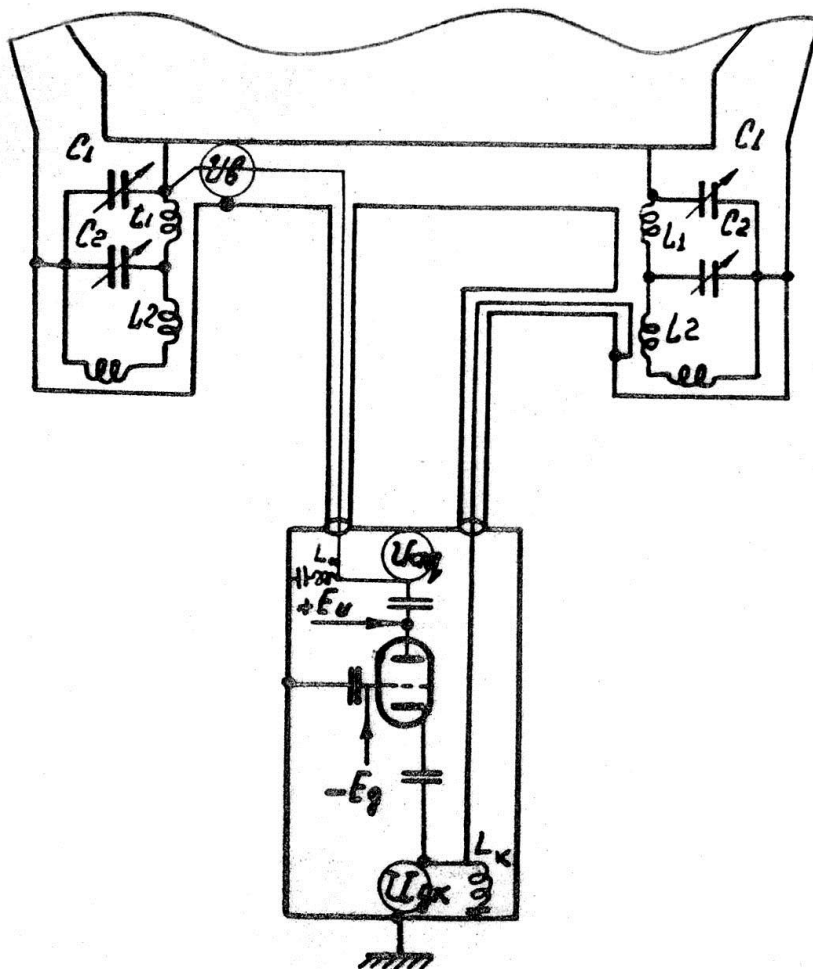


Рис. 5.29. Принципиальная схема асимметричной системы возбуждения ВЧ-колебаний с индуктивной обратной связью

После изменений в схеме связи колебания рабочего типа были возбуждены только на частотах 29–18,5 МГц. Срыв колебаний на низких частотах происходил из-за увеличения сдвига фаз между анодом и катодом. Сдвиг фаз обусловлен активной составляющей сопротивления участка сетка – катод ламп. В конструкции фидера обратной связи не удалось добиться увеличения коэффициента обратной связи без суще-

¹ Smith B. H. et al. Preprint UCRL 3779. 1957. 23 p.

ственных переделок. Конструктивно оказалось проще изготовить новый фидер с емкостным делителем.

Асимметричная система возбуждения высокочастотных колебаний с емкостным делителем в обратной связи

Принципиальная схема системы связи с емкостным делителем в обратной связи представлена на рис. 5.30.

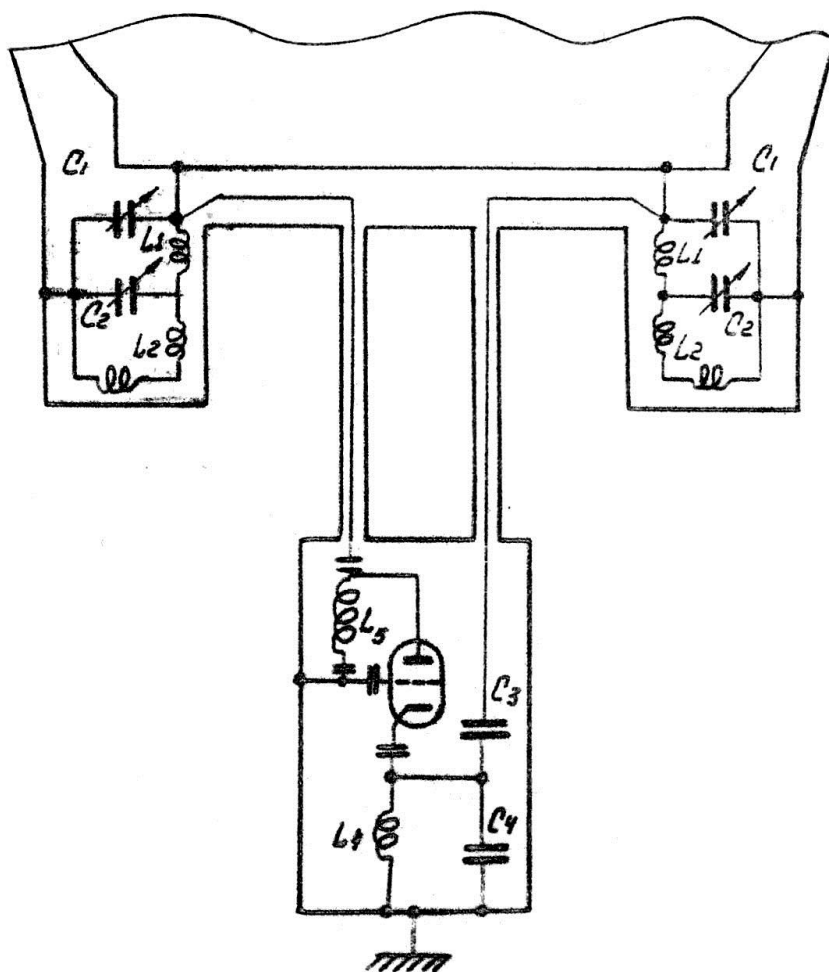


Рис. 5.30. Принципиальная схема асимметричной системы возбуждения ВЧ-колебаний с емкостным делителем в обратной связи

При включении ВЧ-генератора в режиме самовозбуждения удалось возбудить систему во всем диапазоне частот. Однако система оказалась чрезвычайно критичной к симметрированию вариаторов. Система, настроенная во всем диапазоне частот на атмосфере, при откачке камеры на низших частотах генерировала поперечный мод колебаний. Фазовый сдвиг между анодом и катодом зависел от симметрии вариаторов, и при некоторой асимметрии на низких частотах происходил перескок на поперечный тип колебаний.

Рассмотрение возможности использования внутренней обратной связи

При использовании симметричной прямой связи оказалось разумным рассмотреть возможность применения внутренней обратной связи, выполненной в виде емкостного делителя по схеме Колпитца (подобной той, что применялась на синхроциклотроне в ЦЕРН¹). Емкость анод – катод равнялась 200 пФ, емкость катод – земля – 1 500 пФ. Как и ожидалось, при такой схеме не наблюдалось перескоков на поперечный тип колебаний, были возбуждены колебания рабочего типа в диапазоне 30–14,5 МГц, после чего происходил срыв генерации на частоту 12,5 МГц. Было выяснено, что эта паразитная генерация обусловлена 1/4-волновым резонансом фидеров прямой связи. $R_{\text{за}}^{\Phi}$ этого типа колебаний очень высокое, порядка нескольких тысяч. Самовозбуждение происходит на частотах резонансной системы или на частоте фидерного резонанса в зависимости от условий самовозбуждения.

Таким образом, при использовании внутренней обратной связи обязательно встает вопрос о создании полосовых фильтров, перестраиваемых по частоте во всем рабочем диапазоне, что представляет известные трудности.

5.7. Получение протонного пучка с энергией 750 МэВ

2 ноября 1967 года при возбуждении ВЧ ускоряющей системы по схеме обратной связи с емкостным делителем (рис. 5.30) был получен пучок протонов с энергией 750 МэВ, т. к. частотный диапазон системы был 30–14,5 МГц.

Это событие стало важным этапом в работе Ускорительного отдела по запуску самого большого в мире синхроциклотрона. Руководитель работ профессор Д. Г. Алхазов в ночь с 1 на 2 ноября разбудил директора ФТИ академика В. М. Тучкевича и сообщил ему об успехе. Академик якобы ответил: «Ящик коньяка с меня» – и тут же уведомил о запуске синхроциклотрона руководство Академии наук. Несмотря на то что проектная энергия 1 ГэВ не была достигнута, наш успех широко отмечался в научном и общественном мире.

О запуске синхроциклотрона сообщили практически все газеты, в том числе и центральный печатный орган ЦК КПСС газета «Правда». На первой странице, под рубрикой «К Юбилею Великого Октября», была помещена статья о нашем синхроциклотроне с фотографиями руководителей запуска, профессора Д. Г. Алхазова и Н. К. Абросимова. Нелепые

¹ Krienen F. // NIM 5. 1959. No. 5. P. 280–299.

газетные заголовки сочинялись в редакциях и звучали так: «Снаряды атомной артиллерии – подарок к Великому Октябрю»¹, «Штурмующим атом (крупнейший синхроциклотрон – Октябрьский подарок ленинградским физикам)»², «Есть пучок»³, «Ленинградский синхроциклотрон»⁴ и др.

Нас поздравили ведущие коллективы и физики всей страны, в том числе президент АН СССР М. В. Келдыш. Вот как выглядела правительственная телеграмма в те далекие, некомпьютерные времена.

 ПРАВИТЕЛЬСТВЕННАЯ ТЕЛЕГРАММА			
МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ СССР			
ДЛЯ ЗАМЕТОК АДРЕСАТА:			
ПРИЕМ: 5 01 01 го ч м. Бланк № 385 Принял:	ПЕРЕДАЧА: го ч м. № связи Передал:	Адрес: =ПРАВИТЕЛЬСТВЕННАЯ ЛЕНИНГРАД К-21 ФТИ ПРОФЕССОРУ В М ТУЧКЕВИЧУ Г А ГУКАСОВУ Г Е КОГАРОВУ=	
Из: МОСКВЫ 71/001 51 5 1945:			
сл. го ч м.			
=ПРЕЗИДИУМ АКАДЕМИИ НАУК СССР ПОЗДРАВЛЯЕТ КОЛЛЕКТИВ ЛЕНИНГРАДСКОГО ФИЗИКО ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА С БОЛЬШИМ НАУЧНЫМ ДОСТИЖЕНИЕМ ФИЗИЧЕСКИМ ПУСКОМ СИНХРОЦИКЛОТРОНА ЖЕЛАЕМ НОВЫХ УСПЕХОВ РАБОТЕ =ПРЕЗИДЕНТ АКАДЕМИИ НАУК СССР АКАДЕМИК КЕЛДЫШ ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ПРЕЗИДИУМА АКАДЕМИИ НАУК СССР АКАДЕМИК ПЕЙВЕ 4291-			

Любопытно отметить, что при первоначальном запуске синхроциклотрона инженеры Ускорительного отдела определяли направление вектора магнитного поля в электромагните ускорителя при помощи школьного компаса и ошиблись.

После получения первого протонного пучка Николай Константинович сказал: «Если бы мы вспомнили, что на Северном полюсе Земли находится Южный магнитный полюс, мы получили бы протоны на несколько часов раньше».

¹ Советская Россия. 1967. 5 ноября.

² Вечерний Ленинград. 1967. 3 ноября.

³ Правда. 1967. 12 ноября.

⁴ Ленинградская правда. 1967. 3 ноября.

5.8. Получение протонного пучка с энергией 1 ГэВ

Выше было отмечено, что при запуске синхроциклотрона и получении протонного пучка не была достигнута проектная энергия протонов 1 ГэВ.

Проведенные исследования показали: несмотря на то что параметры и частотный диапазон ВЧ ускоряющей системы соответствуют энергии 1 ГэВ, не удается получить устойчивую автогенерацию во всем диапазоне частот, что ограничивает энергию ускоренных протонов в 750 МэВ. Напомним, что основная проблема была обусловлена очень большим диапазоном и необходимым коэффициентом перестройки системы дуант – вариатор, при которой трудно осуществить связь ускоряющей системы с генератором без перестройки элементов связи.

Наличие больших потерь в дуантной системе и сеточной цепи генераторной лампы вызывает появление значительного фазового сдвига коэффициента обратной связи, для уменьшения которого волновое сопротивление трансформирующих линий должно быть выбрано малым; одновременно должны быть увеличены емкости анод – сетка и анод – катод.

Эти трудности были преодолены путем разработки симметричной системы связи генератора с дуантной системой.

Симметричная система возбуждения высокочастотных колебаний

Симметричная система прямой связи

Для получения постоянного по диапазону напряжения на ускоряющей щели была рассчитана и изготовлена новая симметричная прямая связь. Связь ВЧ-генератора с ускоряющей системой осуществлялась через два фидера, подключенных симметрично к правому и левому вариаторам в местах их подключения к дуанту (рис. 5.31). Симметричное относительно продольной оси подключение связи позволило уменьшить эквивалентное сопротивление для поперечного типа колебаний $R_{эа}^{\perp} = 0$ (при полной симметрии $R_{эа}^{\perp} = 0$) по сравнению с эквивалентным сопротивлением рабочего типа колебаний. Фидеры на генераторном конце нагружены на согласующую емкость C_a .

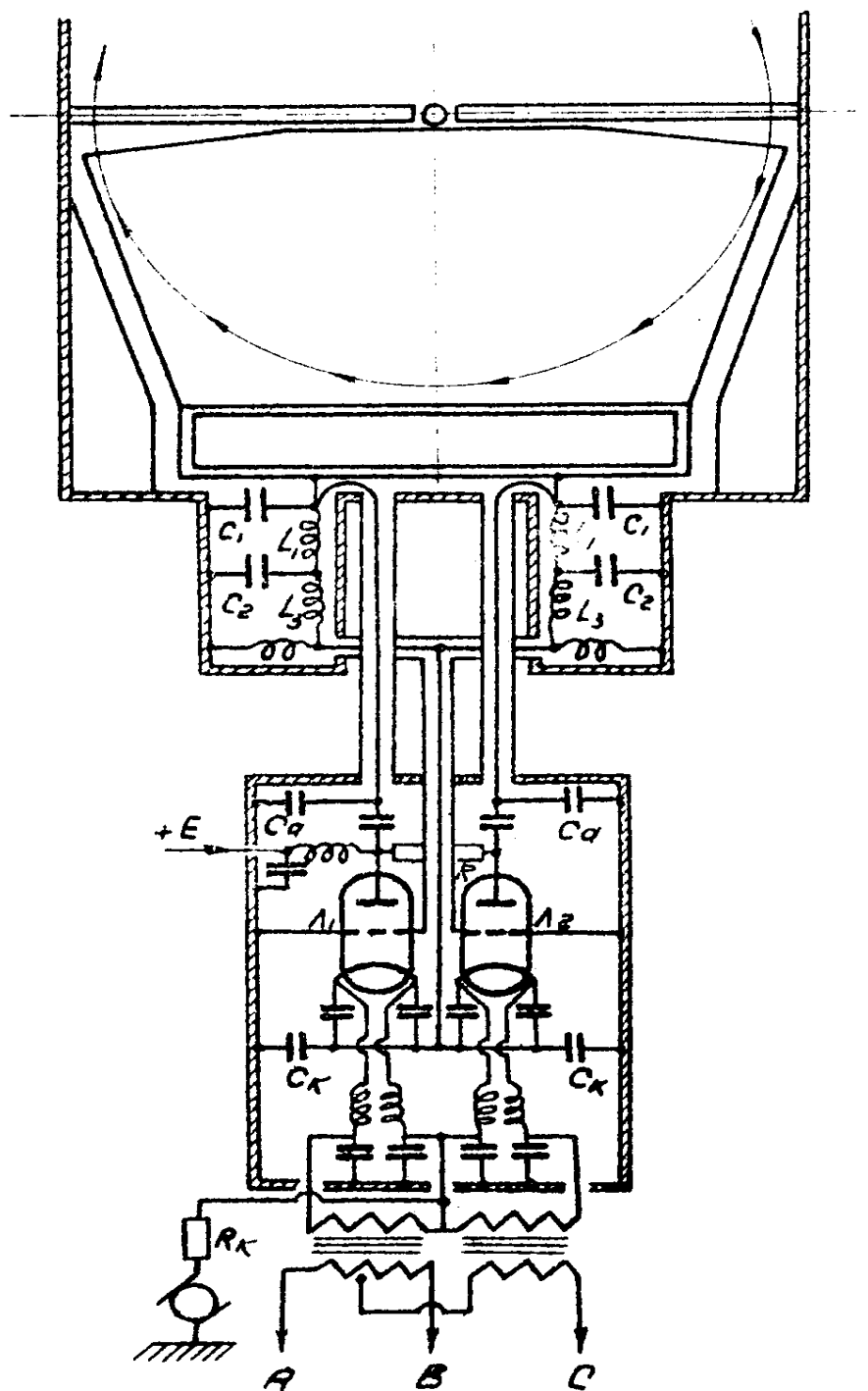


Рис. 5.31. Схема симметричной прямой и обратной связи ВЧ-генератора с резонансной системой ускорителя

Параметры фидеров – длина и волновое сопротивление, а также места их подсоединения к резонансной системе – были подобраны экспериментально после модельных измерений.

Выполнение прямой связи в виде двух фидеров с $\rho \sim 50$ Ом каждый позволило уменьшить фазовые сдвиги на прямой связи, и максимальный фазовый сдвиг на фидере прямой связи не превышает 10 % (при 13 МГц).

Симметричная система обратной связи

Симметричное подключение фидеров обратной связи исключает возможность генерирования ВЧ ускоряющей системы на частотах поперечного мода колебаний (рис. 5.31).

Для исключения возможности генерирования системы на «второй частотной программе» (рис. 5.27) были экспериментально выбраны точки подсоединения фидеров обратной связи к элементам вариаторов, где «вторая частотная программа» слабо выражена и при подключении обратной связи к этим точкам не возбуждалась.

Конструктивно обратная связь была выполнена в виде Т-образного фидера, подключенного к части индуктивности L_3 , а ее генераторный конец, подключенный к катодам ламп, согласован емкостью C_K .

Фидер имел длину ~ 3 м и волновое сопротивление $\rho = 35$ Ом. Фазовый сдвиг по фидеру, обусловленный активными потерями в цепи сетки генераторных ламп, не превышал $12\text{--}15^\circ$.

Предложенная система симметричной прямой и обратной связи не имела аналогов, и на ее конструкцию было получено авторское свидетельство на изобретение [6].

При симметричной конструкции прямой и обратной связи по схеме рис. 5.31 удалось получить необходимый рабочий диапазон частот с мало изменяющимся по частоте напряжением на ускоряющей щели. На такой системе в сентябре 1968 года был получен пучок протонов с проектной энергией 1 ГэВ и током $\sim 0,3$ мкА.

В 1970 году, после монтажа и наладки выводной системы пучка [7–10], синхроциклотрон был сдан в постоянную эксплуатацию для проведения программы физических экспериментов на его пучках.

В 1973 году Николай Николаевич Чернов, который вложил много сил в создание синхроциклотрона, доложил на Международной конференции в Сан-Франциско о запуске ускорителя¹. А ведь еще в 1965 году, после инспекционного осведомления о состоянии работ по запуску синхроциклотрона, В. П. Джелепов сказал: «Эта груда железа никогда не сможет работать», а Г. Н. Флеров добавил: «Давайте, пока не поздно, переделаем его в циклотрон». Выслушав высказывания академиков, Николай Константинович заметил: «Физики, как известно, шутят». И мы, все же стараясь выполнить пожелания Флерова, переделали в циклотрон Ц-80 не сам синхроциклотрон, а его модель СП-70.

¹ Chernov N. The Status Report of LNPI 1 GeV Synchrocyclotron // Particle Accelerator Conf. San-Francisco, USA. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1973. V. NS-20. P. 263–265.

Публикации

1. Алхазов Д. Г., Абросимов Н. К., Громадюк Б. А., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Чернов Н. Н., Середенко Е. В., Хальчицкий Е. П. Измерение радиочастотных параметров дуанта – камеры высокочастотной системы синхроциклотрона ФТИ АН СССР // Отчет ФТИ. № 47. Л., 1969. 14 с.
2. Громадюк Б. А., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Лавров В. В., Михеев Г. Ф. Методика измерения параметров высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ФТИ на 1 ГэВ // Отчет ФТИ. № 48. Л., 1969. 20 с.
3. Алхазов Д. Г., Абросимов Н. К., Громадюк Б. А., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Чернов Н. Н. Измерение радиочастотных параметров вариаторов частоты синхроциклотрона на 1 ГэВ // Отчет ФТИ. № 49. Л., 1969. 44 с.
4. Алхазов Д. Г., Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Чернов Н. Н., Середенко Е. В. Настройка резонансной ускоряющей системы синхроциклотрона ФТИ на 1 ГэВ // Отчет ФТИ. № 50. Л., 1969. 42 с.
5. Алхазов Д. Г., Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Чернов Н. Н., Середенко Е. В. Возбуждение высокочастотных колебаний в резонансной системе синхроциклотрона на 1 ГэВ // Отчет ФТИ. № 51. Л., 1969. 40 с.
6. Устройство связи генераторной лампы с резонансной системой синхроциклотрона: а. с. № 270131 с приоритетом от 28.04.1969 / Н. К. Абросимов, С. П. Дмитриев, Г. Ф. Михеев, А. Ф. Куликов, Е. В. Середенко, Н. Н. Чернов. Бюл. № 16, 1970.
7. Абросимов Н. К., Волченков В. А., Елисеев В. А., Рябов Г. А., Чернов Н. Н. Эффективный вывод протонного пучка синхроциклотрона на 1 ГэВ ФТИ СССР // ЖТФ. 1970. Т. 40. С. 2593–2596.
8. Абросимов Н. К., Волченков В. А., Елисеев В. А., Рябов Г. А., Чернов Н. Н. Вывод протонного пучка синхроциклотрона ФТИ им. А. Ф. Иоффе на энергию протонов 1 ГэВ // Тр. II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1972. Т. 2. С. 182–184.
9. Абросимов Н. К., Рябов Г. А. Эффективность регенеративного вывода пучка из синхроциклотрона // Тр. IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1975. Т. 1. С. 250–253.
10. Abrossimov N. K., Eliseev V. A., Volchenkov V. A., Riabov G. A., Chernov N. N. A 30 % Beam Extraction on the 1 GeV Synchrocyclotron at Gatchina // NIM. 1975. V. 126. P. 221–230.

Глава 6

Модернизация высокочастотной ускоряющей системы и других радиотехнических систем синхроциклотрона ПИЯФ

Покажите вы русскому школьнику карту звездного неба,
о которой он до тех пор не имел никакого понятия,
и он завтра же возвратит вам эту карту исправленную.

*Ф. М. Достоевский. Братья Карамазовы.
(Любимый афоризм Н. К. Абросимова)*

6.1. Цели и задачи модернизации

Как уже отмечалось, запуск синхроциклотрона происходил в сжатые сроки, поэтому многие элементы ускоряющей системы были сделаны в наладочном варианте и не могли обеспечить достаточной надежности при постоянной эксплуатации синхроциклотрона. Возникали новые конструктивные решения.

После запуска ускорителя и одновременно с выполнением обширной физической программы исследований на пучках синхроциклотрона ~ 6 000 часов в год проводилась поэтапная модернизация ВЧ-системы синхроциклотрона, направленная на повышение интенсивности ускоряемого пучка, а также на повышение надежности и стабильности работы ускорителя.

В результате такой модернизации были переконструированы практически все составные части ВЧ ускоряющей системы, заново спроектирован и изготовлен в ПИЯФ ряд новых узлов ускоряющей системы, разработаны и введены в эксплуатацию принципиально новые устройства и блоки. Оригинальность некоторых из этих нововведений подтверждена авторскими свидетельствами на изобретения.

Отметим, что после запуска ускорителя модернизация ВЧ ускоряющей системы и ввод в работу новых устройств проводились без остано-

ки ускорителя на физический эксперимент. Все необходимые работы проводились в периоды профилактического обслуживания ускорителя.

Конструирование и ввод в эксплуатацию новых разработок проводились сотрудниками Ускорительного отдела, главным образом инженерами и механиками Радиотехнической службы отдела.

Остановимся подробнее на программе модернизации ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона.

6.2. Конструктивные изменения, внесенные в систему дуант – камера

Перечислим основные изменения, внесенные в конструкцию дуантной системы в процессе ее наладки и запуска синхроциклотрона.

- Ликвидирована антидуантная рамка, в результате чего ВЧ ускоряющее поле простирается от щели дуанта на значительное расстояние ($\sim 0,5$ м) и набор энергии при ускорении протонов отличается от «щелевого». (Причина демонтажа антидуантной рамки не ясна.)
- Демонтированы подвижные панели «земляной» плакировки камеры в ее центральной части. Симметрирование системы для ликвидации ее возбуждения на частоте объемных колебаний осуществляется только подвижными панелями, находящимися в хвостовой части дуанта.
- Полностью изменена конструкция и принцип работы ионного источника. В связи с этим демонтированы трубы-штоки, внутри которых проходили магистрали электрического и газового питания к ионному источнику. Эти две трубы-штоки располагались параллельно сверху и снизу щели дуанта и крепились к полюсам электромагнита. Трубы нарушали продольную симметрию дуантной системы из-за разной дополнительной емкостной нагрузки дуанта справа и слева от его продольной оси. Подвод напряжения питания ионного источника осуществлен по гибким кабелям типа РК, прикрепленным к полюсам магнита вдоль его продольной оси (подробнее см. в главе 7, п. 7.2).
- На радиусе $\sim 1,2$ м смонтирована подвижная мишень («флажок»), ограничивающая апертуру камеры для вертикальных Z-колебаний ускоряемых протонов.
- Ликвидированы боковые регулировочные конденсаторы, расположенные справа и слева от дуанта и предназначенные для симметрирования системы относительно ее продольной оси. Такая дополнительная емкостная нагрузка дуанта затрудняла получение необходимого частотного диапазона ускоряющей системы, поэтому вместо регулировочных конденсаторов были смонтированы

ВЧ-датчики для контроля симметрии ускоряющего напряжения вдоль щели дуанта. Сигналы с этих датчиков в виде огибающей ВЧ ускоряющего напряжения «лево – право» для контроля выведены на пульт синхроциклотрона.

- Введены емкостные триммерные конденсаторы в хвостовой части дуанта для регулировки максимальной частоты ВЧ ускоряющей системы и изменения производной $dt/d\alpha$ в диапазоне захвата протонов в режим ускорения (подробнее см. в главе 7, п. 7.3).
- Изменены номиналы блокировочных емкостей и число витков в индуктивных дросселях защиты опоры, водяных трубках и т. п. для исключения их паразитного возбуждения на частотах рабочего диапазона ВЧ ускоряющей системы.
- В вакуумной камере на радиусе ~ 3 м смонтирован С-электрод для системы растяжки и однооборотного сброса протонного пучка на мишень ГНЕЙС (подробнее см. в главе 7, п. 7.1).
- Перед С-электродом смонтированы две подвижные мишени для спектрометра ГНЕЙС: ниже медианной плоскости находится свинцовая нейтронообразующая мишень, а выше – полиэтиленовая мишень для преобразования энергетического спектра нейтронов. К вакуумной камере примыкают четыре нейтроноводные трубы, отделенные от вакуумного объема камеры тонкой фольгой (подробнее см. в главе 2, п. 2.3).
- Отметим также, что внутри камеры смонтирована выводная система, состоящая из нескольких подвижных регулируемых частей достаточно сложной конструкции [1–4], и демонтирована система крепления подвижных мезонных мишеней внутри камеры в связи с переходом на наружную мезонообразующую мишень.

6.3. Новая конструкция вариаторов частоты

В процессе доводки вариаторов выяснилось, что некоторые из их параметров не оптимальны, а конструктивные элементы, изготовленные в наладочном варианте, не могут обеспечить их надежной эксплуатации. Поэтому с учетом выявленных недостатков и с целью улучшения эксплуатационных характеристик были сконструированы и изготовлены в мастерских ПИЯФ новые модернизированные вариаторы частоты [5].

Цели модернизации:

- увеличение надежности эксплуатации;
- повышение пробивного напряжения;
- улучшение теплового режима;
- улучшение защиты узла подшипников;
- исправление частотной программы.

Конструктивные особенности вариаторов частоты

Собственно вариаторы частоты ускоряющей системы синхроциклотрона состоят из двух идентичных конструкций, соединенных между собой соединительным валом для совместной работы. Каждая из этих конструкций (в дальнейшем – вариатор) подключена к хвостовой части дуанта, при этом ширина подключения составляет $1/8$ часть ширины хвостовой части дуанта и равна 150 см. Расстояние между вариаторами – 160 см.

Общий вид одного из вариаторов представлен на рис. 6.1. (Ротор вариатора демонтирован, выдвинут из зазоров статорных пакетов и размещен на козлах перед кожухом вариатора.)

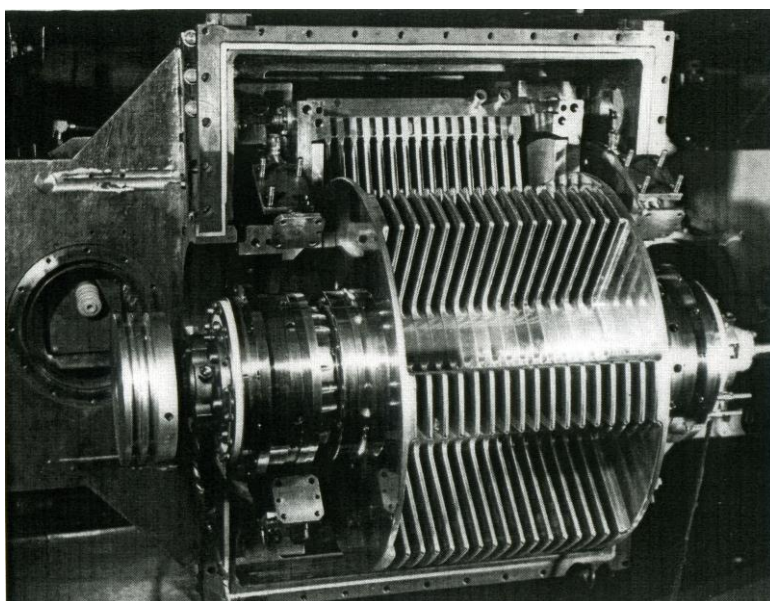


Рис. 6.1. Вариатор частоты (правый)

На рис. 6.2 приведена конструкция нового вариатора.

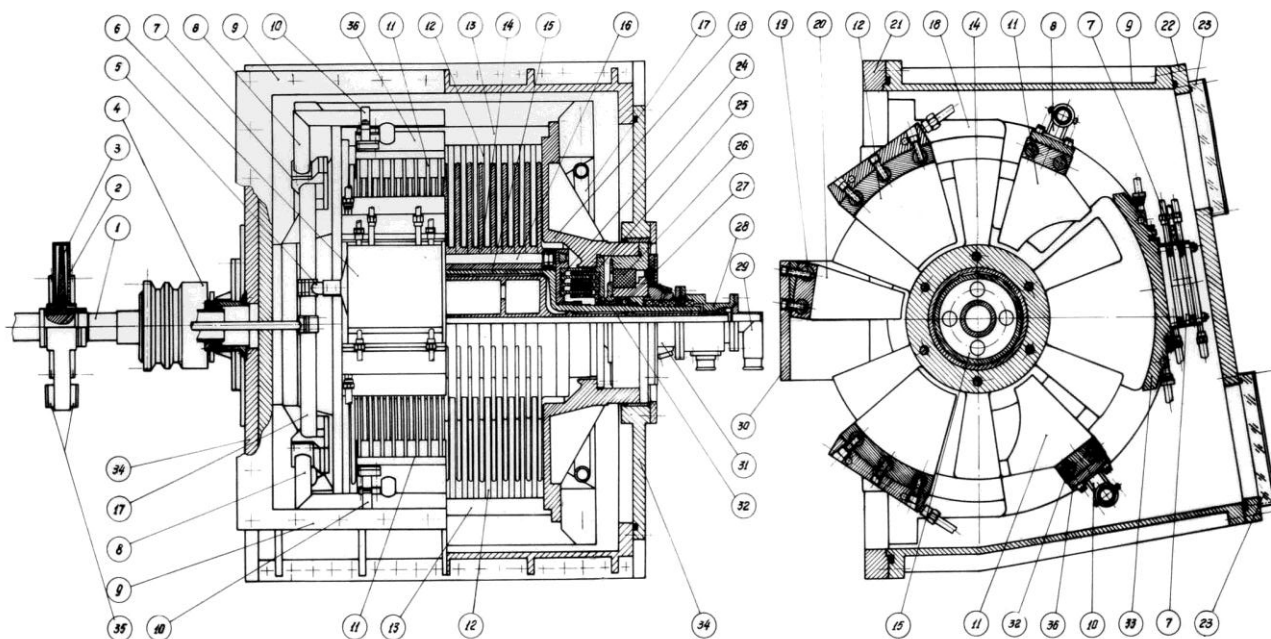


Рис. 6.2. Конструкция нового вариатора частоты синхроциклотрона ПИЯФ:

1 – соединительный вал между правым и левым вариаторами; 2 – кожух диска для угловых датчиков; 3 – диск датчиков углового поворота ротора вариатора; 4 – шкив для ременного привода вращения вариаторов электромотором; 5 – крепление блокировочных конденсаторов к индуктивным дугам; 6 – блокировочный конденсатор (емкость C_6 по схеме рис. 5.18); 7 – крепление индуктивных пакетов к индуктивным дугам; 8 – П-образные стойки крепления индуктивных пакетов (индуктивность L_3 по схеме рис. 5.19); 9 – кожух вариатора; 10 – подвижные хомуты крепления индуктивных пакетов к П-образным стойкам (обеспечивают регулировку индуктивности L_3 – по схеме рис. 5.19); 11 – верхний и нижний индуктивные пакеты (емкость C_2 по схеме рис. 5.19); 12 – пластины верхнего и нижнего «земляных» (статорных) пакетов; 13 – основания для крепления пластин верхнего и нижнего «земляных» пакетов; 14 – пластины ротора вариатора; 15 – вал ротора вариатора; 16 – стяжка роторных пластин; 17 – индуктивные кольца (индуктивности L_1 и L_2 по схеме рис. 5.19); 18 – несущий корпус вариатора; 19 – основания для крепления пластин дуантного пакета; 20 – дуантный пакет (емкость C_1 по схеме рис. 5.19); 21 – стенка окна вакуумной камеры для сочленения с кожухом вариатора; 22 – съемная стенка кожуха вариатора; 23 – крышка окна в стенке кожуха; 24 – роторная часть полицилиндрических конденсаторов; 25 – статорная часть полицилиндрических конденсаторов; 26 – вакуумное уплотнение; 27 – маслоуплотнение; 28 – вакуумное уплотнение вала; 29 – муфта водораспределения; 30 – задняя стенка дуанта; 31 – узел подшипника с вакуумным уплотнением; 32 – статорные кольца полицилиндрических конденсаторов; 33 – основание заднего «земляного» пакета; 34 – боковая стенка кожуха вариатора; 35 – фотодатчики угла поворота ротора

Ротор вариатора частоты

Ротор вариатора (14, рис. 6.2) представляет собой пакет из семнадцати 6-лопастных дисков, напрессованных на вал. Угловая ширина лопаток – 18° , толщина – 10 мм. Максимальный радиус лопаток – 400 мм. Охлаждение лопаток происходит только через тепловой контакт между лопатками и валом.

Вал ротора представляет собой сварной пустотелый цилиндр диаметром ~ 500 мм с осью, опирающийся на подшипники. Система полостей внутри вала, которая видна на рис. 6.2, предназначена для циркуляции по ней дистиллированной воды, обеспечивая съём тепловых потерь мощности с вариатора, которая достигает в эксплуатационном режиме ускорителя величины ~ 150 кВт. Вход и выход воды находятся с наружных сторон вариатора.

Подшипниковый узел вариатора частоты

Чертеж подшипникового узла приведен на рис. 6.3. Подшипниковый узел вариатора представляет собой сложную конструкцию, защищенную авторским свидетельством на изобретение. Сложность конструкции обусловлена функциональными особенностями подшипникового узла.

Подшипниковый узел обеспечивает вращение ротора, его изоляцию от «земли», защищает шарикоподшипники от электрокоррозии, т. к. по ним протекают значительные ВЧ-токи, обеспечивает вакуумное уплотнение. Узел имеет возможность осевой юстировки ротора относительно статора, смазка подшипников не должна влиять на ухудшение вакуума внутри вариатора.

Ротор вращается в двух подшипниках (31, рис. 6.2), расположенных на его концах. Подшипник, находящийся со стороны ввода воды, является опорным и обеспечивает осевое положение ротора относительно статорных (12) и дуантного (20) пакетов. Подшипник, находящийся со стороны шкива (4), – скользящий, что обеспечивает осевое смещение ротора при его нагреве. Оба подшипника находятся в вакуумном объеме и смазываются маслом с низкой упругостью паров. Для предотвращения попадания масла в полицилиндрический конденсатор каждый подшипник отделен от вакуумного объема сальниковыми узлами, состоящими из двух армированных манжет. Подшипники и сальниковые узлы закрепляются в опорах, изготовленных из конструктивной стали. Каждая опора разделена с помощью фарфоровых изоляторов на две части для отделения ротора от «земли». С наружной стороны опор находятся манжетные узлы (31) с вакуумным уплотнением по валу ротора, отделяющие атмосферу от вакуумного объема вариатора. В каждом из манжетных узлов установлено по четыре резиновых манжета, разделенных на две пары.

Корпус манжетного узла изготовлен из латуни и хромирован; для заливки масла в подшипник в его верхней части имеется отверстие, непосредственно соединяющееся с вакуумным объемом подшипника. После заливки масла это отверстие вакуумно уплотняется. Опоры подшипника и манжетного узла крепятся в «посадочные места» корпуса вариатора (18).

Для балансировки ротора имеются специальные балансировочные грузики, расположенные в пазах основания роторных полицилиндрических конденсаторов (24).

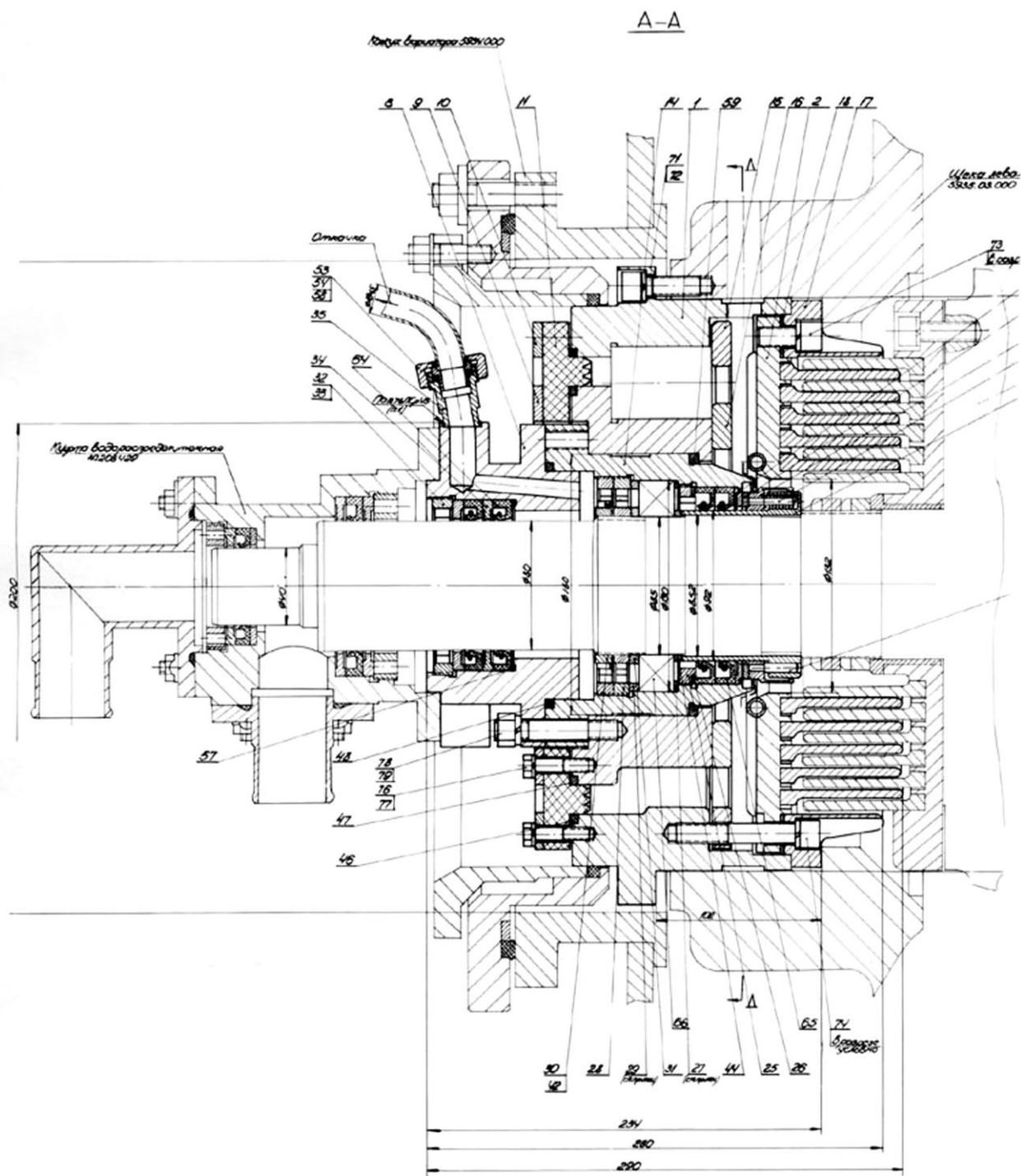


Рис. 6.3. Подшипниковый узел наружного конца левого вариатора

Соединительный вал вариаторов частоты

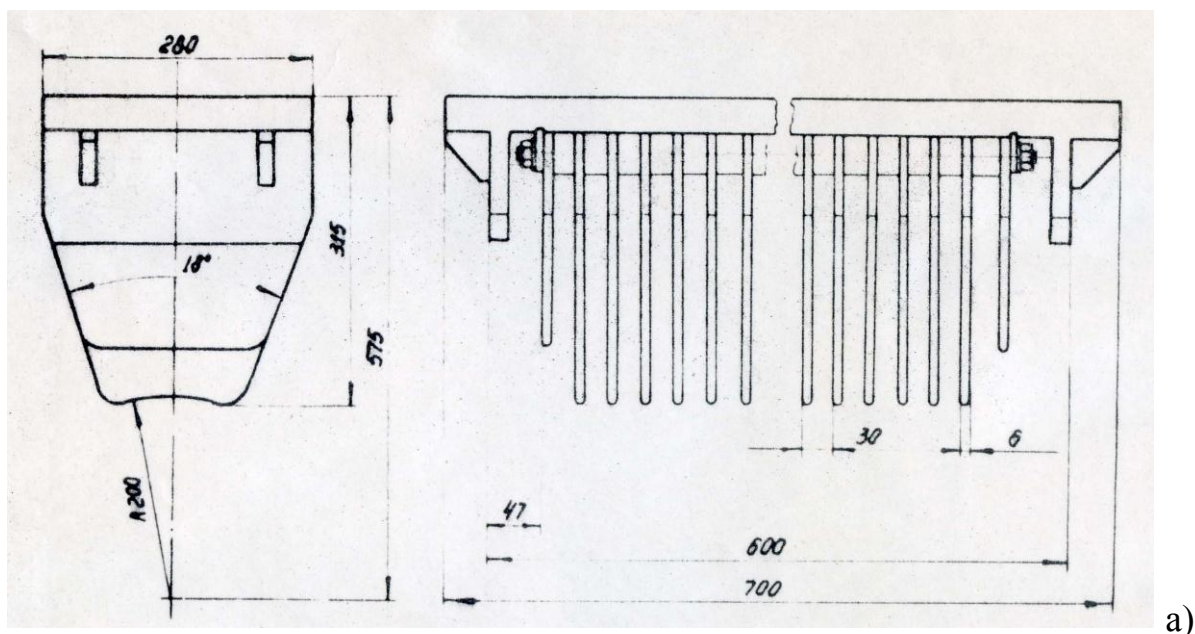
На внутреннем конце вала ротора каждого из вариаторов насажен шкив (4, рис. 6.2) привода вариатора, изготовленный из немагнитной стали. Шкив состоит из двух частей, разделенных при помощи фарфоровых изоляторов. На наружной части шкива имеются две клиновидные канавки для ремней, передающих вращение от двигателя. Оба вала соединены друг с другом при помощи промежуточного вала (1) со специальной диафрагмой. Эта диафрагма позволяет компенсировать несоосность между вариаторами и изменять их положение относительно друг друга по углу.

В средней части соединительного вала находится задающий диск датчика импульсов начала и конца модуляционного цикла (3). Диск закрыт кожухом (2) с прикрепленными к нему двумя медными коробками, в которых расположены фотодатчики угла поворота ротора вариатора (35). Кожух закреплен на отсеке вакуумной камеры.

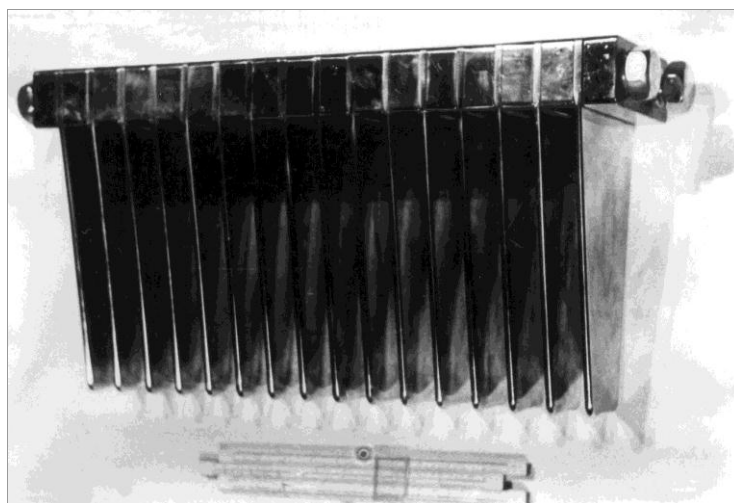
Дуантный пакет вариатора частоты

Пластины ротора входят в зазоры статорных пакетов, образуя систему переменных емкостных конденсаторов. Непосредственно к дуанту прикреплен дуантный пакет, чертеж и фотография которого приведены на рис. 6.4а, б.

Дуантный пакет (20, рис. 6.2) вариатора набран из шестнадцати штук 18-градусных пластин толщиной 6 мм, стянутых двумя стальными шпильками через медные прокладки. Основание дуантного пакета (19) через регулировочные прокладки крепится к дуантной доске. Отходящие от дуантного пакета сверху и снизу медные плакировки осуществляют электрический контакт между пакетом и дуантом. Зазор между дуантными пластинами и пластинами ротора вариатора составляют величину $7 (\pm 0,1)$ мм.



а)



б)

Рис. 6.4. Конструкция дуантного пакета:
 а) чертеж до модернизации вариатора;
 б) фотография после модернизации вариатора

Индуктивные пакеты вариатора частоты

Как было показано выше, согласно принципиальной схеме вариатора (рис. 5.15) индуктивные пакеты (11, рис. 6.2) расположены по углу на расстоянии $\sim 110^\circ$ от дуантного пакета. У каждого из вариаторов имеется по два индуктивных пакета – верхний и нижний. Общий вид и геометрия индуктивных пакетов приведены на рис. 6.5.

Каждый из индуктивных пакетов набран из шестнадцати 36-градусных пластин определенного профиля толщиной 6 мм, стянутых двумя шпильками через медные прокладки. Основания индуктивных пакетов имеют каналы для охлаждающей воды.

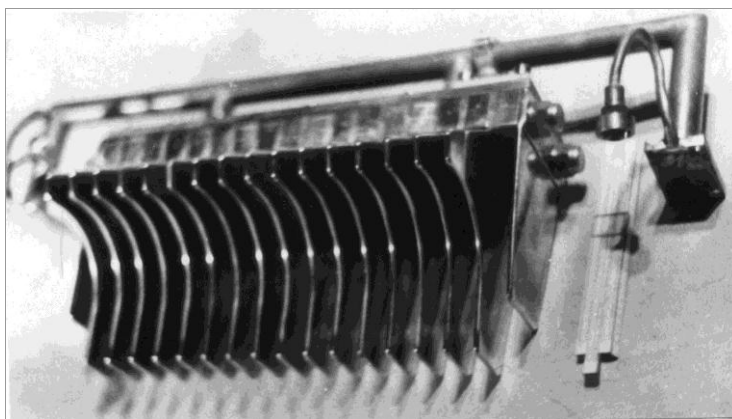


Рис. 6.5. Индуктивные пакеты (после модернизации вариатора)

Индуктивные кольца вариатора частоты

Индуктивные пакеты крепятся к дуанту при помощи колец (17, рис. 6.2), функциональное назначение которых образовывать индуктивное сопротивление между емкостными элементами вариатора (индуктивности L_1 , L_2 по схеме рис. 5.19). В каждом из вариаторов находится по два таких кольца. Фотография одного из них приведена на рис. 6.6.

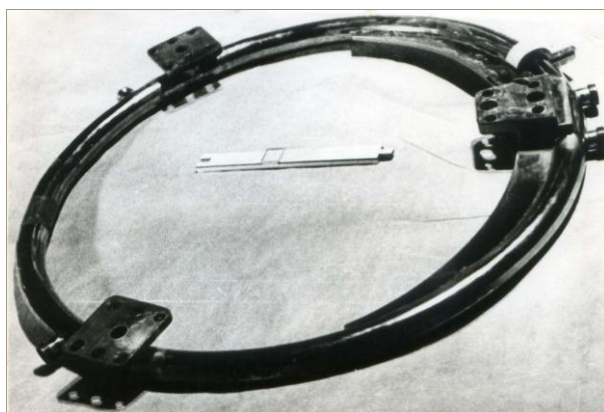


Рис. 6.6. Одно из четырех индуктивных колец

Индуктивные кольца имеют диаметр 800 мм и выполнены из нержавеющей трубы диаметром 40 мм. С одной стороны кольца крепятся к основанию дуантного пакета (19), а с противоположной стороны заземлены через специальные крепления (5) и блокировочный конденсатор (6) по высокой частоте. Со стороны крепления к основанию дуантного пакета для обеспечения жесткости кольца имеются вваренные сегменты, которые хорошо видны на рис. 6.6. К кольцам, на 50 мм ниже крепления к основанию дуантного пакета, при помощи хомутов крепятся фидеры прямой связи, а со стороны крепления шунтов блокировочных конденсаторов – фидеры обратной связи.

П-образные индуктивные стойки для крепления индуктивных пакетов вариатора частоты

Индуктивные кольца имеют площадки для крепления П-образных стоек индуктивных пакетов, играющих роль индуктивности L_3 (рис. 5.19). П-образные стойки имеют регулировочные элементы (10, рис. 6.2),двигающиеся по основанию индуктивного пакета влево и вправо, тем самым изменяя величину индуктивности L_3 . Конструкция П-образных стоек для крепления индуктивных пакетов вариатора приведена на рис. 6.7.

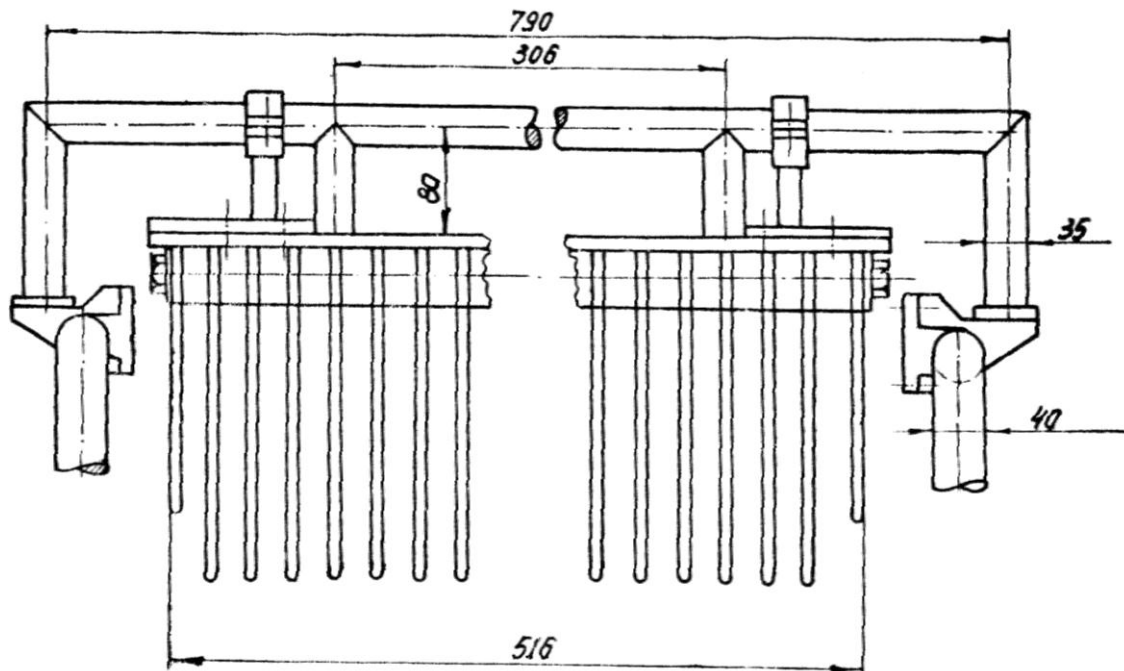


Рис. 6.7. Конструкция крепления индуктивных пакетов вариатора

«Земляные» пакеты вариатора частоты

Заземление ротора по высокой частоте производится тремя блоками «земляных» пакетов: задним (33, рис. 6.2) верхним и нижним (12). Конструкция и фотография «земляных» пакетов приведены на рис. 6.8а, б.

«Земляные» пакеты вариатора (12) набраны из шестнадцати штук 36-градусных пластин толщиной 17 мм, стянутых тремя шпильками из немагнитной стали через алюминиевые прокладки. Каждый из «земляных» пакетов под определенным углом крепится к «щекам» вариатора при помощи полого латунного основания (13), охлаждаемого водой. Основание «земляных» пакетов при помощи медных плакировок соединено с плакировкой отсека камеры. С помощью специальных прокладок «земляные» пакеты можно сдвинуть в ту или иную сторону, тем самым выставляя зазор между «земляными» пластинами и пластинами ротора. Этот зазор составляет величину, равную $1,5 (\pm 0,1)$ мм.

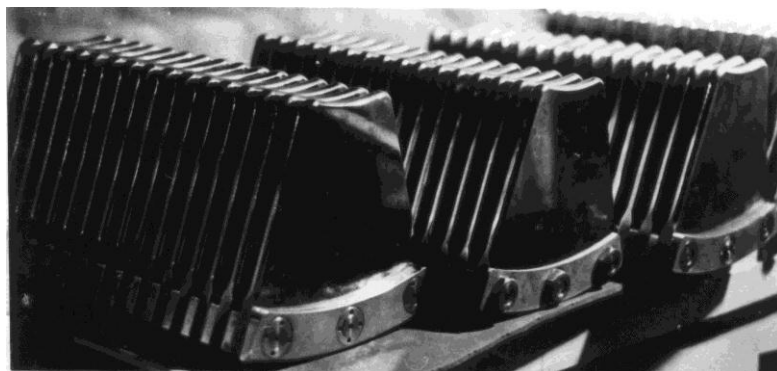
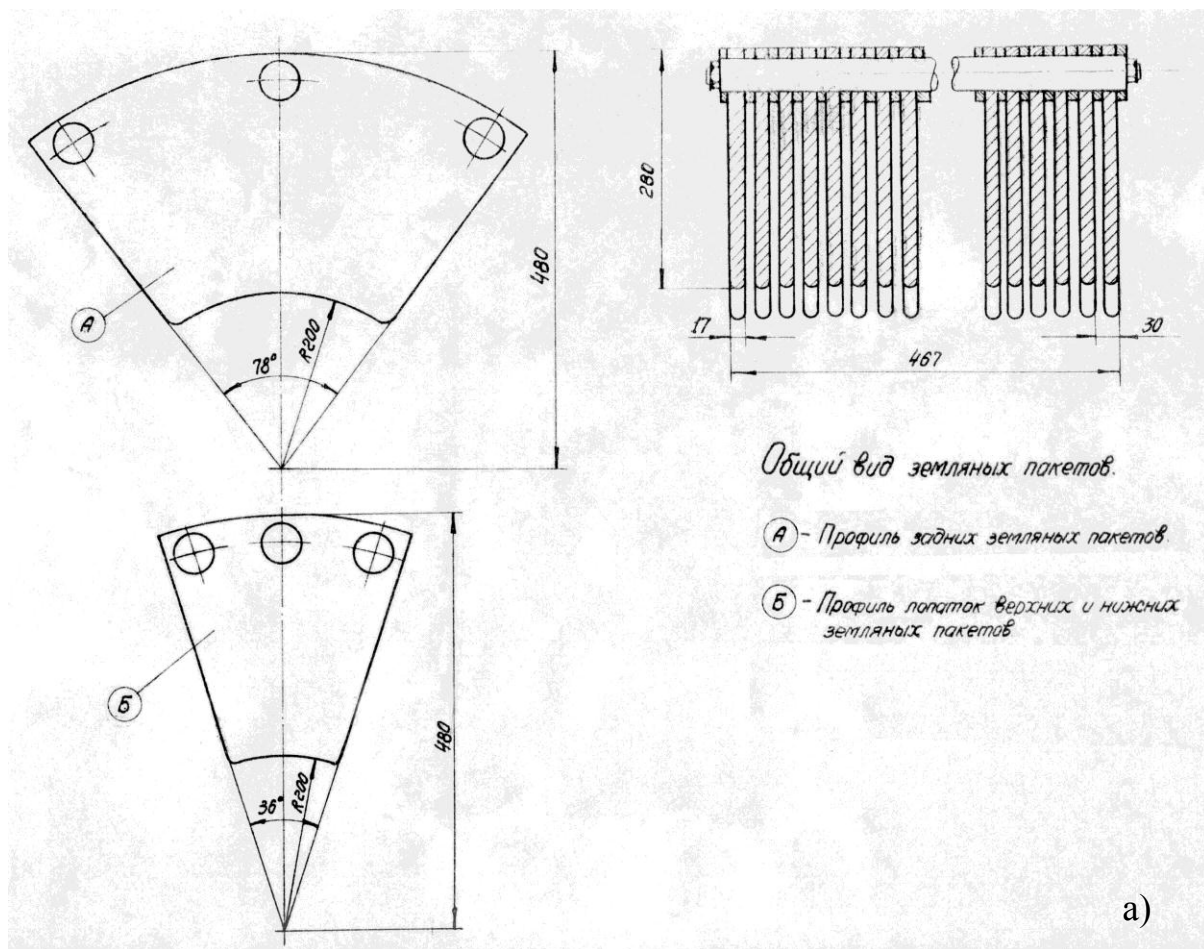


Рис. 6.8. «Земляные» пакеты:
а) геометрия; б) вид

Полицилиндрические конденсаторы вариатора частоты

На концах вала находятся полицилиндрические конденсаторы, предназначенные для защиты подшипников от ВЧ-токов. Конструкция и фотография блока полицилиндров приведены на рис. 6.9а, б.

Полицилиндрические конденсаторы состоят из двух частей – роторной (24, рис. 6.2) и «земляной» (25). Каждая из частей имеет 6 колец толщиной 3 мм и высотой 80 мм. Кольца расположены на основаниях, в

которых имеется по 6 концентрических канавок – «посадочных мест» соответствующих колец. Каждое из колец притягивается к основаниям 8 вин-тами, расположенными с обратной стороны основания.

Основания роторных частей полицилиндрических конденсаторов крепятся к торцам вала ротора вариатора при помощи прижимной гайки и шести болтов. На наибольшем диаметре основания имеется канавка, в которой размещены грузики для балансировки ротора.

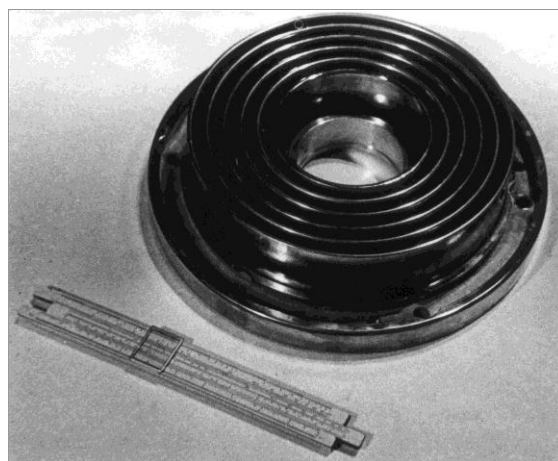
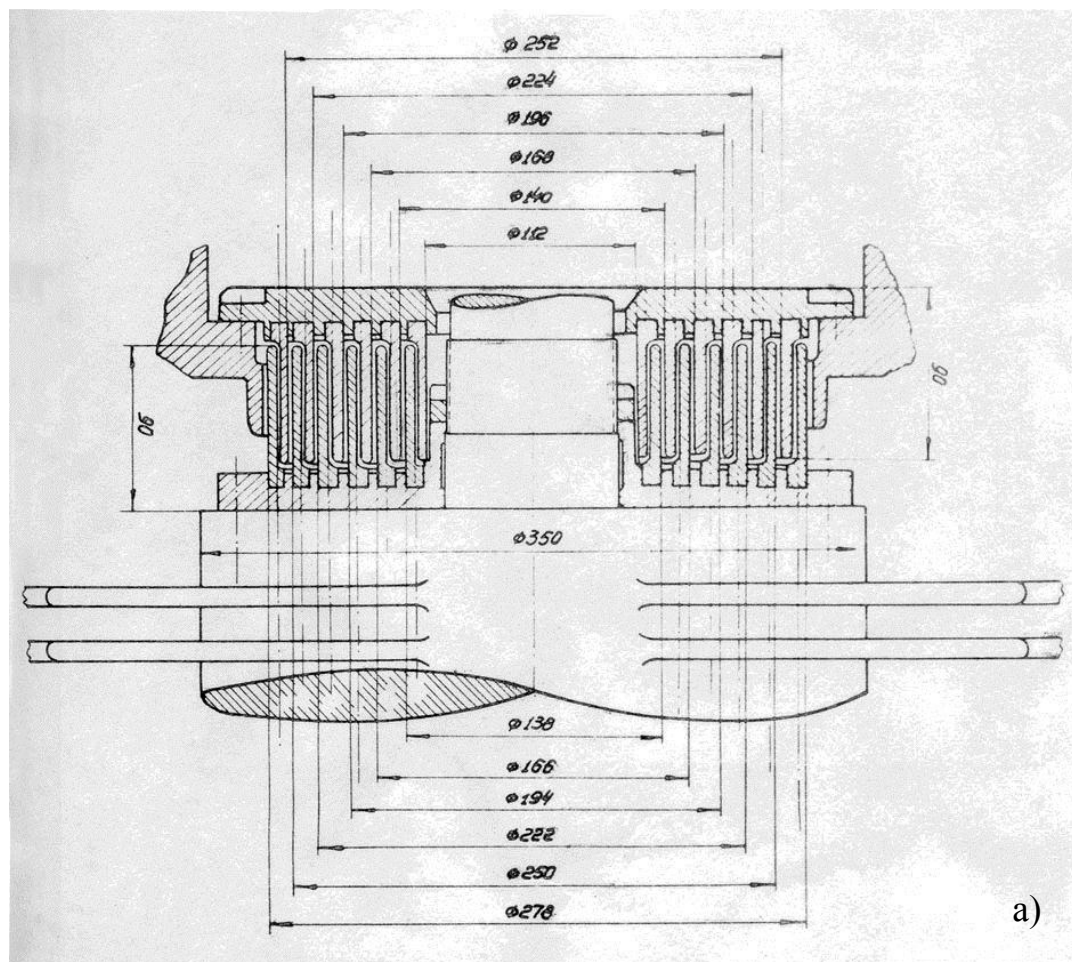


Рис. 6.9. Блок полицилиндров:
а) конструкция; б) наружные кольца

Электрический контакт между роторной частью конденсатора и ротором осуществляется через медную проволоку диаметром 1,4 мм, проложенную между ними. Охлаждение роторной части осуществляется через непосредственный контакт между ее основанием и торцом ротора. Основание «земляной» части полицилиндрических конденсаторов крепится к соответствующим «посадочным местам» в «щеках» вариатора при помощи шести болтов. На основание каждой «земляной» части напаяна медная трубка для охлаждения водой. В собранном виде зазор между пластинами конденсатора составляет $1 (\pm 0,1)$ мм.

Кожух вариатора частоты

Кожух вариатора (9, рис. 6.2) состоит из 4-х частей, изготовленных из конструктивной стали и медненных со стороны вакуумного объема. Основание кожуха – сварное и крепится к вакуумному отсеку. С боков к основанию кожуха крепятся «щеки» кожуха, которые имеют отверстия для выхода «посадочных мест» ротора вариатора, а также отверстия для фидеров обратной связи и трубок охлаждения «земляных» пакетов. С задней стороны основания кожуха крепится съемная крышка кожуха (22), которая имеет два смотровых окна (23) и отверстия для трубок охлаждения блокировочных конденсаторов и шунтов. Все разборные детали кожуха вакуумно уплотнены при помощи вакуумной резины.

«Щеки» вариатора частоты

«Щеки» вариатора (18, рис. 6.2), сварные с ребрами жесткости, изготовлены из конструктивной стали. С внешних сторон ротора вариатора «щеки» меднены, а с внутренних – меднены и покрыты хромом.

«Щеки» являются основной несущей конструкцией вариатора частоты. К ним сверху и снизу под определенным углом крепятся основания «земляных» пакетов и задняя съемная стенка (22). С внешних сторон «щеки» имеют «посадочные места» для крепления опоры ротора. К внутренней части опор крепится «земляная» часть полицилиндрических конденсаторов (25). «Щеки» непосредственно крепятся к вакуумному отсеку.

Система охлаждения вариатора частоты

Индуктивная часть вариатора частоты охлаждается через боковой ввод воды охлаждения вакуумной камеры. Вода последовательно проходит через ВЧ-дроссель, основание дуантного пакета, через штуцера, соединяющие индуктивные кольца (17, рис. 6.2) с основанием дуантного пакета, через П-образные индуктивные стойки (8) и основания индуктивных пакетов; далее опять через индуктивные кольца, дроссель и вывод воды из вакуумной камеры.

«Земляные» пакеты (12) охлаждаются через свои основания (13), каждый в отдельности. Ввод и вывод воды ведется через отверстие в боковых «щеках» кожуха. Задняя стенка, блокировочные конденсаторы (6) и шунты (5) соединены по воде последовательно. Ввод и вывод воды происходит через отверстие плиты кожуха. Все четыре «земляные» части полицилиндрических конденсаторов охлаждаются последовательно, а вводы трубок охлаждающей воды проходят через опоры подшипников ротора. Ввод и вывод воды в вал ротора вариатора (15) происходит с одной стороны вала при помощи разделительного узла водораспределения (29). Так как ротор полый и имеет каналы, то вода подается сначала в наружную полость, доходит до противоположного конца ротора и через его центральную часть выводится наружу. Охлаждение вариатора ведется дистиллированной водой.

Сборка и механическая регулировка узлов вариатора частоты

Вся механическая сборка каждого в отдельности вариатора происходит при помощи специальных приспособлений на сборочной плите. На ней выверяется параллельность «щек» корпуса (18, рис. 6.2), устанавливаются «земляные» пакеты (12), выверяются предварительные зазоры между роторными и «земляными» пластинами. Индуктивная часть собирается отдельно на специальном стенде, где ведется выверка индуктивных пакетов (11) и дуантного пакета (20) по угловому положению между ними, а также по положению всех пластин относительно друг друга. Окончательная сборка и регулировка вариатора частоты ведется непосредственно на вакуумном отсеке камеры. Здесь выверяются соосность вариаторов относительно друг друга, зазоры между ротором, «земляными», дуантными и индуктивными пакетами, а также положение всех пакетов по углам. Заключительный этап – это установка и выверка промежуточного вала, а также механическое симметрирование вариаторов друг с другом.

Обслуживание вариатора частоты и профилактический уход в период эксплуатации

В период эксплуатации обслуживание вариатора заключается в систематическом прослушивании, проверке и смазке вращающихся узлов. Во время профилактического ремонта необходимо производить смену смазки в неревизируемых узлах, а в ревизируемых производить смену подшипников, сальниковых уплотнений, а также, по мере необходимости, смену манжетных уплотнений. Необходима систематическая подтяжка всех водяных соединений и механических креплений. При ревизии требу-

ется систематическая проверка всех зазоров, а также зачистка и снятие налета со всех частей вариатора, находящихся под ВЧ-напряжением.

Принципиальные изменения, внесенные в конструкцию вариатора частоты

Пробная эксплуатация синхроциклотрона показала, что в нижней части диапазона напряжение на роторе вариатора при ускоряющем напряжении 8 кВ достигает 2,5 кВ, что при зазорах между пластинами ротора и в полицилиндрах ~ 1 мм вызывает пробой и электроэрозию. Это привело к ограничению ускоряющего напряжения и, следовательно, к уменьшению интенсивности пучка. (Зависимость между величиной ускоряющего напряжения и интенсивностью протонного пучка синхроциклотрона рассмотрена нами в главе 7, п. 7.3.) Поэтому с целью понижения напряжения на роторе вариатора и улучшения его эксплуатационных характеристик были введены принципиальные конструктивные изменения.

Все статорные и роторные пластины нового вариатора были изготовлены из алюминиевого сплава АМГ-6 вместо нержавеющей стали с хромовым покрытием по проекту. Полицилиндры изготовлены из меди М-2. Это уменьшило электрокоррозию поверхностей вариатора и количество образующихся на нем кратеров и каверн после электрических пробоев и резонансных ВЧ-разрядов (РВР), происходящих между пластинами вариатора и в полицилиндрах (подробнее в п. 6.5). Значительно облегчились работы по восстановлению поверхностей пластин ротора методом шабрения и полировки после эксплуатационного цикла (2 000–3 000 часов работы ускорителя).

Улучшился тепловой режим вариатора. Лопатки вариатора напрессованы на вал вариатора. Охлаждение лопаток происходит через контактные соединения между лопатками и валом, который охлаждается водой. Эти контактные соединения являются одновременно и тепловыми сопротивлениями при съеме теплотока с ротора. Использование алюминиевого сплава вместо нержавеющей стали улучшило теплосъем с лопаток вариатора и повысило его эксплуатационные характеристики.

Выше было показано, что при исследовании влияния емкости дуантных пакетов на частотную программу емкость C в нижней части диапазона практически не влияет на частоту системы. Поэтому с целью уменьшения начальной емкости вариатора и увеличения верхнего значения частоты программы 36-градусные дуантные пакеты были заменены заново изготовленными 18-градусными дуантными пакетами. Это уменьшило начальную емкость дуантных пакетов примерно с 275 (на один вариатор) до 150 пФ и, соответственно, увеличило максимальную частоту

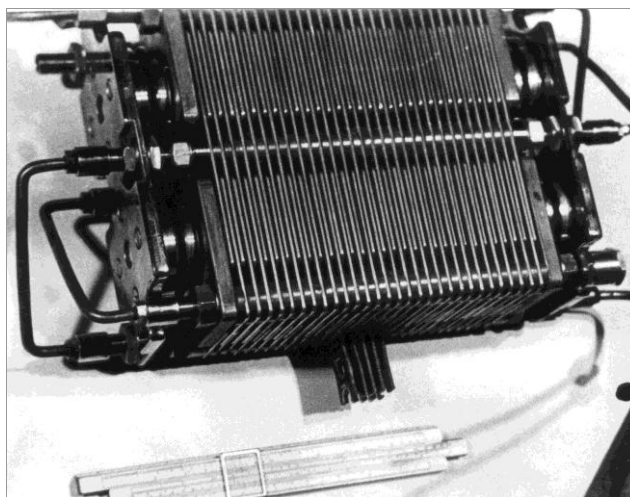
резонансной системы и величину df/α в районе захвата. Конструкция старого и нового дуантных пакетов показана на рис. 6.4а, б.

Как уже отмечалось, заземление по высокой частоте ротора вариатора и индуктивности C_2 осуществляется емкостью C_p , которая представляет собой емкость, образованную «земляными» пакетами вариатора и полицилиндрическими конденсаторами, и емкостью C_6 , которая является емкостью задних блокировочных конденсаторов, заземляющих индуктивные кольца вариатора по высокой частоте (рис. 5.18).

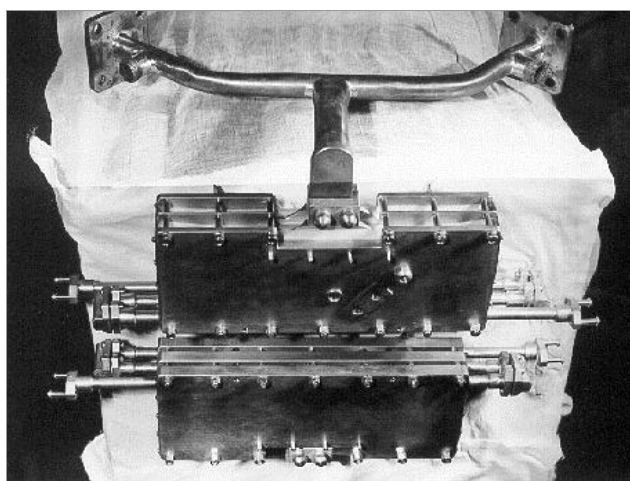
С целью уменьшения напряжения на роторе вариатора была разработана принципиально новая конструкция заземления ротора при помощи двух дисков диаметром 1 м и толщиной 10 мм, насаженных по краям вала ротора и имеющих зазор 1 мм с ответной «земляной» поверхностью кожуха вариатора. Конструкция этих дисков хорошо видна на рис. 6.1. Диски были изготовлены из алюминиевого сплава АМГ-6.

Были разработаны новые блокировочные конденсаторы. В первоначальном варианте задние блокировочные конденсаторы вариатора набирались из 3-миллиметровых латунных пластин размером 7×25 см² с зазором между ними 1 мм, который был ориентирован перпендикулярно магнитному полю ускорителя (рис. 6.10а, б). Из-за недостаточно жесткой конструкции и попадания в зазоры конденсаторов при включении магнитного поля мелких металлических стружек происходили частые пробои и замыкания пластин. В связи с этим, а также с целью увеличения емкости конденсаторов были разработаны новые задние блокировочные конденсаторы с емкостью 40 000 пФ, в которых было предусмотрено водяное охлаждение пластин, а «воздушные» зазоры были заменены на прокладки из тефлоновой пленки толщиной 0,25 мм.

Блокировочный конденсатор (б, рис. 6.2) набран из пяти латунных пластин толщиной 15 мм: трех «земляных» размером 235×200 мм и двух размером 135×200 мм. Эти две пластины при помощи приливов подсоединены к индуктивным кольцам через специальные крепления – шунты (5). Между пластинами проложена пленка из фторопласта толщиной 0,25 мм. Пластины стянуты между собой шестью латунными шпильками. На задней «земляной» пластине сверху и снизу прикреплены планки, при помощи которых конденсатор крепится на заднюю стенку статора вариатора частоты. Вода для охлаждения конденсаторов проходит через все пластины по имеющимся внутри них каналам. Специальные фарфоровые вставки разделяют разнопотенциальные пластины при последовательном охлаждении.



а)



б)

Рис. 6.10. Блокировочные конденсаторы вариатора:
а) до модернизации; б) после модернизации

Как отмечалось выше, была изменена геометрия всех статорных пластин блоков «земляных» пакетов, заземляющих по высокой частоте свободные от емкостного зацепления пластины ротора, которая приводила к паразитному резонансу в частотном диапазоне. Новая геометрия статорных пластин показана на рис. 6.8. Суммарная емкость C_p заземления ротора в нижней части диапазона увеличилась при этом до 22 000 пФ, и за счет этого нижняя частота диапазона уменьшилась на 0,3 МГц.

Защита подшипников вариатора частоты

Несмотря на «заземления» вариатора по высокой частоте с помощью вышеописанных заземляющих емкостей, на валу ротора присутствует ВЧ-напряжение до 2 кВ, и через подшипники вариатора протекают значительные ВЧ-токи. Так как в шарикоподшипниковом соединении имеется только «точечный» контакт шарик – обойма, то плотность токов достигает значительных величин, приводя к электрокоррозии подшипников и необходимости их замены через 1 000 часов работы ускорителя. По-

этому с внутренней стороны каждого из вариаторов были поставлены роликовые конусные подшипники, которые из-за более развитой контактной поверхности ролик – обойма лучше противостоят электрокоррозии.

Дополнительно подшипники были зашунтированы трущейся парой чугунных колец. Такая защита оказалась очень эффективной, а износостойкость подшипников увеличилась в десятки раз.

С целью уменьшения ВЧ-напряжения на роторе вариатора была изготовлена новая конструкция конденсаторов для защиты подшипников ротора – поликонические конденсаторы с более развитой поверхностью и регулируемым зазором (рис. 6.11). Это позволило увеличить емкость одного блока с 5 000 до 7 000 пФ.

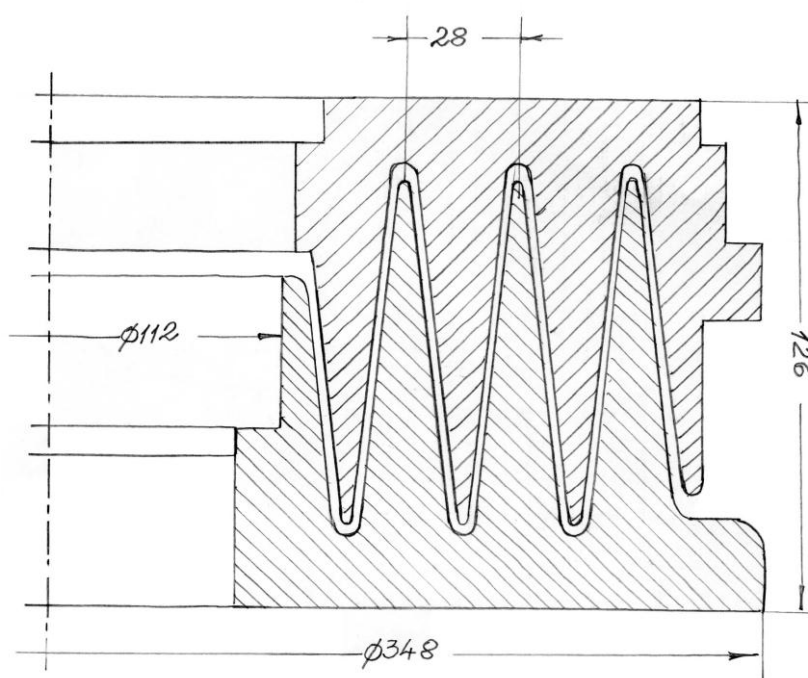


Рис. 6.11. Поликонический конденсатор

Важным следствием увеличения емкости конденсатора явилась более надежная защита подшипников вариатора от протекания ВЧ-токов и сдвиг продольных паразитных резонансов вариатора за пределы рабочей частотной программы.

Изменение индуктивностей L_2 и L_3

Как было показано выше, получение необходимого частотного диапазона было достигнуто за счет введения в схему вариатора индуктивности L_3 и уменьшения величины индуктивности L_2 (рис. 5.19). Была произведена конструктивная переделка крепления индуктивных пакетов вариатора к индуктивным кольцам в виде П-образных стоек, показанных на рис. 6.7, которые и образовывали индуктивность L_3 . Наличие подвиж-

ного контактного соединения позволяло изменять величину индуктивности L_3 и точно подстраивать частоту диапазона. Стойки охлаждаются водой.

Уменьшение величины L_2 было осуществлено за счет новой конструкции подсоединения индуктивных колец к задним блокировочным конденсаторам, показанной на рис. 6.12.

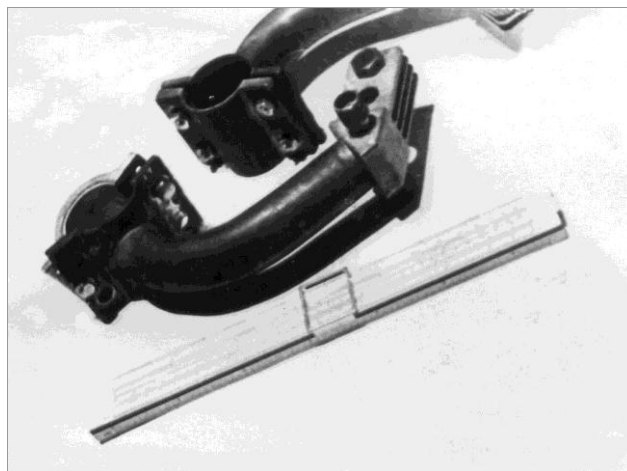


Рис. 6.12. Конструкция дужек, заземляющих индуктивность L_2

6.4. Контроль за тепловыми деформациями в конструкции вариатора частоты

Потери мощности в вариаторе составляют бóльшую часть суммарных потерь в ВЧ ускоряющей системе. Это является следствием использования в вариаторе индуктивных элементов и свойств резонансных контуров с возрастанием токов в них при приближении к резонансу. В главе 5 были получены выражения для величин токов, протекающих по индуктивным элементам вариатора (рис. 5.22).

Мощность, рассеиваемая в индуктивных элементах вариатора L_1 , L_2 , и L_3 , определяется выражением

$$P_i = \frac{1}{120} \int_0^{36^\circ} I_i^2(\alpha) R_i(\alpha) d\alpha,$$

где $I = 1, 2, 3$, а R_i – активное сопротивление с учетом величины скин-слоя соответствующего индуктивного элемента; α – угол поворота ротора вариатора в градусах. Величины активных сопротивлений R_i равны соответственно $R_1 = R'_1/8$, $R_2 = R'_2/8 + R'_d/4$, $R_3 = R'_3/8$. Здесь R'_1 и R'_2 – активное сопротивление соответствующих участков индуктивных колец; R'_3 – активное сопротивление конструкции подсоединения индуктивных пакетов к индуктивным кольцам; R'_d – активное сопротивление задних

дужек, обеспечивающих крепление индуктивных колец к задним блокировочным конденсаторам (рис. 5.17б).

Как видно из этих формул, уменьшение величины расстройки $\Delta f = f_1 - f$ в нижней части диапазона, необходимое для увеличения эквивалентной емкости вариатора, вызывает обратно пропорциональное величине расстройки возрастание токов во всех индуктивных элементах вариатора, и, соответственно, обратно пропорционально квадрату величины расстройки возрастает рассеиваемая в этих элементах мощность. Обратно пропорционально величине расстройки возрастает также напряжение U_{C2} на индуктивных пакетах и напряжение на роторе вариатора U_{cp3} , что может привести к пробоям между лопатками ротора и «земляными» пакетами и к эрозии подшипников вариатора.

Измерения показали, что потери мощности в вариаторе частоты при ускоряющем напряжении 8 кВ составляют около 150 кВт и сосредоточены на 80 % в скин-слое индуктивностей L_1, L_2, L_3 . Для изготовления этих индуктивностей была использована труба из нержавеющей стали, на поверхность которой гальваническим способом был нанесен слой меди и затем слой хрома, проводимость которого в 9 раз хуже меди. Поэтому с целью снижения рассеиваемой мощности был установлен контроль за толщиной покрытия хромом, которое было ограничено величиной в несколько мк. С целью снижения мощности, рассеиваемой в задних дужках вариатора, в которых ток в конце диапазона наибольший, было проведено серебрение этих дужек и хромовое покрытие не накладывалось.

Таким образом, ограничение амплитуды ускоряющего напряжения на дуанте и значительная мощность, рассеиваемая в индуктивных элементах вариатора, являются, по существу, платой за увеличение коэффициента перекрытия вариатора частоты по емкости и соответствующего расширения диапазона частот, необходимого для ускорения протонов до энергии 1 ГэВ.

Естественное желание повысить интенсивность пучка за счет увеличения ускоряющего напряжения приводит к предельно возможному режиму работы вариатора как по пробивному напряжению, так и по его тепловому режиму. Нагрев элементов вариатора, в основном его индуктивных дуг, на которых крепятся блоки пакетов, приводит к их тепловой деформации, к изменению зазоров между пластинами вариатора и возникновению пробоев. Так, например, введение регулируемой индуктивности L_3 (рис. 5.19) при помощи П-образных стоек (рис. 6.7) уменьшило механическую жесткость крепления индуктивных пакетов, и при нагреве стоек могло происходить смещение пакетов с изменением зазоров между пластинами ротора. Деформация пластин происходит также из-за их неравномерного нагрева.

Нами была разработана система измерения перемещения пластин ротора относительно кожуха вариатора и дистанционного контроля непосредственно во время эксплуатации ускорителя. Данные о перемещениях выводились на пульт управления, информируя о механических смещениях конструктивных частей вариатора. Контроль осуществлялся при помощи электроемкостных датчиков, расположенных по окружности статора.

Контроль за тепловым режимом работы вариатора и информация о смещении его частей позволили выработать регламент работы вариатора и ограничить величину ускоряющего напряжения предельно допустимой величиной, обеспечивающей длительную и надежную эксплуатацию ускорителя.

После введения системы защиты ускоряющей системы от ВЧ-пробоев система контроля за смещением ротора была демонтирована.

6.5. Система защиты ускоряющей системы от высокочастотных пробоев

Большинство конструктивных элементов ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона выполнены из меди. ВЧ-напряжение вырывает отдельные электроны с поверхности системы, которые, ускоряясь в ВЧ-поле, двигаются к противоположной поверхности и при величине коэффициента вторичной эмиссии электронов (КВЭ) больше единицы выбивают из нее больше одного электрона. Если время движения электрона между такими поверхностями равно полупериоду ВЧ-напряжения, то выбитые электроны двигаются в противоположном направлении и, в свою очередь, выбивают эмиссионные электроны. Так возникает электронная лавина, осциллирующая синхронно с частотой электрического поля, существующего между двумя поверхностями, – это так называемый РВР, или мультипакторный эффект. Этот разряд нарушает работу ВЧ-генератора и приводит к срыву генерации ВЧ-напряжения. Область существования РВР определяется соотношением между амплитудой и частотой ВЧ-напряжения и расстоянием между электродами.

При практических оценках удобно пользоваться обобщенными значениями граничных напряжений¹

$$\xi_{\text{гр.}} = \frac{U_{\text{гр.}}}{U_0},$$

где $U_{\text{гр.}}$ – амплитуда напряжения возникновения РВР.

$$U_0 = \frac{4\pi^2 f^2 d^2}{e/m} = 2,26 \cdot 10^{-2} (fd)^2 \text{ (МГц}^2 \cdot \text{см}^2\text{)},$$

¹ Загер Б. А., Тишин В. Г. Резонансный ВЧ-разряд в ускорителях // Междунар. конф. по ускорителям. М., 1964. С. 953–957.

где d – межэлектродное расстояние в сантиметрах; f – частота колебаний электрического поля в мегагерцах; e , m – заряд и масса электрона.

На рис. 6.13 приведена область существования РВР, полученная экспериментально на циклотронах У-300 и У-150 в ЛЯР ОИЯИ.

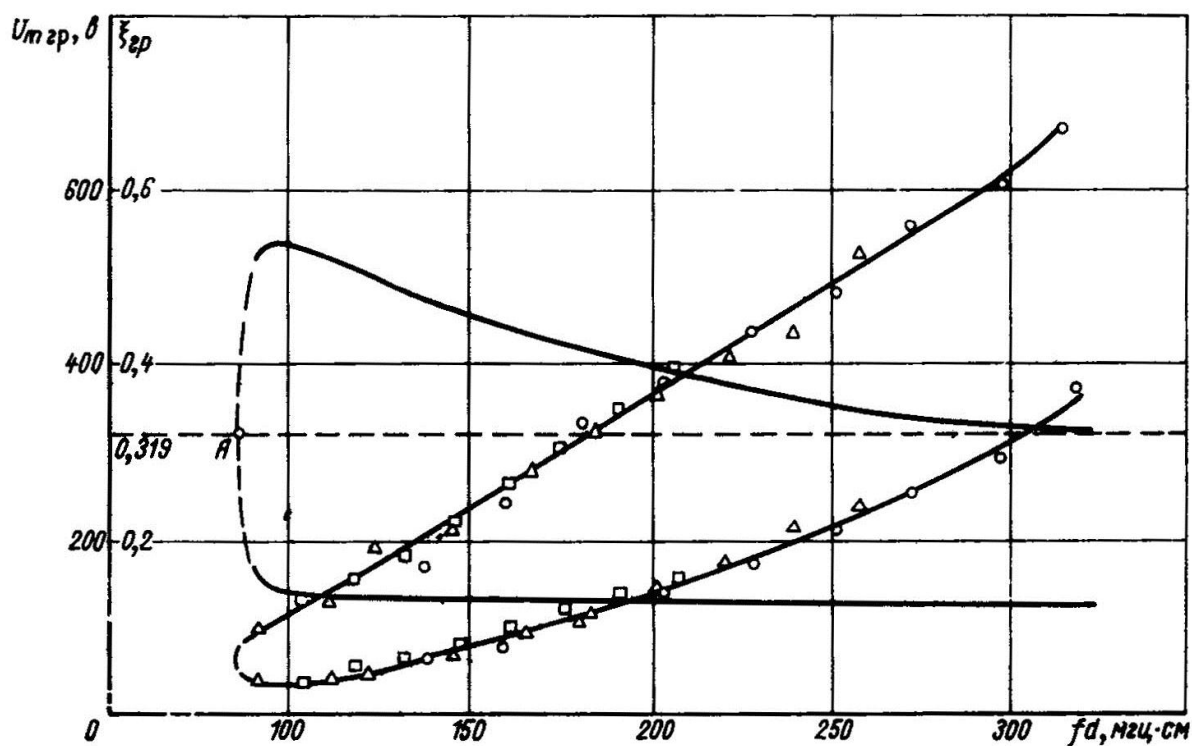


Рис. 6.13. Область существования РВР по результатам эксперимента.
 Значения f , МГц: 22,8 (0); 18,4 (Δ); 14,7 (\square);
 ξ – обобщенная амплитуда напряжения

При включении или подаче импульса ВЧ-напряжения амплитуда ВЧ-напряжения возрастает от 0 до U_{\max} , поэтому в реальной системе всегда найдется промежуток между электродами, где выполняется условие возникновения РВР, причем наличие стоячей волны в резонансной системе приводит к перемещению области существования РВР по длине резонатора (рис. 6.14). Наиболее рациональным способом ликвидации РВР является использование в ускоряющей системе покрытий электродов с КВЭ меньше единицы. Однако применение для этой цели существующих материалов представляется проблематичным.

Для защиты ускоряющей системы от РВР традиционно используется подача отрицательного смещения (1–3 кВ) на все ее элементы: дуант, вариатор, фокусирующие электроды, С-электрод и др. подача смещения изменяет временные интервалы пролета электронов между электродами в одну и другую сторону и тем самым предотвращает развитие лавинообразного РВР. Величина смещения, требующаяся для подавления РВР и полученная экспериментально, приведена на рис. 6.15.

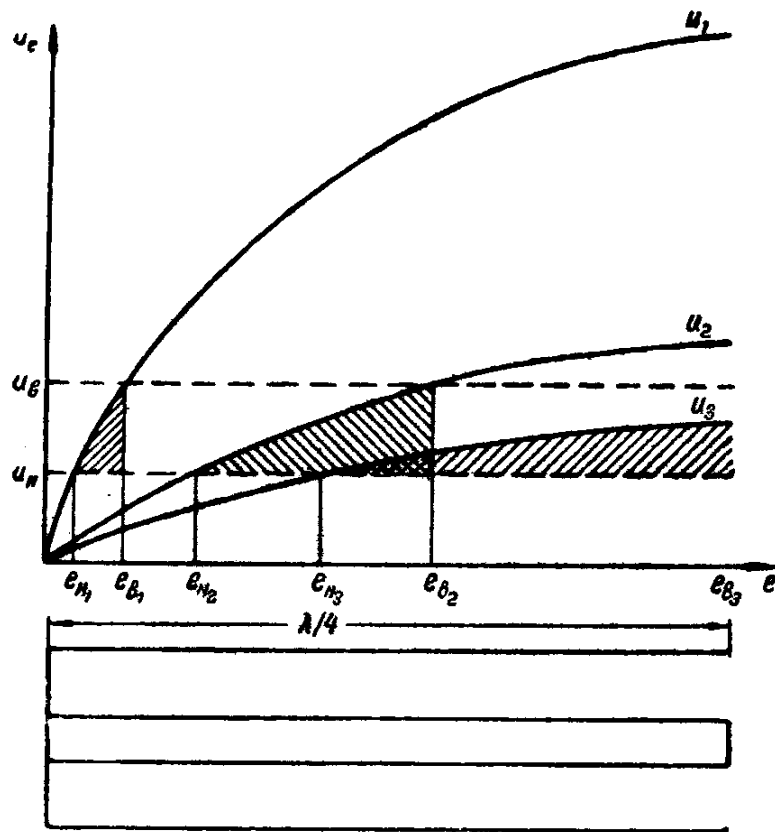


Рис. 6.14. Схематическая зависимость расположения областей существования РВР в четвертьволновом коаксиальном резонаторе

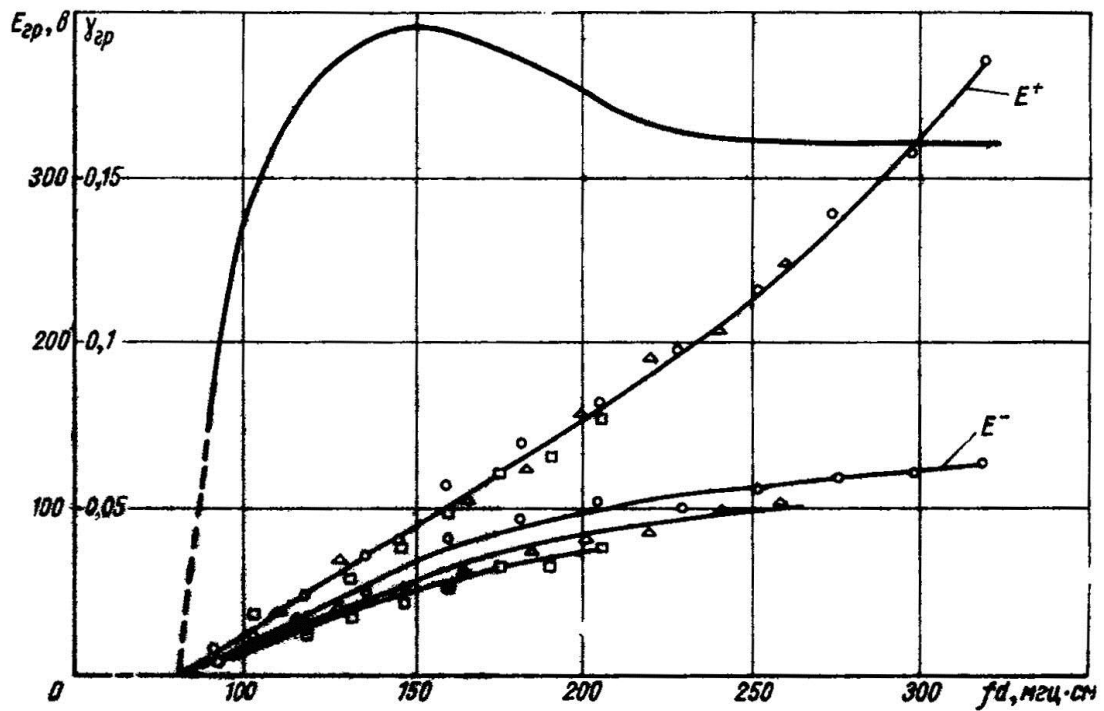


Рис. 6.15. Результаты измерения смещения, требующегося для подавления РВР (γ – обобщенная величина смещения).
Значения f , МГц: 22,8 (\circ); 18,4 (Δ); 14,7 (\square)

На синхроциклотроне ПИЯФ использована схема защиты, работающая следующим образом. Перед началом каждого рабочего цикла все вышеперечисленные элементы ускоряющей системы, имеющие емкостное сопротивление на землю, импульсно заряжаются до потенциала 2–2,5 кВ от высокоомного источника. За время рабочего цикла программы ускоряющего напряжения этот отрицательный потенциал уменьшается на 20–30 % через сопротивление утечки, но остается достаточным для предотвращения возникновения РВР. Перед следующим циклом ускорения происходит его подзарядка до первоначального уровня.

В случае возникновения в любом из элементов ускоряющей системы (при любой частоте ускоряющей программы) единичного пробоя одновременно происходит и разряд емкости системы, что автоматически приводит к срыву ВЧ-генерации ускоряющей системы на оставшуюся часть цикла ускорения. Если этот пробой носил случайный характер, то к следующему циклу ускорения система автоматически восстанавливает свою работоспособность. Система слежения и контроля анализирует и запоминает количество пробоев и частоту ускорения, при котором возникает пробой. При повторении серии пробоев программно снижается или отключается напряжение с ускоряющей системы.

Отметим, что наличие на поверхности электродов пленки вакуумного масла и слоя адсорбированных газов приводит к тому, что в начальный период работы ускорителя после предшествующей продолжительной остановки возможно возникновение плазменного разряда ударной ионизации. Поскольку инициатором плазменного разряда обычно служит РВР, эти два различных разряда часто путают. Если РВР можно ликвидировать с помощью смещения на электродах, то плазменный разряд при подаче постоянного напряжения усиливается. Образование плазмы в объеме происходит путем ионизации газа и продуктов разложения вакуумного масла, выделяющихся со стенок резонатора под действием электронной лавины РВР. Поэтому при эксплуатации ускорителей необходимо следить за чистотой поверхностей резонатора, исключить возможность попадания паров масла в вакуумный объем, а также предусматривать время для «тренировки» резонансной системы.

Разработанная нами система смещения полностью исключает развитие РВР и эффективно предотвращает длительный плазменный разряд.

6.6. Оптимизация частотной программы синхроциклотрона ПИЯФ

Важным параметром ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона является форма зависимости частоты ускоряющего напряжения от угла поворота ротора вариатора – так называемая частотная программа $f(\alpha)$.

В главе 3 были приведены формулы для нахождения зависимости $f(\alpha)$ при заданных параметрах ускорителя $B(r)$, $K(r)$, $V(\alpha)$. Форма этой частотной кривой $f(\alpha)$ в предположении, что ускоряющее напряжение на дуанте остается постоянным, приведена на рис. 6.19 (кривая 1). Однако при получении этой зависимости $f(\alpha)$ не учитывалось явление затухания амплитуды синхротронных колебаний в процессе ускорения.

Если в начале цикла ускорения сепаратриса была заполнена полностью, то при ускорении протонов по мере затухания синхротронных колебаний фазовая площадь, занятая пучком, становится меньше. Ускорение «большой» сепаратрисой «маленького» фазового объема невыгодно, т. к. не используется полностью амплитуда ускоряющего напряжения и время ускорения становится больше, чем это необходимо. Поэтому надо скорректировать частотную программу таким образом, чтобы размер сепаратрисы в процессе ускорения уменьшался по мере сокращения фазового объема, занятого пучком.

Эта зависимость может быть найдена из выражения для адиабатического инварианта фазовых колебаний, который представляет собой площадь, охватываемую фазовой траекторией на фазовой плоскости $\left(\frac{\Delta E}{\omega}, \varphi\right)$:

$$J(C, \varphi_s) = 2 \sqrt{\frac{2eV E_s}{\pi K_s \omega_s^2}} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \sqrt{\sin \varphi - \varphi \cos \varphi_s + C} d\varphi,$$

где C – константа, определяющая выбранную фазовую траекторию. Для сепаратрисы $C = C_s = \sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s$.

Предположим, что сепаратриса «заполнена» полностью. Тогда сохраняется величина

$$J_s(\varphi_s) = 2 \sqrt{\frac{2eV E_s}{\pi K_s \omega_s^2}} S(\varphi_s),$$

где $S(\varphi_s) = \int_{-\varphi_s}^{\varphi_1} \sqrt{\sin \varphi + \sin \varphi_s - (\varphi + \varphi_s) \cos \varphi_s} d\varphi$. Зависимость $S(\varphi_s)$ представлена на рис. 6.16. Отсюда, если заданы начальные значения V_0 , f_0 , K_0 и φ_{s0} , следует

$$S(\varphi_s) = \sqrt{\frac{V_0 n_0 n}{V n n_0} \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} S(\varphi_{s0}).$$

Располагая найденной путем численного интегрирования зависимостью $S(\varphi_s)$, может быть найдена искомая зависимость $\varphi_s(R)$. Результаты расчетов представлены на рис. 6.17, 6.18.

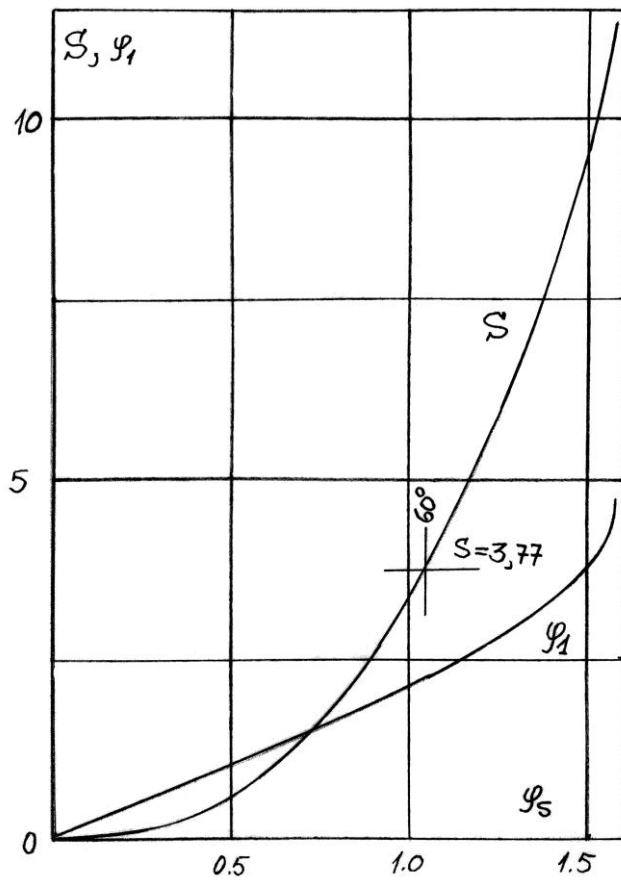


Рис. 6.16. Зависимость площади сепаратрисы S и правой фазы φ_1 от значения равновесной фазы φ_s

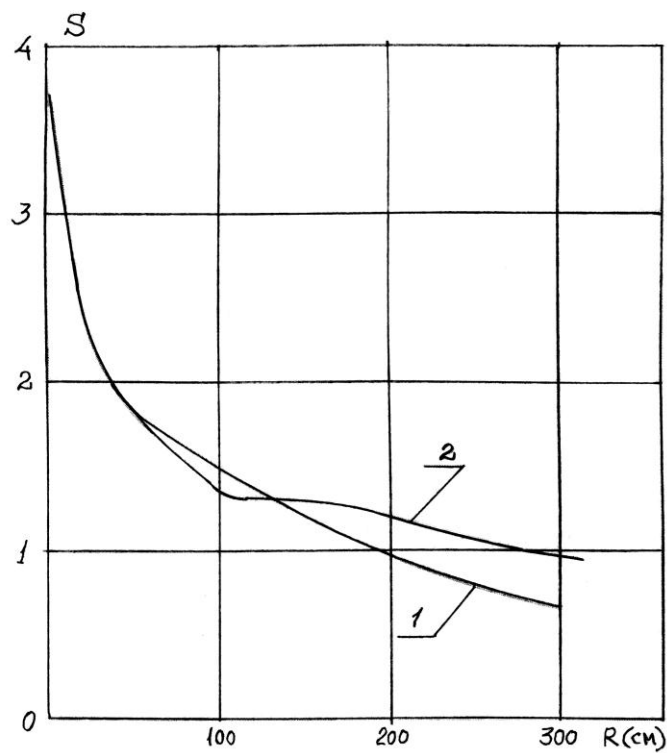


Рис. 6.17. Зависимость площади сепаратрисы S от радиуса R . 1 – $V = \text{const}$; 2 – $V = \text{varia}$

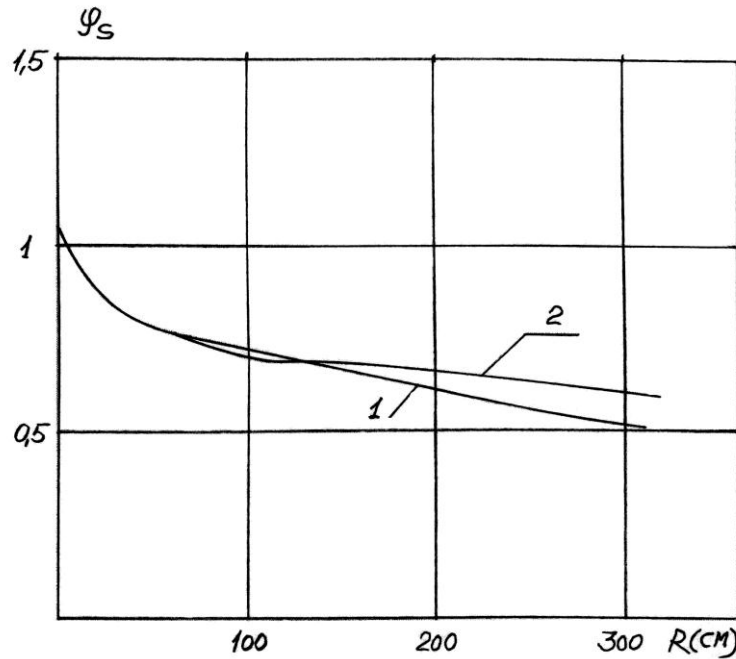


Рис. 6.18. Зависимость равновесной фазы φ_s от радиуса R .
 1 – $V = \text{const}$; 2 – $V = \text{varia}$. Вариант $V = \text{varia}$ соответствует реальной зависимости амплитуды ускоряющего напряжения от угла α для синхротрона ПИЯФ

На рис. 6.19 приведена форма оптимальной частотной кривой $f_{\text{opt}}(\alpha)$ и форма $f(\alpha)$, рассчитанная по формуле (3.9) (глава 3) без учета затухания синхротронных колебаний. Заметим, что оптимальная форма частотной кривой $f_{\text{opt}}(\alpha)$ мало отличается от кривой $f(\alpha)$.

Реальная форма частотной программы, измеренная на работающей ВЧ-системе синхротрона, оказалась отличной от оптимальной. Эта зависимость $f'_R(\alpha)$ также приведена на рис. 6.19. Важно отметить, что из-за свойства автофазировки отличие реальной программы от оптимальной не нарушает сам процесс ускорения, но приводит к увеличению амплитуды синхротронных колебаний, а в случае приближения величины $\cos \varphi_s$ к единице приводит к необходимости ограничения числа оборотов вариатора, т. е. частоты модуляции частотной программы и, следовательно, к уменьшению интенсивности. Действительно, в главе 3 была получена формула (3.6а), связывающая величину $\cos \varphi_s$ с частотной программой $df/d\alpha$ и величиной оборотов N . Поэтому оптимальная скорость вращения ротора, соответствующая значению $\cos \varphi_s = (\cos \varphi_s)_{\text{opt}}$ и постоянной амплитуде ускоряющего напряжения, может быть выражена в виде

$$N_{\text{opt}} = \frac{eVKf_s^2}{3E_s \frac{df}{d\alpha}} (\cos \varphi_s)_{\text{opt}}.$$

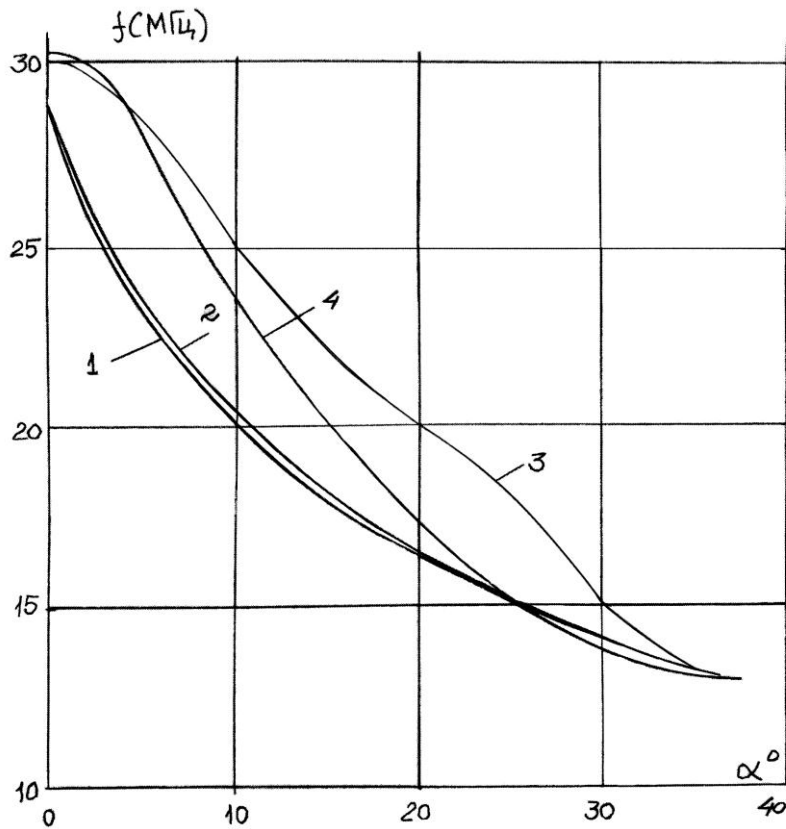


Рис. 6.19. Частотная программа:

1 – $f(\alpha)$ при $V \cos \varphi_s = \text{const}$; 2 – $f_{\text{opt}}(\alpha)$ при $V \cos \varphi_s = \text{const}$ с учетом затухания синхротронных колебаний; 3 – $f'_R(\alpha)$ – экспериментально измеренная частотная программа (до оптимизации); 4 – $f''_R(\alpha)$ – рабочая частотная программа синхроциклотрона (после оптимизации)

Однако если частотная и амплитудная программы не обеспечивают в процессе ускорения постоянство величины $V \cos \varphi_s$, то может оказаться, что при некоторых значениях угла α в пределах рабочего диапазона частот величина $\cos \varphi_s$ при выбранной скорости вращения ротора станет больше единицы. Это приведет к потере фазовой устойчивости и потерям пучка. Максимально допустимая скорость вращения ротора, при которой $\cos \varphi_s$ не выходит за пределы единицы, определяется выражением

$$N_{\max} < \left(\frac{eVRf^2}{3E_s \frac{df}{d\alpha}} \right)_{\max},$$

т. е. чем больше $df/d\alpha$, тем меньше допустимое число оборотов N_{\max} . При частотной программе $f'_R(\alpha)$ число оборотов вариатора соответствовало $N_{\max} = 300$ об./мин (период модуляции – 30 Гц).

Форма частотной кривой зависит от параметров ускорителя и его ВЧ ускоряющей системы, в частности от параметров вариатора, поэтому

программа была частично исправлена путем изготовления новых индуктивных пакетов с лопатками сложного профиля, найденного путем моделирования и ряда проб. Форма пластин показана на рис. 6.5. Получившаяся при этом зависимость частотной программы от угла $f_R''(\alpha)$ приведена на рис. 6.19. При этом величина производной $df/d\alpha$ в районе захвата изменилась незначительно, но в диапазоне углов $20\text{--}36^\circ$ приблизилась к расчетной. С новой формой частотной программы число оборотов ротора вариатора, соответствующее наибольшей интенсивности пучка, увеличилось с 300 до 500 об./мин.

В дальнейшем геометрия лопаток была упрощена и индуктивные пакеты были набраны из лопаток с прямолинейными кромками, но разной угловой протяженности (рис. 6.20). Клиновидные пакеты обеспечивали примерно такую же форму частотной программы $f_R''(\alpha)$.



Рис. 6.20. Форма лопаток клиновидных индуктивных пакетов

Отметим, что на частотной программе ускоряющей системы $f(t)$ есть два участка, которые требуют для оптимизации формы частотной программы иного подхода, который связан не только с проблемой автофазировки. Это начальный участок $f(t)$, в течение которого происходит захват протонов в режим ускорения, и конечный участок $f(t)$, который определяет параметры вывода пучка из синхроциклотрона, в частности длительность выведенного пучка.

Остановимся подробнее на оптимизации формы $f(\alpha)$ на этих участках.

Эффективность захвата

Далее будет показано, что эффективность захвата зависит от величины производной частотной программы df/dt на начальном участке $f(t)$, что подтверждается также экспериментальными результатами.

В главе 3 была получена связь между $df/d\alpha$ и оборотами вариатора N , поэтому настройка ускорителя на оптимальную величину эффективности захвата может быть осуществлена за счет выбора скорости вращения ротора вариатора, соответствующей оптимальному значению равновесной фазы, при которой эффективность захвата имеет максимум. Однако условие выбора оптимальных оборотов вариатора по критерию эффективности захвата не совпадает с условием ускорения протонов без потерь. Поэтому важно оптимизировать частотную программу $f(\alpha)$ на начальном участке в диапазоне частот захвата независимо от оптимизации программы в диапазоне частот ускорения протонов.

Такая оптимизация программы осуществляется на синхроциклотроне ПИЯФ следующим образом. К хвостовой части дуанта справа и слева от вариатора частоты были подсоединены регулируемые конденсаторы – триммеры. Подсоединение таких емкостей уменьшает резонансную частоту системы дуант – вариатор и сдвигает частотную программу $f(\alpha)$ в сторону нижних частот во всем диапазоне. Однако величина такого сдвига в начале программы при $f_{\max} \sim$ в 5 раз больше, чем при ее конечном значении f_{\min} . Поэтому с изменением емкости триммеров коррекция программы осуществляется практически только на начальном этапе цикла ускорения. Изменение величины f_{\max} приводит и к изменению ее производной df/dt в области частот захвата в больших пределах, вплоть до $df/dt = 0$.

Конструктивно триммеры были выполнены в виде двух круглых пластин, которые приводились в движение электродвигателями. Диаметр пластин ~ 30 см, расстояние от торца дуанта могло регулироваться от 5 до 15 мм. Управление осуществляется с пульта ускорителя, контроль ведется непосредственно по величине частоты в диапазоне захвата. Влияние такой коррекции на увеличение количества захватываемых в режим ускорения частиц и, следовательно, на увеличение интенсивности пучка синхроциклотрона подробно описано в главе 7, п. 7.3.

Длительность выводимого пучка

Прирост энергии протона за оборот (темп ускорения) определяет прирост радиуса равновесной орбиты и, следовательно, скорость «наплыва» ее на внутреннюю мишень или выводное устройство. Так как размер пучка по радиусу составляет ~ 20 см, то время «наплыва» и определяет длительность τ выводимого из ускорителя пучка. Длительность τ зависит от величины производной df/dt в конце программы. При уменьшении величины df/dt за счет автофазировки уменьшается и прирост энергии за оборот и, следовательно, увеличивается длительность вывода.

Уменьшение величины df/dt производится путем приближения конечной величины частотной программы f_{\min} , где $df/dt = 0$, к частоте f_k , соответствующей частоте вывода протонов. Так, например, в синхроциклотроне на энергию 680 МэВ (Дубна) в вариаторе предусмотрена такая регулировка¹. В синхроциклотроне ПИЯФ нижняя частота программы f_{\min} также приближена к f_k и длительность взаимодействия пучка с внутренней мишенью составляет величину $\tau \approx 600\text{--}800$ мкс, а длительность выведенного из ускорителя пучка составляет $\tau \approx 300$ мкс. Дальнейшему увеличению τ посвящена глава 7, п. 7.1.

Оптимизация частотной программы $f(\alpha)$ была осуществлена следующим образом:

- на протяжении всего цикла ускорения за счет изменения формы лопаток индуктивных пакетов;
- на начальном участке программы за счет введения регулируемых триммеров в хвостовой части дуанта;
- на конечном участке программы в диапазоне вывода за счет приближения конечной частоты программы к частоте вывода.

В результате проведенной оптимизации частотной программы число оборотов ротора вариатора, соответствующее наибольшей интенсивности пучка, увеличилось с 300 до 500 об./мин.

6.7. Оптимизация амплитудной программы синхроциклотрона ПИЯФ

Как указывалось выше, увеличение амплитуды ускоряющего напряжения на дуанте, определяющее интенсивность ускоряемого пучка, при наличии запаса мощности ВЧ-генератора, ограничено в основном двумя причинами: пробоями в зазорах вариатора частоты и перегревом отдельных элементов вариатора.

Как было показано в главе 3, частотная программа ускорителя $f(\alpha)$ и его амплитудная программа $U(\alpha)$ связаны между собой определенной зависимостью. Поэтому в идеальном случае для реализованной в новом вариаторе программы $f_R''(\alpha)$ требуется вполне определенная зависимость амплитуды ускоряющего напряжения от угла поворота ротора вариатора. С другой стороны, для каждого значения частоты системы существует предельная величина напряжения в отдельных элементах вариатора, при котором не возникает пробоев и не происходит недопустимого перегрева этих элементов. Зная распределение напряжений по ВЧ-системе синхроциклотрона и исходя из допустимых предельных напряжений в каждом

¹ Ворожцов С. Б. и др. Препринт ОИЯИ Р9-88-472. Дубна, 1988. 8 с.

элементе системы, может быть рассчитана зависимость амплитуды предельного ускоряющего напряжения от частоты $U_{\max}(\alpha)$.

Для формирования оптимальной амплитудной программы, соответствующей реально существующей зависимости для частотной программы $f(\alpha)$, использовался способ оптимизации непосредственно по величине интенсивности выведенного пучка ускорителя¹. Для этого весь интервал частотной кривой $f(\alpha)$ разбивался на 32 угловых интервала. На каждом из этих интервалов амплитуда ВЧ-напряжения оперативно уменьшалась до тех пор, пока это уменьшение не начинало сказываться на интенсивности ускорителя. Минимально возможная величина амплитуды напряжения принималась за оптимальную в этом интервале частот. После такой коррекции амплитудной программы во всем диапазоне частот производилось увеличение амплитуды ускоряющего напряжения во всем цикле ускорения без нарушения формы полученной кривой. Такое увеличение производилось до достижения максимально возможной величины ускоряющего напряжения с одновременным увеличением оборотов вариатора и настройкой на максимум интенсивности. Сформированную таким образом амплитудную программу $U_{\text{opt}}(\alpha)$ можно интерпретировать как оптимальную. Действительно, полученный экспериментально закон изменения $U_{\text{opt}}(\alpha)$ обеспечивает ускорение частиц без дополнительных потерь при любой реально существующей частотной программе $f(\alpha)$, обеспечивая минимум необходимой мощности, подводимой к ВЧ-системе.

Оперативная регулировка формы амплитудной программы ускоряющего напряжения синхроциклотрона производится при помощи манипулятора. Так, например, на синхроциклотроне ЦЕРН использовалась традиционная схема регулирования – стабилизация с аналоговым задатчиком формы напряжения. Частичная регулировка анодной программы была осуществлена на синхроциклотроне ОИЯИ путем подачи импульсного напряжения на сетку проходной лампы на отдельных участках частотной программы^{2, 3}.

На синхроциклотроне ПИЯФ в режиме амплитудной оптимизации манипулятор осуществляет синхронное манипулирование анодного напряжения ВЧ-генератора, включая его на время ускорения T , в течение которого $df/d\alpha < 0$, и одновременно обеспечивает оперативную возможность регулировки закона изменения анодного напряжения методом широтно-импульсной модуляции [6, 7].

¹ *Енчевич И. В. и др.* Препринт ОИЯИ Р9-3805. Дубна, 1968. 12 с.

² *Енчевич И. В., Томилина Т. Н.* // Тр. Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1970. Т. 2. С. 248–253.

³ *Глазов А. А. и др.* Препринт ОИЯИ Р9-12620. Дубна, 1979. 15 с.

Блок-схема устройства приведена на рис. 6.21. Постоянное напряжение от выпрямителя (1) через проходной триод (2) и блок (6) подается к аноду ВЧ-генератора (7) ускоряющей системы синхроциклотрона (8, 9).

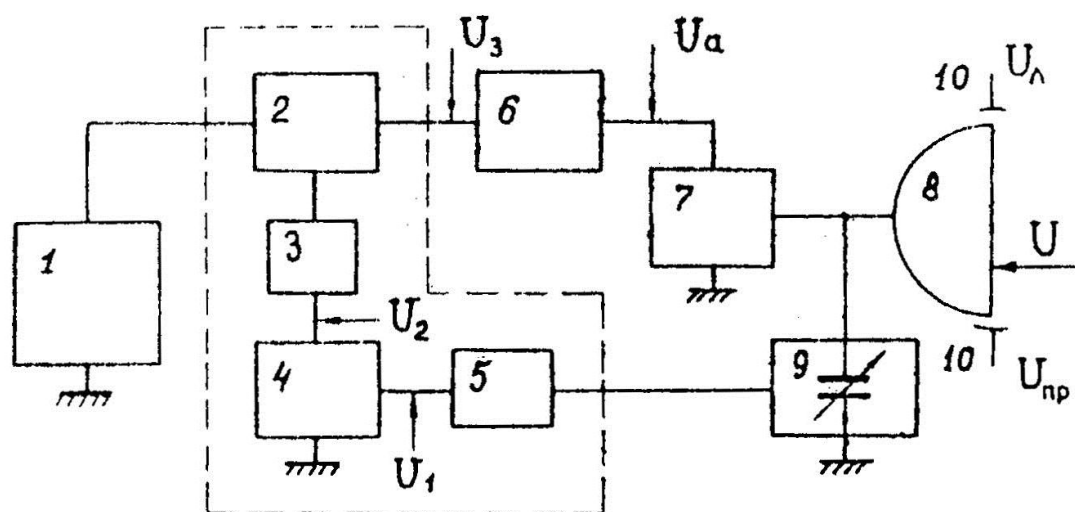


Рис. 6.21. Блок-схема регулировки ускоряющего напряжения:

1 – источник анодного питания – тиристорный выпрямитель; 2 – проходная лампа; 3 – разделительное устройство – оптронный преобразователь; 4 – широтно-импульсный модулятор; 5 – амплитудный модулятор – задатчик формы напряжения; 6 – обратный широтно-импульсный преобразователь – фильтр нижних частот; 7 – генератор синхроциклотрона; 8 – дуант; 9 – вариатор; 10 – измерители напряжения

Для управления работой триода используется модулятор (4), работающий по принципу широтно-импульсной модуляции с амплитудным модулятором (5), являющимся задающим источником формы напряжения. Так как проходная лампа (2) находится под высоким потенциалом, то для развязки его по напряжению от задающего блока используется высоковольтный оптронный преобразователь (3). В целом блоки 2–4 работают как манипулированный широтно-импульсный преобразователь¹.

Основной особенностью предложенного способа регулирования является то, что в режиме широтно-импульсного преобразователя работает сам блок мощного высоковольтного манипулятора анодного питания синхроциклотрона.

Для восстановления на аноде генератора (7) аналогового сигнала U_a из промодулированного широтно-импульсным способом сигнала U_3 служит блок обратного преобразования (6). В качестве такого преобразователя использован фильтр нижних частот, отсекающий паразитные со-

¹ Куликов С. В., Чистяков Б. В. Дискретные преобразователи сигналов на транзисторах. М., 1972. 178 с.

ставляющие сигнала (составляющие с частотой следования тактовых импульсов и их высших гармоник, а также составляющие комбинационных частот) и пропускающий спектр модуляционных частот сигнала U_3 .

Применение принципа широтно-импульсной модуляции для изменения формы анодного напряжения мощного генератора синхротрона выгодно отличается от обычных способов амплитудной модуляции. Действительно, вследствие того что мощность блока проходных ламп соизмерима с мощностью генератора, ключевой режим работы блока проходных ламп, каскады которого работают в режимах насыщения или близких к нему, экономически целесообразен. Дополнительные преимущества вытекают из помехоустойчивости устройства с широтно-импульсной модуляцией, при которой не требуется стабилизации основных и вспомогательных источников питания и источников смещения каскадов блока (2). При этом уменьшается влияние наводок промышленной частоты и магнетронного эффекта накала, присущего мощным усилительным лампам, а также упрощается устройство разделителя (3), т. к. не требуется передачи аналоговой информации.

Использование принципа широтно-импульсного преобразования, охватывающего и мощные каскады манипулятора, позволило применить во всем мощном тракте питания генератора нестабилизированные источники анодного и сеточного напряжений. По этой же причине система для оптимизации амплитудной программы построена по простой схеме непосредственного регулирования без цепи обратной связи для стабилизации ускоряющего напряжения.

В качестве задатчика напряжения (5) для получения любого закона изменения амплитуды этого сигнала в заданном интервале времени использован генератор напряжения ступенчатой формы, осуществляющий аппроксимацию желаемой формы сигнала в виде совокупности 32-х последовательных дискретных ступеней с различными амплитудами. Схема автоматического смещения обеспечивает деление цикла ускорения T всегда на 32 равных временных интервала независимо от скорости вращения вариатора. Таким образом, изменяя амплитуду каждой ступени в отдельности, после соответствующего интегрирования можно воспроизвести аналоговый сигнал практически любой произвольной формы.

В качестве примера на рис. 6.22 приведены огибающие ВЧ-напряжений $U_n(t)$ и $U_{np}(t)$, полученные для измерения ускоряющего напряжения с емкостных делителей, расположенных слева и справа от щели дуанта, при соответствующем анодном напряжении $U_a(t)$ на генераторе. Реальные зависимости напряжений заменены гистограммами, имеющими 32 интервала по диапазону ускорения T в соответствии с числом ступеней регулировки в опорном задающем модуляторе.

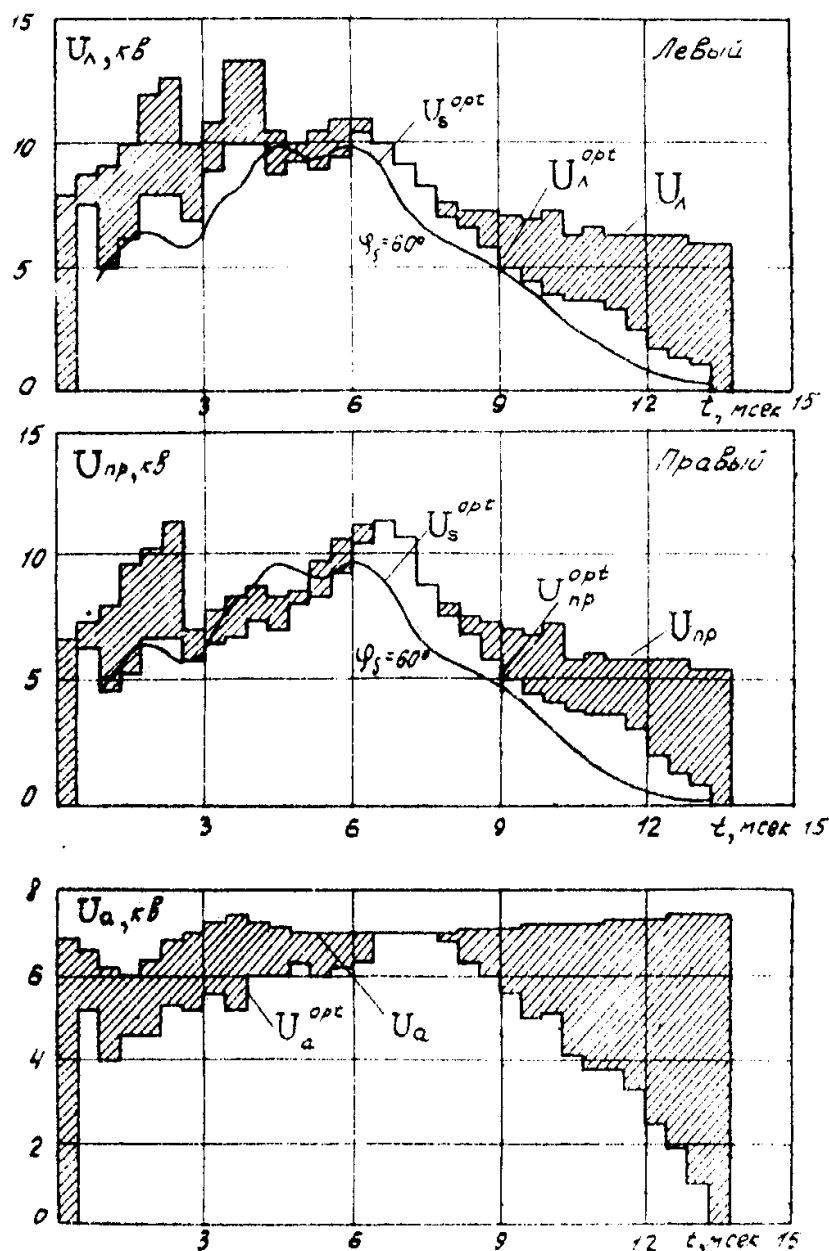


Рис. 6.22. Зависимости напряжений с измерителями амплитуды ускоряющего напряжения дуанта U_{λ} , $U_{\text{пр}}$ и анодного напряжения U_a от времени ускорения

Формы кривых U_{λ} , $U_{\text{пр}}$ соответствуют амплитудной программе при практически постоянном напряжении на аноде генератора U_a (некоторое изменение формы U_a происходит из-за изменения нагрузки ВЧ-системы по диапазону). Форма кривых U_{λ}^{opt} , $U_{\text{пр}}^{\text{opt}}$ соответствует оптимизации амплитудной программы непосредственно по выведенному пучку, полученной вышеописанным методом, а U_a^{opt} – необходимой для этого форме напряжения на аноде генератора. Здесь же для сравнения приведена расчетная зависимость ускоряющего напряжения U_s^{opt} при $\cos \varphi_s = 60^\circ$, соответствующая реальной частотной зависимости $f(\alpha)$.

Выброс амплитуды на начальном участке кривых $U_{л}^{opt}$, $U_{пр.}^{opt}$ обусловлен оптимизацией амплитуды в области частот захвата протонов в режим ускорения из ионного источника.

Таким образом, сравнение соответствующих кривых рис. 6.22 показывает, что введение оптимизации снижает примерно на 30 % величину мощности, рассеиваемой в вариаторах, что повышает надежность эксплуатации ВЧ-системы.

Применение системы регулирования амплитудной программы предоставляет также дополнительные возможности для оперативного определения допустимых пробивных напряжений на отдельных участках кривой, коррекции амплитудной программы в зависимости от «пробивного» состояния ВЧ-системы в периоды ее «тренировки» и эксплуатации, регулировки напряжения в районе захвата и т. п.

К сожалению, система оптимизации амплитудной программы была демонтирована во время модернизации манипулятора анодного питания синхроциклотрона, при переносе его из корпуса 2 в пульттовую корпуса 2а. Желательно, чтобы она была восстановлена.

6.8. Другие усовершенствования высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ

В ходе модернизации ВЧ-системы синхроциклотрона для обеспечения надежности и удобства эксплуатации был разработан ряд новых устройств.

- **Новый источник анодного питания** для генератора дуанта на 10 кВ, 80 А, выполненный по традиционной схеме 6-фазного выпрямителя на полупроводниковых диодах В112-25 с автотрансформаторной регулировкой по входной цепи (старый источник был выполнен на ртутных тиратронах типа ТР-1-40/15).
- **Новый генератор питания дуанта** выполнен на лампе ГУ-65А (вместо двух ламп ГК-5А – по проекту), работающей по схеме с заземленной сеткой. Все емкости: анодный разделительный конденсатор (9 500 пФ), емкостные делители обратной связи (2 700 : 5 400 пФ), регулируемый делитель для С-системы (160 пФ), блокировочные конденсаторы – выполнены в виде полированных латунных пластин с набором тефлоновых прокладок для подбора и изменения величины емкости. Мощность генератора – 500 кВ.
- **Новый манипулятор анодного питания.** Во всех синхроциклотронах между источником питания и генератором ВЧ-системы включен манипулятор анодного напряжения, проходные триоды которого работают как в режиме ключа, так и в режиме регуля-

тора анодного напряжения. Мощность манипулятора соизмерима с мощностью генератора и составляет 130 кВт.

Первоначально на синхроциклотроне ПИЯФ использовался манипулятор анодного напряжения, описанный в работах В. А. Алексеева и др.^{1,2}, выполненный на пяти лампах ГУ-23, работающих в параллель, с высоковольтной трансформаторной развязкой по сеточному входу управления манипулятором. Новый манипулятор выполнен на одной лампе ГУ-68А с высоковольтной оптронной развязкой по входу.

6.9. Система управления синхроциклотроном ПИЯФ (СУФ)

Разработанная нами система управления, синхронизации и контроля за работой ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ (СУФ) [8–10] выполняет следующие основные функции:

1) задает интервалы программы ускорения, управляя работой манипулятора анодного питания генератора ВЧ-системы. Этот интервал манипуляции задается импульсами с фотодатчика угла поворота ротора вариатора и захватывает диапазон частот от 30 до 13 МГц. С помощью вспомогательных синхроимпульсов скважность и период манипуляции можно менять в зависимости от требований режима ускорителя;

2) осуществляет управление и синхронизацию вспомогательных устройств ускорителя: генератора растяжки, генератора сброса, блока импульсной работы ионного источника, работу профилометров, системы защиты от пробоев и т. п.;

3) осуществляет синхронизацию всего комплекса физической аппаратуры, требующей совместной работы с ускорителем;

4) контролирует работу всех устройств ВЧ-системы ускорителя.

СУФ вырабатывает большое число стандартизованных синхроимпульсов с контролируемой привязкой к любому мгновенному значению частоты ускоряющего напряжения, т. е. к энергии ускоряемого пучка с точностью 10^{-3} . Функциональные возможности СУФ позволяют получить различные режимы работы ускорителя: режим накопления, режим поочередной работы на внутреннюю и наружную мишени, имеется возможность реализации режима с пересчетом циклов ускорения (пропуск циклов в любой очередности), а также могут осуществляться внешнее разрешение и запреты на любое число циклов или интервал времени работы ускорителя.

В режиме стабилизации дозы получения профилей протонного пучка и в некоторых других режимах работы ускорителя включение и отклю-

¹ Алексеев В. А. и др. // Тр. Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1968. С. 132.

² Алексеев В. А. и др. // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 811. С. 2459–2462.

чение пучка производится за счет «обрезания» начала частотной программы, предотвращающей захват протонов в режим ускорения без снятия анодного напряжения с ускоряющей системы.

Некоторые блоки и режимы работы СУФ адаптированы к автоматическому режиму работы с управлением от персонального компьютера.

СУФ конструктивно и функционально состоит из отдельных блоков, для обозначения которых приняты следующие аббревиатуры:

БИК – большая ионизационная камера;

БСА – блок стабилизации амплитуды ВЧ;

БСИ – блок стабилизации интенсивности;

ГИПИМО – генератор импульсного пилообразного тока – предварительный модулятор;

ГР – генератор растяжки;

ИПФЭ – источник питания фокусирующего электрода;

ИСВ – источник смещения на вариаторе;

ИСД – источник смещения на дуанте;

ЛЗ – линии задержки ВЧ;

ЛКР – логический коммутатор режимов;

МСФ – анодный манипулятор;

МОД – оконечный модулятор генератора растяжки;

ПИ – пересчет импульсов;

ПИФ – блок привязки к фазе ВЧ;

СЕЛ – частотный селектор;

СУФ – система управления синхроциклотроном (фазотроном);

УД – угловые датчики;

Уп. ЛЗ – управление линиями задержки ВЧ;

ФИ – формирователь импульсов;

ФЭ – фокусирующий электрод;

Σ – сумматор.

Остановимся на кратком описании отдельных блоков СУФ и режимов работы синхроциклотрона.

Блоки общего назначения

Блок «Угловые датчики» – УД

Предназначен для синхронизации периодов манипуляции ускоряющего ВЧ-напряжения с оборотами вариатора. УД установлены на промежуточном валу вариатора и состоят из датчиков «Пуск» и «Стоп», задающих интервалы программы ускорения и управляющих работой манипулятора анодного питания генератора ВЧ-системы. Оба датчика выполнены на электронных лампах 6Н16Б, т. к. находятся в активной зоне

синхроциклотрона. Выходные сигналы с датчиков, именуемые в дальнейшем «Пуск» и «Стоп», по кабельным линиям поступают на СУФ.

Блок «Формирователь импульсов» – ФИ-4

Предназначен для формирования из входных сигналов угловых датчиков нормированных сигналов уровня ТТЛ длительностью ≈ 10 мс, которые используются во всех блоках СУФ. В блоке ФИ-4 предусмотрена возможность организации режима «Проверка» с фиксированной частотой 25 или 50 Гц. Режим «Проверка» используется для наладки и проверки работы СУФ при отключенном вариаторе.

Блок «Перерасчет импульсов» – ПИ-2

Предназначен для изменения частоты следования манипуляционных циклов ускорения от 50 до 0,5 Гц с шагом 0,5 Гц. Основной режим работы синхроциклотрона – вывод протонного пучка с частотой 50 Гц. В отдельных случаях необходим режим работы синхроциклотрона с пониженной частотой вывода. Для этого необходимо, чтобы частота следования импульсов «Пуск» и «Стоп» могла дискретно изменяться. Эту функцию выполняет блок ПИ-2, имеющий коэффициент деления частоты следования пусковых и стоповых импульсов от 1 до 100.

Блок «Коммутатор „Растяжка“» – ЛКР

Это электронный коммутатор сигналов селекторов для организации таких режимов синхроциклотрона, как растяжка пучка и нейтронный генератор ГНЕЙС. Наличие этого блока позволяет исключить переключение ВЧ-кабелей при смене режимов синхроциклотрона.

Блок «Сумматор» – Σ

В этом блоке собираются основные сигналы управления, такие как «Пуск» и «Стоп», а также дополнительные сигналы от систем защиты от пробоев дуанта и вариатора: при работе профилометров, системы стабилизации интенсивности пучка и др. Выходной сигнал блока непосредственно управляет МСФ и, следовательно, ускоряющим ВЧ-напряжением. Предусмотрена возможность внешнего управления выходным сигналом блока, при этом синхронизация с оборотами вариатора сохраняется.

Блок «Частотный селектор» – СЕЛ

Предназначен для получения частотной отметки (в виде импульса на осциллографе) на определенной мгновенной частоте программы ускоряющего ВЧ-напряжения $f(t)$.

Четыре блока селекторов, работающих на разных участках частотной программы, предназначены для синхронизации работы отдельных устройств с ВЧ-программой синхроциклотрона: ионного источника, системы растяжки пучка, системы ГНЕЙС и т. п., а также для измерения мгновенного значения частоты при их работе.

Основные режимы работы синхроциклотрона ПИЯФ

Управление системой растяжки пучка

Сюда входят блоки СЕЛ, МОД, Уп. ЛЗ, ГИПИМО, источник питания с $I_{\max} = 12$ А. Все эти блоки входят в СУФ и расположены на пульте управления синхроциклотрона, в корпусе 2а.

СЕЛ осуществляет привязку включения ГР к необходимой частоте основного ускоряющего ВЧ-напряжения (~ 30 МГц). Уп. ЛЗ позволяют дискретно управлять синхронизацией ВЧ-напряжения ГР с основным ВЧ-напряжением, а также осуществлять синхронизацию с частотой пучка. Изменение частоты ГР осуществляется изменением тока подмагничивания ферритовых вариаторов, расположенных непосредственно в ГР. Диапазон перестройки ГР – 13,4–13,28 МГц. Функцию управления законом изменения частоты ГР выполняет ГИПИМО. Результирующая форма тока в ферритовых вариаторах – пилообразная. Длительность импульса тока до 12 мс регулируется, и тем самым изменяется длительность растянутого пучка. Для уменьшения рассеиваемой мощности в линии питания С-электрода ГР работает в импульсном режиме (~ 50 Гц) со скважностью ~ 2 . Для этого на управляющие сетки ламп из блока МОД подается отрицательное смещение прямоугольной формы 200 В. Подробно система описана в главе 7, п. 7.1.

Управление системой однооборотного сброса пучка протонов на мишень ГНЕЙС

Система управления высоковольтным импульсным (амплитуда ~ 100 кВ) генератором ГНЕЙС состоит из блоков СЕЛ и ПИФ. Для осуществления однооборотного сброса пучка протонов на мишень необходимо включить высоковольтный импульсный генератор в момент нахождения пучка на определенном радиусе и определенном азимуте С-электрода. Функцию привязки к радиусу выполняет блок СЕЛ ($f \approx 13,47$ МГц), а к азимуту – блок ПИФ. Оба блока имеют плавную ре-

гулировку по частоте (радиусу) и по фазе (азимуту). Подробно система описана в главе 7, п. 7.2.

Управление системой фокусировки

Трехэлектродная схема электростатической фокусировки ионного источника требует подачи на центральный ФЭ большого положительного потенциала (до 25 кВ). Для ограничения развития разряда Пеннинга, уменьшения мощности источника и нагрева электрода используется импульсный источник с длительностью импульса ≈ 1 мс. Для синхронизации источника питания с основной ВЧ-программой применяется СЕЛ ФЭ, работающий в диапазоне 30–29 МГц, а для оперативной корректировки формы частотной программы $df/d\alpha$ (в области захвата) используются дистанционно управляемые триммерные конденсаторы, подключенные к задней части дуанта. Оптимальное значение $F_{\max} = 29,67$ МГц. При этом $dF_{\max}/dt = 0$. Подробно система фокусировки описана в главе 7, п. 7.3.

Стабилизация интенсивности протонного пучка

Стабилизация интенсивности осуществляется методом интерполяции. В блоке БСИ импульсный ток с БИК интегрируется и сравнивается с опорным током. В зависимости от результата сравнения последующий (или последующие) цикл ускорения протонов пропускается или нет. Пропуск цикла ускорения осуществляется за счет «обрезания» частотной программы в области захвата протонов 30–29 МГц.

Такой режим работы используется при облучении больных для стабилизации дозы облучения, получаемой пациентом.

Перечислим основные изменения и усовершенствования ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона по сравнению с первоначальным проектом.

1. Предложена и введена в эксплуатацию принципиально новая симметричная система связи генератора с ускоряющей системой синхроциклотрона. Получено авторское свидетельство на изобретение.

2. Сконструирован и изготовлен в мастерских ПИЯФ новый вариатор частоты с новой геометрией лопаток ротора, боковыми дисками заземления ротора по высокой частоте, новой конструкцией П-образного крепления индуктивных пакетов и новой конструкцией блокировочного конденсатора.

3. Разработан и изготовлен новый генератор питания ускоряющей системы на новых конструктивных элементах и радиолампах.

4. Разработан и изготовлен новый источник анодного питания для генератора ускоряющей системы с заменой ртутных тиратронов на полупроводниковые тиристоры.

5. Разработан и изготовлен принципиально новый манипулятор анодного питания с переносом его из активной зоны в электрощитовое помещение пульта управления синхроциклотрона.

6. Разработана система дистанционного контроля за механическими смещениями ротора вариатора и деформацией его лопаток из-за их нагрева в процессе эксплуатации.

7. Создана автоматическая система контроля и предотвращения РВР и пробоев в вариаторе и дуанте.

8. Скорректирована форма частотной программы ускоряющего напряжения на дуанте, в частности введена регулировка производной программы df/da в диапазоне частот захвата, что привело к значительному увеличению интенсивности синхроциклотрона.

9. Разработана оригинальная система регулировки и оптимизации формы амплитуды ускоряющего ВЧ-напряжения на дуанте, что позволило оптимизировать процесс ускорения и уменьшить потери ВЧ-мощности в системе. Получено авторское свидетельство на изобретение.

10. Полностью разработана и введена в эксплуатацию система контроля и управления всеми подсистемами ВЧ ускоряющей системы – СУФ.

После проведения программы модернизации время работы ускорителя на физический эксперимент достигало 6 000 часов в год при одной основной ревизии вариатора частоты (в основном замена подшипников) и одной профилактической ревизии.

Публикации

1. *Абросимов Н. К., Волченков В. А., Елисеев В. А., Рябов Г. А., Чернов Н. Н.* Эффективный вывод протонного пучка синхроциклотрона на 1 ГэВ ФТИ СССР // ЖТФ. 1970. Т. 40. С. 2593–2596.
2. *Абросимов Н. К., Волченков В. А., Елисеев В. А., Рябов Г. А., Чернов Н. Н.* Вывод протонного пучка синхроциклотрона ФТИ им. А. Ф. Иоффе на энергию протонов 1 ГэВ // Тр. II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1972. Т. 2. С. 182–184.
3. *Абросимов Н. К., Рябов Г. А.* Эффективность регенеративного вывода пучка из синхроциклотрона // Тр. IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1975. Т. 1. С. 250–253.
4. *Abrossimov N. K., Eliseev V. A., Volchenkov V. A., Riabov G. A., Chernov N. N.* A 30 % Beam Extraction on the 1 GeV Synchrocyclotron at Gatchina // NIM. 1975. V. 126. P. 221–230.

5. **Абросимов Н. К., Волков В. К., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Чернов Н. Н.** Конструкция вариаторов частоты ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР // Отчет ЛИЯФ № 52. Гатчина: ЛФТУ, 1971. 12 с.
6. **Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Покровский А. С.** Оптимизация амплитудной программы синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР. Препринт ЛИЯФ 488. Л., 1979. 17 с.
7. Устройство для регулирования и оптимизации амплитудной программы ускоряющего напряжения синхроциклотрона: а. с. № 475948 с приоритетом от 17.03.1973 / **Н. К. Абросимов, А. В. Куликов, Г. Ф. Михеев.** Бюл. № 27, 1973. С. 227.
8. **Девятериков Р. П., Куликов А. В., Лавров В. В., Михеев Г. Ф.** Система управления синхроциклотрона ФТИ АН СССР // Тр. II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1972. Т. II. С. 234–236.
9. **Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Герасимов А. М.** Информационно-измерительная система синхроциклотрона на 1 ГэВ ЛИЯФ АН СССР // Тр. I Всесоюзного совещания по автоматизации исследований в ядерной физике. Киев, 1976. С. 108–112.
10. **Герасимов А. М., Куликов А. В., Михеев Г. Ф.** Автоматизированная система управления синхроциклотрона // Управляемые системы и машины. Киев, 1978. Вып. 1. С. 116–119.

Глава 7

Разработка и создание новых систем для комплекса синхроциклотрона ПИЯФ

7.1. Система увеличения длительности импульса протонного пучка синхроциклотрона ПИЯФ (система временной растяжки)

Одним из важных параметров ускоряемого пучка синхроциклотрона является его временная структура. Пучок имеет микроструктуру, обусловленную частотой обращения ускоряемых протонов в магнитном поле ускорителя, и макроструктуру, обусловленную импульсным характером работы синхроциклотрона. Физические исследования, проводимые на пучках синхроциклотрона, предъявляют различные требования к временной структуре протонных пучков и пучков вторичных частиц. Так, для экспериментов, в которых используется электронная регистрирующая аппаратура, необходимы практически непрерывные во времени, не имеющие импульсной структуры пучки. В экспериментах по измерению времени жизни короткоживущих частиц, таких как π - и K -мезоны [1], необходимы растянутые во времени пучки, имеющие малую длительность импульсов микроструктуры. В экспериментах с использованием для измерения энергии частиц методики времени пролета [2] необходимы импульсные пучки, у которых вся интенсивность сконцентрирована в одном импульсе микроструктуры.

Для обеспечения преобразований временной структуры пучков в районе выводного радиуса синхроциклотрона ПИЯФ был установлен так называемый *S*-электрод. В отличие от обычно используемой на других синхроциклотронах конструкции *S*-электрода на синхроциклотроне ПИЯФ используется предложенная в нашем институте конструкция *S*-электрода с удаленной боковой стенкой. Такая конструкция позволяет использовать один и тот же электрод как для временной растяжки пучка, так и для однооборотного сброса пучка на внутреннюю нейтронообразу-

ющую мишень. В первом случае обе пластины запитываются синфазно от одного и того же ВЧ-генератора, во втором случае пластины запитываются импульсами высокого напряжения, находящимися в противофазе. С-электрод может быть использован также для временной растяжки внутреннего пучка за счет резонансной раскачки вертикальных бетатронных колебаний.

При обычном режиме работы синхроциклотрона ускоренный протонный пучок, поступающий на внутреннюю мишень или в выводную систему, носит импульсный характер. Для характеристики временной структуры пучка синхроциклотрона вводят коэффициент заполнения m (duty factor), определяемый как отношение длительности макроимпульса пучка Δt к периоду их следования (периоду модуляции T_M):

$$m = \frac{\Delta t}{T_M}.$$

У всех синхроциклотронов величина m лежит в пределах 1–5 %. Так, например, для синхроциклотрона ПИЯФ длительность макроимпульса выведенного протонного пучка Δt составляет ~ 300 мкс, а период модуляции $T_M \approx 20$ мс, что соответствует коэффициенту временного заполнения пучка $m = 1,5$ %. Такая малая величина m бывает неприемлема для большинства физических экспериментов, проводимых на протонных и вторичных пучках. Так, при использовании электронной регистрирующей аппаратуры возникает проблема, связанная с наличием мертвого времени детекторов и электронных регистрирующих устройств. При регистрации частиц детектором с мертвым временем τ исходный поток частиц превращается в разреженный поток, в котором временные интервалы между частицами не могут быть меньше τ , что приводит к потере части регистрируемых частиц и искажению формы измеряемых временных распределений¹. Эта проблема усиливается с увеличением интенсивности регистрируемых пучков, поэтому желательно, чтобы протоны и вторичные частицы поступали на мишень не импульсно, а непрерывно, как это имеет место, например, в циклотронах, в которых $m = 100$ %. В связи с этим практически на всех синхроциклотронах используются специальные системы временной растяжки пучка, которые преобразуют ускоряемые сгустки (банчи) протонов в непрерывную, или почти непрерывную, последовательность протонов, поступающих на внутреннюю или внешнюю мишень.

Обзор существующих методов временной растяжки пучка в синхроциклотронах дан в работе Л. М. Онищенко², где подробно рассмотрены

¹ Калашикова В. И., Козодоев М. С. Детекторы элементарных частиц. М., 1966. 253 с.

² Онищенко Л. М. Препринт ОИЯИ Р9-7836. Дубна, 1974. 27 с.

возможные способы временной растяжки пучка в синхроциклотроне, которые включают в себя метод бетатронного ускорения, методы радиального и вертикального отклонений пучка за счет воздействия на него магнитным или электрическим полем, метод растяжки на подвижной (вибрирующей) мишени, медленное «доускорение» пучка с помощью С-электрода и другие.

Исторически первым вариантом системы временной растяжки пучка для внутренней мишени, который мы рассматривали при сооружении синхроциклотрона ПИЯФ, могут служить так называемые катушки Данилова – Кима. С помощью этих катушек, устанавливаемых на верхнем и нижнем полюсах магнита, на последних радиусах в зоне вывода пучка создается первая гармоника вертикальной составляющей магнитного поля $B^{(1)}(t)$ с изменяющейся во времени амплитудой. Под воздействием этой гармоники орбита сгустка пучка может быть сдвинута по радиусу на величину

$$x = \frac{rB^{(1)}}{nB_0}.$$

Пучок ускоряется до конечного радиуса r_k , соответствующего конечной энергии W_k , и затем, за счет медленного увеличения амплитуды первой гармоники, наводится на мишень, расположенную на радиусе $R_M = r_k + A_{\text{бет.}} + A_{\text{син.}}$, где $A_{\text{бет.}}$ и $A_{\text{син.}}$ – максимальные амплитуды радиальных бетатронных и синхротронных колебаний пучка. Особенностью такой системы является исчезновение в пучке, взаимодействующем с мишенью, микроструктуры, обусловленной резонансным способом ускорения пучка с частотой, равной частоте обращения пучка. Серьезным недостатком является невозможность использования подобной системы для выводимого из камеры протонного пучка, т. к., с одной стороны, трудно одновременно разместить в камере магнитный канал и катушки, а с другой – введение первой гармоники магнитного поля может привести к нарушению регенеративного процесса вывода. Система катушек Данилова – Кима первоначально использовалась для растяжки пучка, направляемого на внутреннюю мезонообразующую мишень, на синхроциклотронах ЦЕРН¹ и ОИЯИ².

В связи с созданием на синхроциклотроне ПИЯФ эффективной системы вывода пучка из ускорительной камеры с коэффициентом вывода 30 % оказалось более выгодным отказаться от внутренних мишеней для получения пучков π -мезонов и полностью перейти на внешние мезонообразующие мишени. Поэтому основным требованием к выбору

¹ *Susini A. et al. // CERN. MSC/PR/2814/. 7 apr. 1972. 17 p.*

² *Данилов В. И. и др. // Атомная энергия. 1965. Т. 19. Вып. 3. С. 289–292.*

метода временной растяжки пучка на синхроциклотроне ПИЯФ стала его применимость к растяжке выведенного протонного пучка.

В настоящее время основным способом временной растяжки пучка в синхроциклотронах, одинаково применимым как к внутреннему, так и к выведенному протонному пучку, является способ медленного синхроциклотронного доускорения пучка перед его поступлением на внутреннюю мишень или в выводную систему при помощи дополнительного ускоряющего *C*-электрода^{1,2}. Такие системы *C*-растяжки в их разных модификациях использовались (или используются) практически на всех синхроциклотронах мира.

Требования к системе растяжки пучка с помощью *C*-электрода

Схема работы системы временной растяжки пучка с помощью *C*-электрода такова. Ускоряемый сгусток протонного пучка с помощью основного дуанта ускоряется до энергии $W = W_k - \Delta W$, соответствующей радиусу $r = r_k - (A_{\text{бет.}} - A_{\text{син.}})$. Здесь

$$\Delta W = \left[(1-n) \left(1 - \frac{E_0^2}{(E_0 + W_k)^2} \right) \right] \frac{(E_0 + W_k)}{r_k} (A_{\text{бет.}} + A_{\text{син.}}), \quad (7.1)$$

$A_{\text{бет.}}$ в синхроциклотроне с открытым ионным источником определяется начальными условиями захвата, $A_{\text{син.}}$ – максимальным энергетическим разбросом ускоряемых частиц в сепаратрисе:

$$\Delta E_{\text{max}} = \pm 2 \sqrt{\frac{e V E_s}{\pi K} (\sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s)}. \quad (7.2)$$

Соответствующая ему амплитуда радиальных колебаний

$$A_{\text{син.}} = \frac{r}{(1-n)\beta^2} \frac{\Delta E_{\text{max}}}{E}.$$

Для синхроциклотрона ПИЯФ максимальная амплитуда бетатронных колебаний $A_{\text{бет.}}$ равна 8 см, а вычисленная по формуле (7.1) максимальная амплитуда синхротронных колебаний $A_{\text{син.}}$ при амплитуде напряжения на дуанте $V = 10$ кВ равна 0,6 см.

После ускорения сгустка до энергии W основной генератор, питающий дуант, выключается, и дальнейшее медленное ускорение осуществляется уже за счет *C*-электрода. Время взаимодействия пучка с мишенью, или время вывода пучка с помощью выводной системы,

¹ *Huxtable G., Rogers P. S., Russell F. M. // NIM. 1963. V. 23, No. 2. P. 357–358.*

² *Глазов А. А. и др. Препринт ОИЯИ Р9-87-171. Дубна, 1987. 13 с.*

$$\Delta t_c = \frac{\Delta W T_{\text{обр.}}}{2e V_c \sin \frac{\varphi}{2} \cos (\varphi_s)_c},$$

где V_c и $(\varphi_s)_c$ – амплитуда ускоряющего напряжения и равновесная фаза S -электрода, а φ – его угловая протяженность. «Медленность» темпа ускорения с помощью S -электрода и, следовательно, увеличение Δt_c могут быть обеспечены либо за счет уменьшения по сравнению с основным дуантом амплитуды ускоряющего напряжения на S -электроде V_c , либо за счет уменьшения $\cos (\varphi_s)_c$, либо за счет одновременного уменьшения того и другого.

Частота ускоряющего напряжения, при которой происходит переход от ускорения основным дуантом к ускорению S -электродом,

$$f_{\text{пер.}} = \frac{e c B(R)}{2\pi (E_0 + W_k - \Delta W)}.$$

Ширина диапазона частот (девиация частоты) S -электрода

$$\Delta f = f_{\text{пер.}} - f_k.$$

Основная проблема, связанная с созданием такой системы временной растяжки пучка, состоит в переходе от одного режима ускорения к другому без потерь ускоряемых частиц. Для этого необходимо, чтобы фазовый объем пучка, ускоряемого основным дуантом, при переходе попал внутрь сепаратрисы S -электрода. Обычно уменьшение темпа набора энергии с помощью S -электрода осуществляется за счет выбора малой величины $\cos (\varphi_s)_c$ ¹. В этом случае при переходе к режиму ускорения с помощью S -электрода равновесная фаза частицы должна измениться скачком от значения $(\varphi_s)_{\text{дуанта}}$ к значению $(\varphi_s)_c$. Скачкообразное изменение равновесной фазы приведет к возбуждению синхротронных колебаний как по фазе, так и по энергии, что, в свою очередь, для обеспечения перехода от одного режима к другому без потерь потребует увеличения амплитуды ускоряющего напряжения на S -электроде. При этом пропорционально квадрату амплитуды ускоряющего напряжения увеличивается и мощность генератора S -электрода.

Снижение напряжения и мощности генератора S -электрода можно достичь при переходе к режиму многократного синхроциклотронного доускорения, при котором остановленный на радиусе $r = r_k - (A_{\text{бет.}} - A_{\text{син.}})$ пучок перезахватывается в S -электрод не один раз, а многократно. Частотная программа S -электрода при таком режиме имеет вид свипирующей

¹ Онищенко Л. М. Фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля. Дис. ... д. ф.-м. н. Дубна, 1995. 63 с.

щего сигнала с девиацией Δf_c , период модуляции которого в 10–50 раз меньше T_m . При таком режиме амплитуда на C -электроде уменьшается в несколько раз. Однако снижается и эффективность растяжки. Такие системы использовались на синхроциклотронах в Орсе¹, Чикаго², ЦЕРН³.

Отметим способ растяжки, основанный на принципе стохастического доускорения⁴, при котором напряжение на C -электроде изменяется случайным образом, а также способ фазового смещения, механизм которого описан А. А. Коломенским и А. Н. Лебедевым, при котором частота ускоряющего напряжения на C -электроде модулируется в направлении не уменьшения, а увеличения частоты $\frac{df_c}{dt} > 0$. По данным, приведенным в работе Линдбака⁵, эффективность такого режима соизмерима с режимом многократного синхроциклотронного «доускорения», ~ 30–50 %.

При разработке системы временной растяжки пучка для синхроциклотрона ПИЯФ с целью уменьшения набора энергии за оборот мы пошли по пути уменьшения амплитуды ускоряющего напряжения C -электрода. В этом случае переход можно осуществить при равенстве равновесной фазы C -электрода и основного дуанта

$$(\varphi_s)_c = (\varphi_s)_{\text{дуанта}}. \quad (7.3)$$

Такой переход уже не вызовет дополнительной раскачки радиально-фазовых колебаний частиц пучка. При этом необходимо обратить внимание на то обстоятельство, что из-за затухания фазовых колебаний частиц пучка в процессе ускорения от начальной до конечной энергии размер фазового объема пучка может оказаться существенно меньше размера сепаратрисы основного дуанта. В этом случае условием перехода от одного режима ускорения к другому без потерь является равенство энергетического размера сепаратрисы C -электрода энергетическому размеру фазового объема пучка в конце цикла ускорения. В таком случае необходимое ускоряющее напряжение C -электрода может оказаться значительно ниже.

Внутри сепаратрисы основного дуанта фазовая траектория, охватывающая фазовый объем пучка, определяется точками поворота траектории φ_{\min} и φ_{\max} , которые связаны между собой условием

$$\sin \varphi_{\max} - \sin \varphi_{\min} - (\varphi_{\max} - \varphi_{\min}) \cos \varphi_s = 0. \quad (7.4)$$

¹ Cabrespine A. // Comptes Rendus. 1960. V. 250, No. 14. P. 2544; J. Phys. et Radium. 1960. V. 215. P. 332.

² Molthen E. H. // NIM. 1964. V. 29. P. 29.

³ Levy Ph. // CERN Int. Rep. MSC-71-1. Febr. 1971. P. 17.

⁴ Celler R. and Scmitter K. H. // CERN Int. Rep. 58-13. 1958. P. 15.

⁵ Lindbak S. // CERN Int. Rep. MSC-71-1. Febr. 1971. P. 23.

Равновесная фаза φ_s может быть найдена из выражения

$$\cos \varphi_s = -\frac{3E_s N}{eVK} \frac{1}{f_s^2} \left(\frac{df_s}{d\alpha} \right)_{\text{дуанта}}.$$

Задавая φ_{\min} , можно из условия (7.4) определить φ_{\max} и затем размеры фазового объема пучка по координатам φ и E , которые определяются как

$$\Delta\varphi = \varphi_{\max} - \varphi_{\min};$$

$$(\Delta E_{\max})_{\text{фаз.}} = \pm \sqrt{\frac{2eVE_s}{\pi K} [\sin \varphi_s - \sin \varphi_{\min} - (\varphi_s - \varphi_{\min}) \cos \varphi_s]}.$$

Разброс по фазам в ускоренном пучке связан с длительностью импульса микроструктуры пучка соотношением

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta t_{\min}}{T_{\text{обр.}}}$$

Находя $\Delta\varphi$ из измерений длительности импульсов микроструктуры пучка и полагая приближенно $\varphi_{\min} \cong \varphi_s - \frac{\Delta\varphi}{2}$, можно определить величину разброса по энергии в фазовом объеме пучка $(\Delta E_{\max})_{\text{фаз.}}$ и, приравнивая ее к величине разброса по энергии в сепаратрисе C -электрода (7.2), определить минимальную величину необходимого напряжения на C -электроде:

$$(V_c)_{\min} = \frac{V [\sin (\varphi_s)_c - \sin \varphi_{\min} - [(\varphi_s)_c - \varphi_{\min}] \cos (\varphi_s)_c]}{2 [\sin (\varphi_s)_c - (\varphi_s)_c \cos (\varphi_s)_c] \sin \frac{\varphi}{2}}. \quad (7.5)$$

Здесь $(\varphi_s)_c$ – равновесная фаза C -электрода, определяемая выражением

$$\cos (\varphi_s)_c = -\frac{E_s}{2eV_c K \sin \frac{\varphi}{2}} \frac{1}{f_s^2} \left(\frac{df_s}{dt} \right)_c.$$

Таким образом, для того чтобы обеспечить переход от ускорения основным дуантом к ускорению с помощью C -электрода без потерь пучка, нужно при переходе «посадить» сепаратрису C -электрода на фазовый объем пучка. Этого можно достичь, если за счет введения синхронизации между частотой и фазой напряжения на основном дуанте и напряжения на C -электроде будет обеспечено равенство равновесной фазы C -электрода и равновесной фазы основного дуанта. При этом напряжение на C -электроде должно быть больше минимального, определенного выражением (7.5), $V_c > (V_c)_{\min}$.

Кинетическую энергию перехода от ускорения основным дуантом к ускорению с помощью C -электрода мы выбрали равной 970 МэВ. Это

соответствует радиусу орбиты протонов 310 см и частоте ускоряющего напряжения в момент перехода 13,4 МГц.

По данным, приведенным в главе 3, в конце цикла ускорения величина производной частотной программы основного дуанта равна 0,15 МГц/град. Отсюда в соответствии с формулой (7.4) при амплитуде ускоряющего напряжения 10 кВ равновесная фаза основного дуанта оказывается равной 1,3 рад. Измеренная длительность импульса микроструктуры пучка при этом составляет около 10 нс, и, следовательно, разброс фаз в ускоренном пучке составляет 0,8 рад. Отсюда в соответствии с формулой (7.5) необходимая минимальная амплитуда ускоряющего напряжения на *C*-электроде оказывается равной 0,6 кВ.

Исходя из этих условий, в ПИЯФ была реализована принципиально новая модификация способа временной растяжки пучка при помощи *C*-электрода [3–7], основные преимущества которого:

- 100%-ный перезахват ускоряемых частиц из режима ускорения основным дуантом в режим ускорения *C*-электродом;
- малая величина ускоряющего напряжения на *C*-электроде;
- малая мощность генератора *C*-системы за счет введения ферритового вариатора.

Конструкция и блок-схема системы временной растяжки пучка с помощью *C*-электрода синхроциклотрона ПИЯФ

Конструкция *C*-электрода синхроциклотрона ПИЯФ изображена на рис. 7.1. *C*-электрод состоит из двух дугообразных пластин с угловой протяженностью 60° и шириной 25 см. Внутренний радиус пластин – 304 см, наружный – 329 см. В отличие от обычно используемой формы *C*-электрода, в которой обе пластины соединены между собой задней вертикальной стенкой, в нашем случае эта стенка удалена, что обеспечило возможность использовать пластины *C*-электрода также и в качестве вертикального дефлектора. Каждая пластина в отдельности установлена внутри камеры на трех штоках. Боковые штоки представляют собой керамические изоляторы. Центральные штоки служат для подачи напряжения на *C*-электрод и проходят сквозь стенки вакуумной камеры через керамические изоляторы, заполненные инертным газом. Конструкция крепления *C*-электрода позволяет регулировать радиальное и вертикальное положение пластин без нарушения вакуума в камере. Возможное перемещение пластин в радиальном направлении составляет 40 см, а расстояние между пластинами может изменяться от 6 до 18 см. Регулирующие элементы снабжены указателями положения пластин (6, рис. 7.1). Конструкция изоляторов *C*-электрода обеспечивает его работу также

и в режиме вертикального дефлектора при импульсном напряжении на пластинах до 100 кВ.

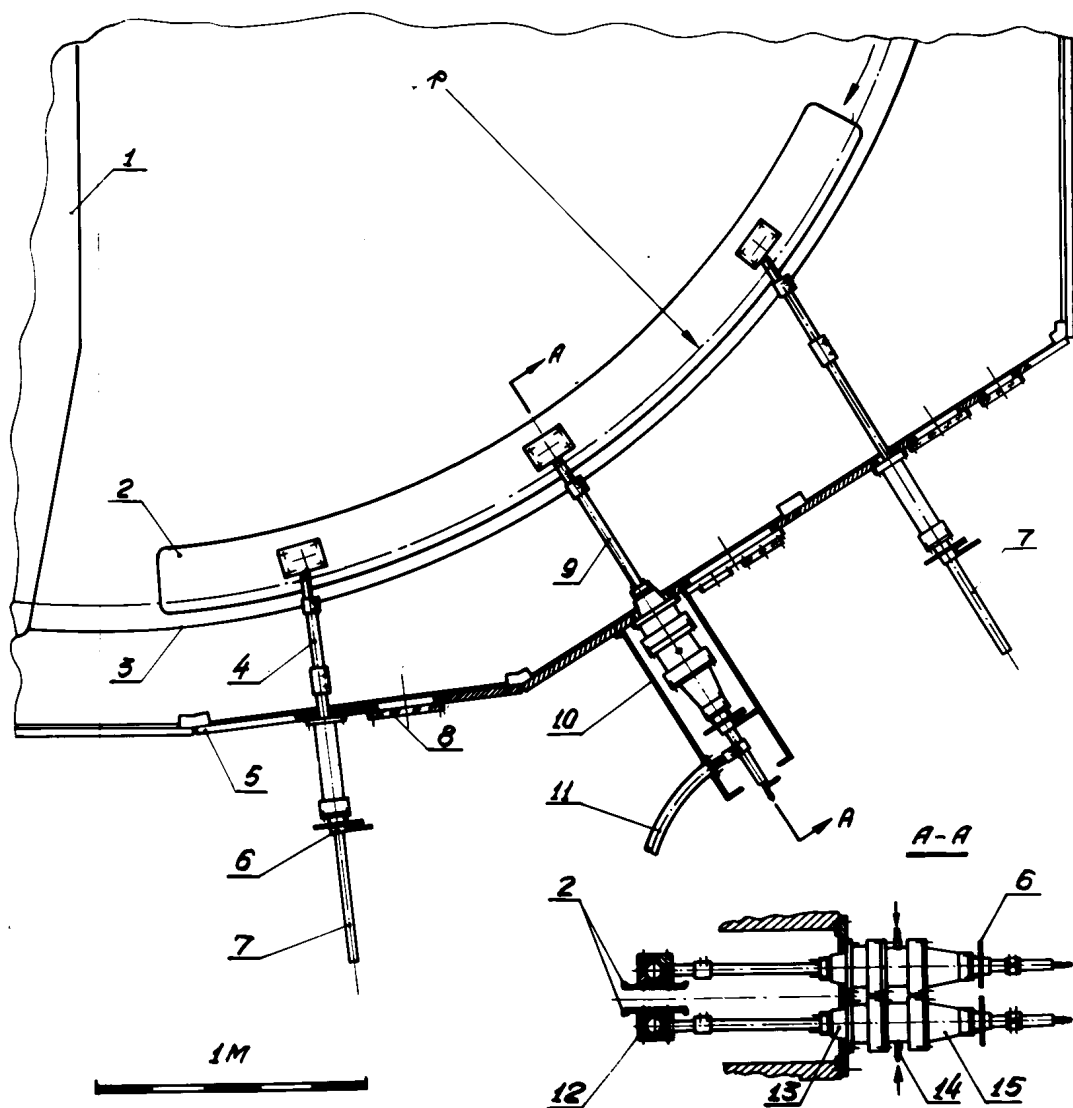


Рис. 7.1. Конструкция и размещение *S*-электрода в камере ускорителя:
 1 – дуант; 2 – пластины *S*-электрода; 3 – край полюса электромагнита;
 4 – керамические изоляторы; 5 – стенки вакуумной камеры; 6 – указатели положения пластин; 7 – штоки-держатели; 8 – смотровые окна;
 9 – штоки-вводы; 10 – защитный кожух; 11 – кабели фидерных линий;
 12 – шарниры крепления пластин; 13 – внутренние изоляторы;
 14 – штуцера подачи газа; 15 – наружные изоляторы

Блок-схема системы временной растяжки пучка синхроциклотрона ПИЯФ представлена на рис. 7.2.

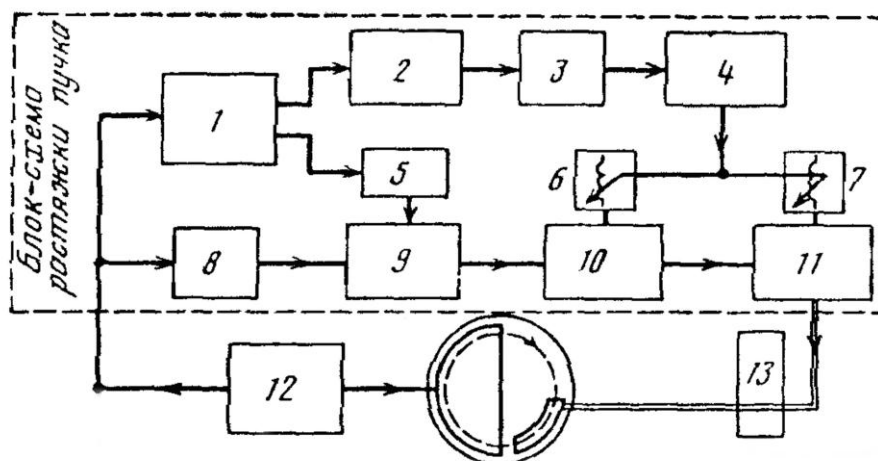


Рис. 7.2. Блок-схема системы временной растяжки пучка:

1 – блок частотных отметок; 2 – формирователь импульса тока; 3 – интегратор; 4 – усилитель тока; 5 – формирователь сигнала от основного генератора; 6, 7 – ферритовые вариаторы; 8 – линия задержки; 9 – управление синхронизацией; 10 – задающий генератор; 11 – усилитель мощности; 12 – ВЧ-генератор; 13 – импульсный ферритовый трансформатор системы вертикального отклонения пучка

Каждая пластина *C*-электрода соединена с анодом лампы выходного каскада усилителя мощности генератора *C*-электрода (11, рис. 7.2) при помощи фидерной линии, выполненной из двух отрезков ВЧ-кабеля с полиэтиленовой изоляцией длиной 12,5 м. Со стороны генератора кабели заземлены через индуктивность с ферритовым сердечником (ферритовый вариатор частоты (7)), образуя 3/4-волновую резонансную систему *C*-электрода со средней частотой 13,4 МГц. Перестройка резонансной частоты системы осуществляется за счет изменения тока подмагничивания ферритового вариатора. Девиация частоты – 250 кГц. Специальный 20-ступенчатый формирователь тока подмагничивания (2) позволяет воспроизводить практически любой закон изменения частоты генератора *C*-электрода в пределах диапазона 250 кГц. На пластины *C*-электрода также подается отрицательное смещение до 2,5 кВ с целью воспрепятствовать развитию паразитного РВР. Генератор *C*-электрода выполнен на лампах ГУ-5А в виде двух каскадов: задающего генератора (10) и усилителя мощности (11). Такая схема ослабляет влияние пучка на стабильность частоты генератора.

Отличительной чертой системы временной растяжки пучка синхроциклотрона является наличие систем синхронизации генератора *C*-электрода с основным генератором синхроциклотрона и ускоряемым пучком (рис. 7.3). Для обеспечения условия (7.3) введена цепь синхронизации генераторов основного дуанта и *C*-электрода по частоте и фазе в течение времени переходного процесса от одного режима ускорения

к другому. С этой целью основной генератор дуанта (1, рис. 7.3) связан с генератором *C*-электрода (4) при помощи линии связи через блок регулируемых фазовращателей (5). Вторая система синхронизации (по существу, система отрицательной обратной связи) обеспечивает подстройку частоты и фазы генератора *C*-электрода по частоте и азимутальному положению ускоряемого сгустка пучка. Она осуществляется за счет подачи напряжения, которое наводит на резонансную систему *C*-электрода циркулирующий в системе сгусток. Это напряжение через блок выделения сигнала азимутального положения пучка (6) подается на вход генератора *C*-электрода (4). Оптимальная фаза напряжения синхронизации подбирается при помощи регулируемого фазовращателя (7).

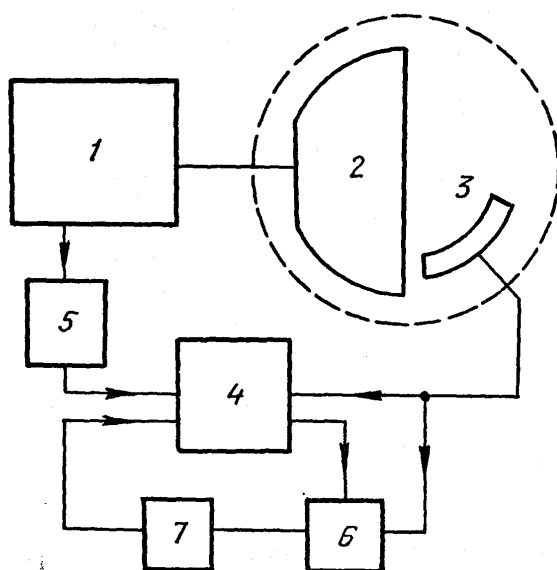


Рис. 7.3. Системы синхронизации генератора *C*-электрода:
 1 – основной генератор; 2 – дуант; 3 – *C*-электрод; 4 – генератор *C*-электрода; 5, 7 – регулируемые фазовращатели; 6 – блок выделения сигнала азимутального положения пучка

Временная диаграмма работы ускорителя в режиме временной растяжки пучка представлена на рис. 7.4. Генератор *C*-электрода работает непрерывно на частоте 13,4 МГц. Протонный пучок ускоряется основным дуантом до энергии примерно 970 МэВ. В этот момент (момент t_2) основная частотная программа с помощью анодного манипулятора должна быть выключена. Перед выключением основного генератора (момент времени t_1), когда частоты основной программы и резонансной системы *C*-электрода сближаются, происходит захват частоты генератора *C*-электрода основным генератором дуанта, и в течение интервала времени от t_1 до t_2 оба генератора работают на одной частоте и синфазно. Подстройка оптимальной разницы фаз между напряжениями на дуанте и *C*-электроне осуществляется с помощью блока регулируемых фазовращателей. Разни-

ца фаз подстраивается таким образом, чтобы обеспечить условие (7.3) – равенство в момент перехода равновесной фазы C -электрода и центральной фазы фазового объема пучка.

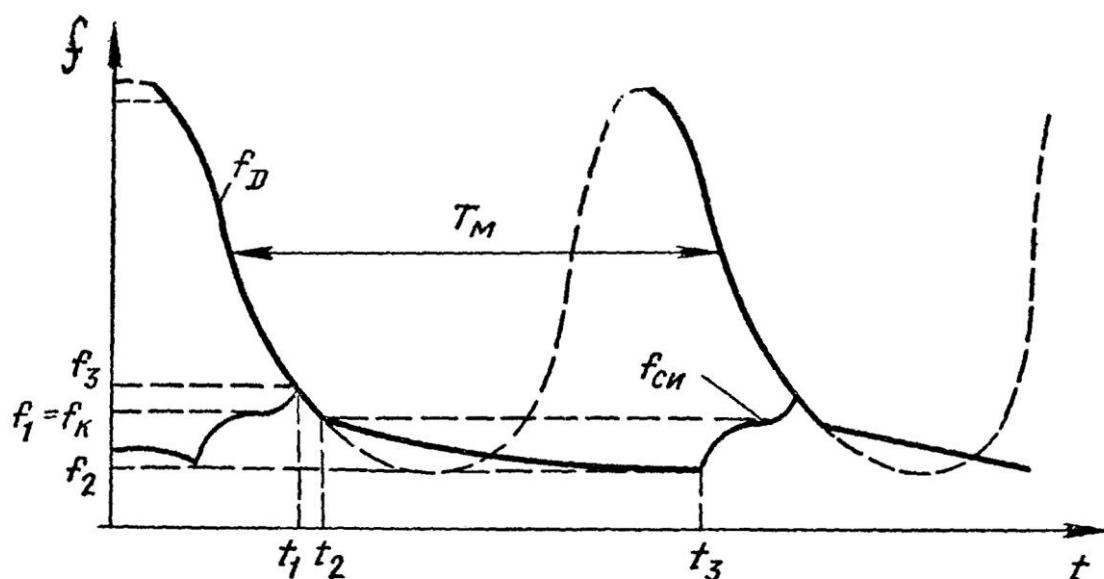


Рис. 7.4. Временная диаграмма работы C -электрода

В момент времени t_2 , когда частота основной программы достигает значения $f_1 = f_k$, соответствующего оптимальному радиальному положению пучка относительно C -электрода, отключается анодное напряжение генератора дуанта и включается блок управления ферритовым вариатором девиации частоты C -электрода, обеспечивая дальнейшее медленное доускорение пучка при помощи C -электрода. После выключения генератора дуанта остается работать вторая система синхронизации, обеспечивающая коррекцию частоты и фазы генератора C -электрода по частоте и фазе обращения сгустка. Интервал времени от t_2 до t_3 и форму зависимости частоты C -электрода от времени $f_c(t)$ можно оперативно менять в широких пределах.

При частоте модуляции ускоряющего напряжения основной частотной программы около 50 Гц длительность макроимпульса растянутого протонного пучка $\Delta t = t_3 - t_2$ составляет около 10–15 мс. Полная девиация частоты в этом интервале времени $\Delta f = f_1 - f_2 = 250$ МГц.

Управление работой генератора C -электрода осуществляется СУФ, расположенной на пульте управления ускорителя.

Наличие двух систем синхронизации: по частоте и фазе между дуантом и C -электродом – позволило практически без потерь перевести фазовый объем пучка, ускоряемого дуантом, в сепаратрису C -электрода и избежать дальнейших фазовых потерь пучка. Это позволило резко снизить напряжение на C -электроде. Снижение напряжения и узкополос-

ность

генератора C -электрода, резонансно перестраиваемого по частоте при помощи ферритового вариатора, позволили резко снизить его мощность. В оптимальном режиме напряжение на C -электроде составляет 2–2,5 кВ, что соответствует мощности примерно 0,5–1,0 кВт. Относительно небольшое напряжение и мощность генератора C -электрода резко упростили задачу его создания. Так, в частности, при создании резонансной системы C -электрода не понадобилось создавать особую коаксиальную линию, как это было сделано на других синхроциклотронах, – был использован промышленный коаксиальный кабель типа РКГ-15 и т. п.

Принципиально новая схема временной растяжки с двумя системами синхронизации была защищена авторскими свидетельствами [5, 7].

Параметры растянутого пучка

Временное распределение интенсивности растянутого пучка в отдельных циклах и суммарное распределение за продолжительное время показано на рис. 7.5. Полная повторяемость формы суммарных распределений растянутого пучка свидетельствует о высокой стабильности системы. Колебания интенсивности в отдельных циклах ускорения не выходят за пределы статистического отклонения.

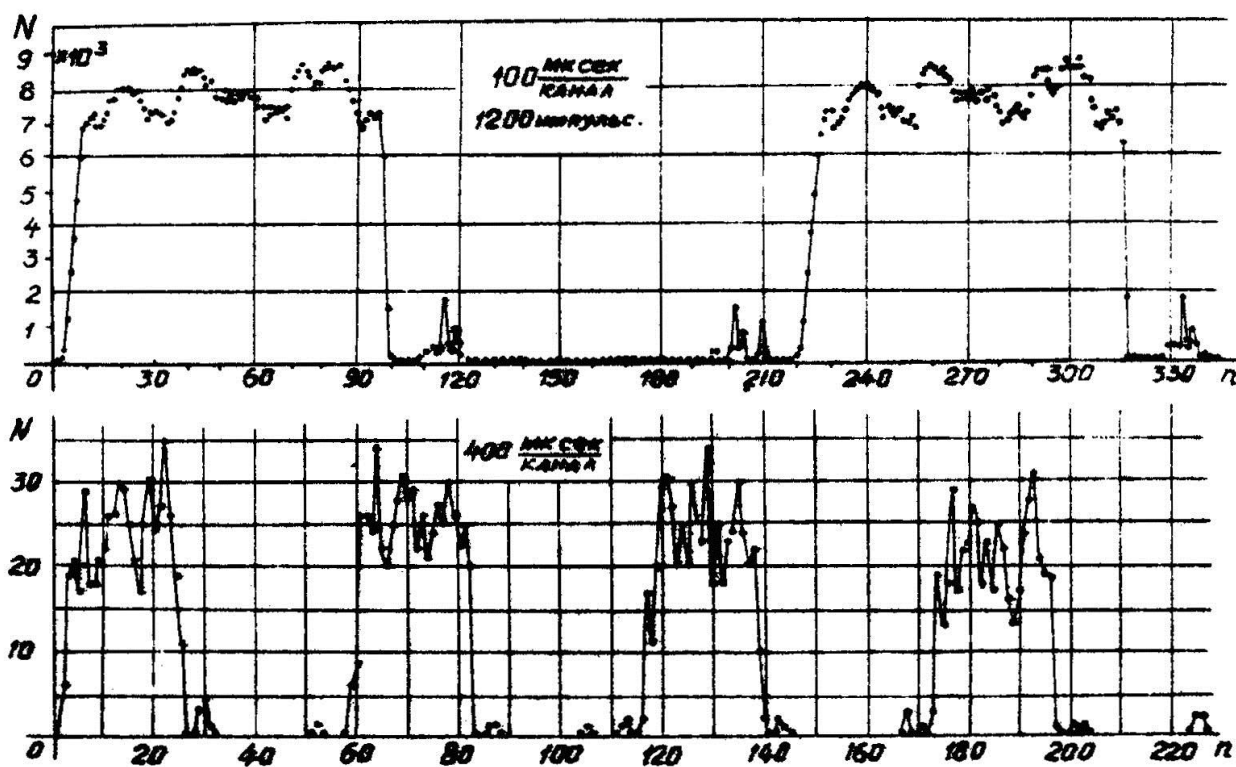


Рис. 7.5. Временное распределение интенсивности выведенного протонного пучка

На осциллограмме рис. 7.6а–в показан выведенный растянутый пучок синхроциклотрона – сигнал с ФЭУ, который расположен в главном зале ускорителя.

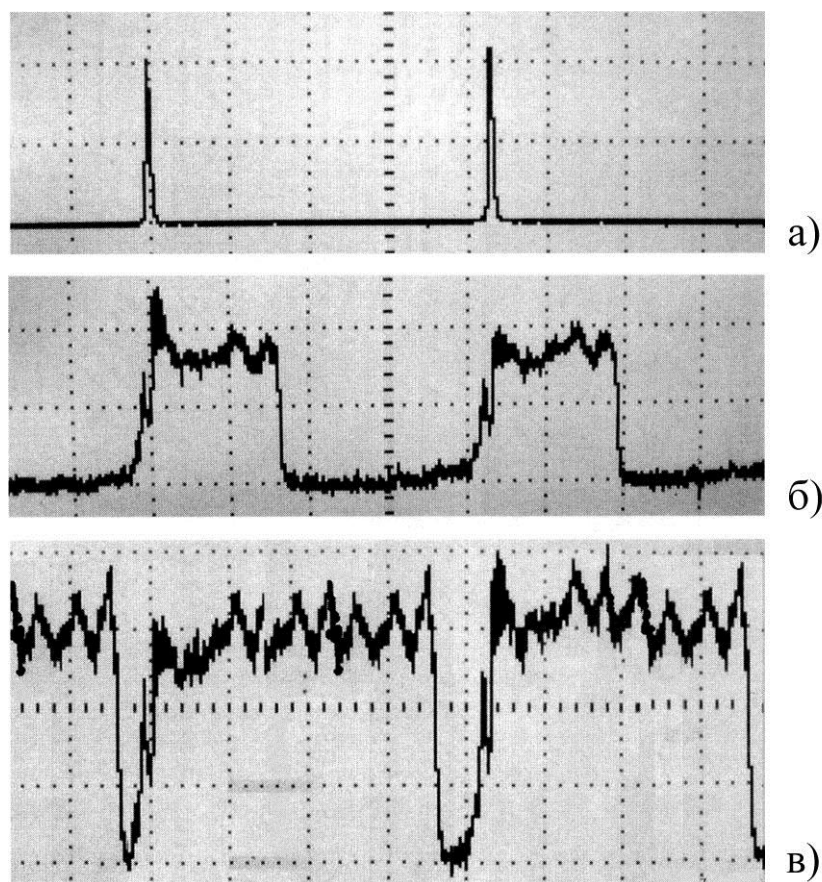


Рис. 7.6. Осциллограммы макроимпульса выведенного пучка:
а) нерастянутого; б, в) растянутого

На рис. 7.7 показана зависимость интенсивности пучка от сдвига фаз между напряжением на дуанте и С-электроде. Работа системы растяжки без фазировки ее с основной программой приводит к уменьшению средней интенсивности на 30–50 % при одновременном значительном ухудшении стабильности интенсивности растянутого пучка от цикла к циклу.

На рис. 7.8 представлена зависимость интенсивности растянутого импульса протонного выведенного пучка от коэффициента временного заполнения $m = \frac{\Delta t}{T_M}$. Начальная точка на графике $\left(\frac{I}{I_{\max}}\right) = 1$ соответствует режиму работы ускорителя без системы растяжки пучка (длительность импульса пучка ~ 300 мкс, $\frac{\Delta t}{T_M} = 1,4$ %).

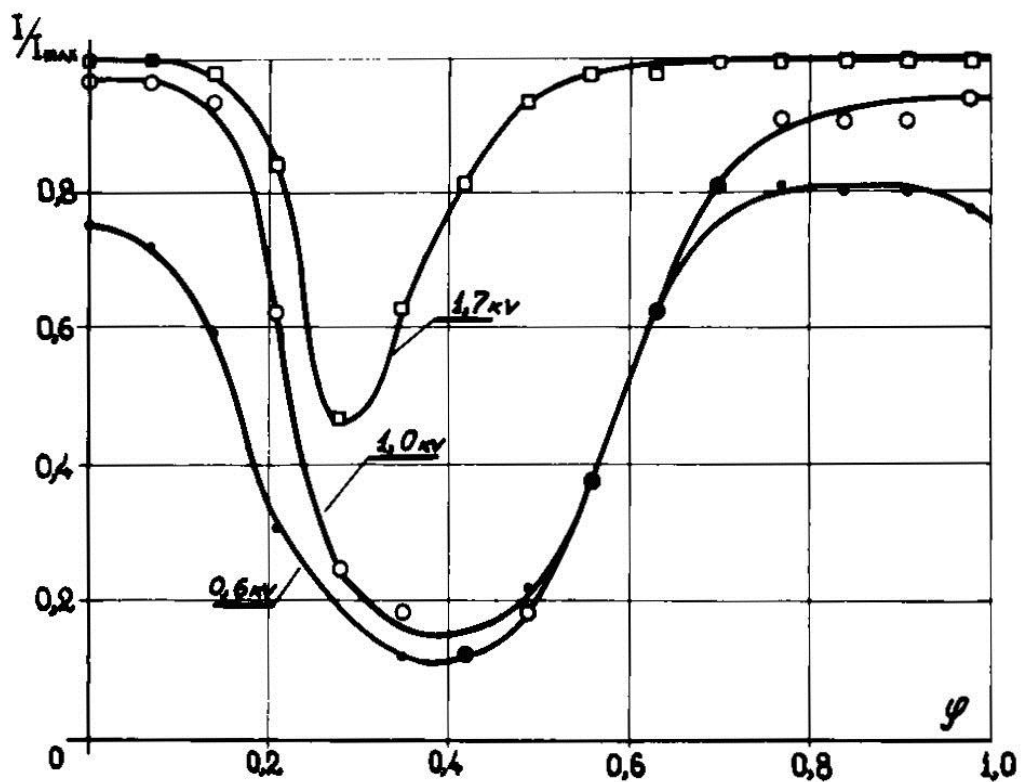


Рис. 7.7. Зависимость интенсивности пучка от сдвига фаз между напряжением на дуанте и С-электроде

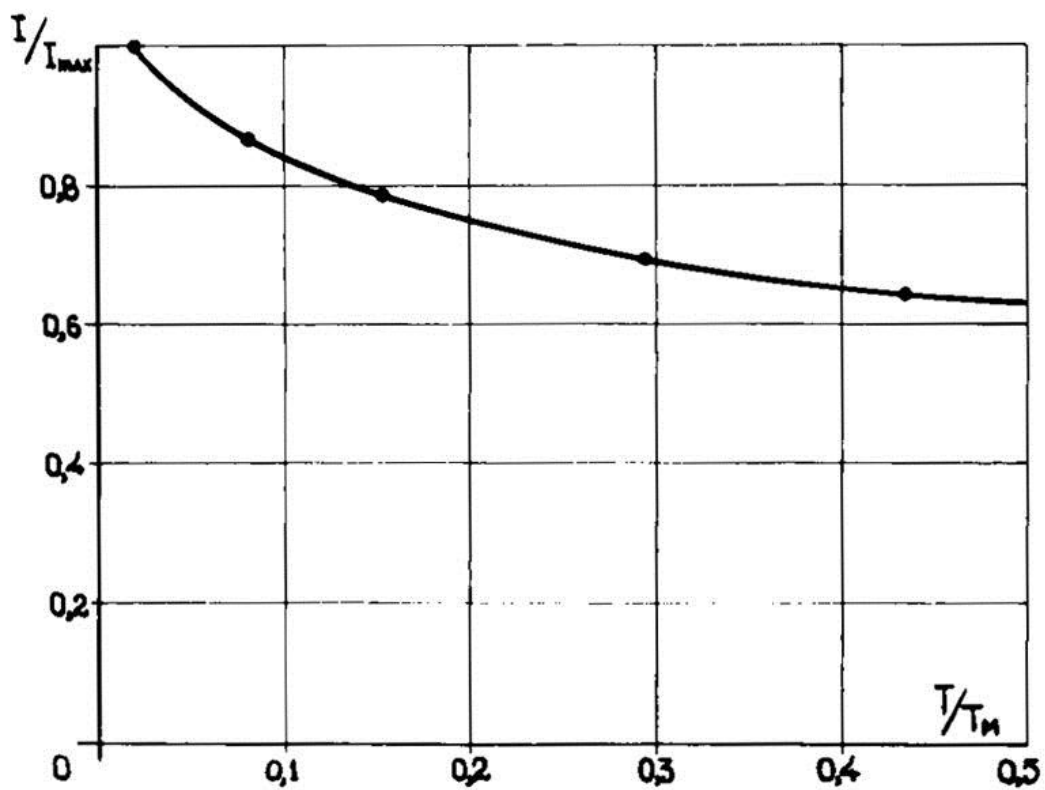


Рис. 7.8. Зависимость относительной интенсивности растянутого пучка от коэффициента временного заполнения

Переход пучка от ускорения дуантом к ускорению S -электродом происходит со 100%-ной эффективностью, а экспоненциальный спад интенсивности с ростом коэффициента временного заполнения связан с уменьшением времени жизни пучка из-за неоднородностей магнитного поля вблизи регенеративной выводной системы ускорителя.

В выведенном и растянутом с помощью S -электрода пучке сохраняется микроструктура. Полуширина банчей в растяжке уменьшается от начала ~ 10 – 12 нс к концу ~ 4 – 2 нс при периоде между банчами ~ 77 нс. При сравнении с полушириной микроструктуры нерастянутого пучка ~ 12 нс видно, что при перезахвате в S -электрод практически полностью сохраняется фазовый объем пучка.

Отметим, что сохранение микроструктуры в растянутом пучке позволяет проводить физические эксперименты по времяпротонной методике, где важно иметь как можно более короткие по времени импульсы микробанчей. Подбором режима синхронизации нам удалось получить длительность банча ~ 7 нс в начале растяжки и 2 нс в ее конце при расстоянии между ними 77 нс. Эта длительность использовалась при экспериментах с μ^+ - и K^+ -мезонами [8, 9].

Отметим также, что максимально возможный коэффициент заполнения в S -системе синхроциклотрона ПИЯФ равен примерно 80% . При работе синхроциклотрона ПИЯФ с пропуском циклов ускорения удается растянуть пучок на время, большее нескольких периодов модуля T_M . Так, в эксперименте по малоугловому pp -рассеянию время растянутого пучка составляло $\sim 0,5$ – 1 с.

7.2. Импульсный нейтронный пучок синхроциклотрона ПИЯФ. Система однооборотного сброса протонов на внутреннюю мишень

Развитие ядерной энергетики требует все более точных измерений констант взаимодействия нейтронов с ядрами, которые могут быть проведены при использовании нейтронных спектрометров по времени пролета. Создание таких спектрометров требует, в свою очередь, создания мощных импульсных источников нейтронов с малой длительностью нейтронного импульса, которые могут быть осуществлены на протонных ускорителях с использованием реакции спалейшен при облучении тяжелых мишеней протонами¹.

При взаимодействии протонов с энергией 1 ГэВ со свинцовой мишенью образуется порядка 20 нейтронов на один протон, из которых примерно 85% имеют максвелловский спектр со средней энергией около

¹ Шабалин Е. П. // Атомная энергия. 1982. Т. 52. Вып. 2. С. 92.

3 МэВ и изотропным угловым распределением. Остальные нейтроны образуются в каскадных процессах взаимодействия протонов с нуклонами ядра и имеют энергию несколько сотен МэВ и остронаправленное вперед угловое распределение. На синхроциклотроне задача, связанная с получением импульсного пучка нейтронов, была решена с помощью однооборотного сброса протонного пучка на нейтронообразующую мишень, установленную ниже или выше средней плоскости ускорителя^{1,2}. В качестве такого дефлектора был использован С-электрод, у которого удалена боковая стенка и на разделенные пластины которого может быть подан высоковольтный импульс для отклонения ускоряемого сгустка пучка как целого в вертикальном направлении. Для получения испарительного спектра нейтронов использовался полиэтиленовый замедлитель.

Создание на синхроциклотроне ПИЯФ импульсного дефлектора сделало возможным получение импульсного пучка нейтронов и сооружение на его базе нейтронного спектрометра по времени пролета ГНЕЙС [2, 10, 11]. Работаящая система спектрометра ГНЕЙС была подробно описана в главе 2, п. 2.3, рис. 2.20.

Схема и принцип работы импульсного дефлектора

Схема нейтронного генератора приведена на рис. 7.9. На радиусе «конечной» орбиты ускоряемых протонов (1) установлен электростатический дефлектор (2). На этом же радиусе установлена нейтронообразующая мишень (3), но выше (или ниже) плоскости орбиты (1). Таким образом, ни дефлектор (2), ни мишень (3) не препятствуют свободному вращению сгустка ускоренных протонов (4). Пластины дефлектора (2) подсоединены к многофункциональному блоку питания и управления дефлектором (5).

Наведение сгустка ускоренных протонов на мишень осуществляется электростатическим дефлектором. В нужный момент, когда сгусток (4) достигает предельной энергии и вращается по «конечной» орбите, на пластины дефлектора подается высоковольтный импульс напряжения. Сгусток протонов получает импульс в вертикальном направлении, в результате чего он через оборот попадает на торец мишени. Ось нейтронного пучка (6) проходит через центр мишени и составляет угол α с касательной (7) к конечной орбите.

¹ Scanlon I. P. et al. // RSI. 1957. V. 28, No. 10. P. 749.

² Rainwater I. et al. // RSI. 1964. V. 35, No. 3. P. 263.

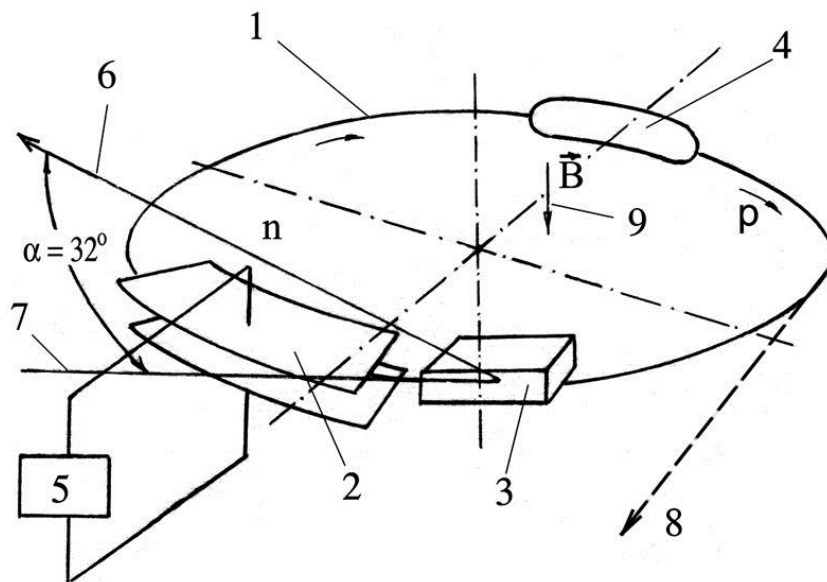


Рис. 7.9. Схема работы нейтронного генератора:

1 – «конечная» орбита протонов 1 ГэВ; 2 – пластины электростатического дефлектора; 3 – нейтронообразующая мишень; 4 – сгусток протонов; 5 – блок питания и управления дефлектором; 6 – ось направления нейтронного пучка; 7 – направление касательной к орбите; 8 – направление оси выводимых из ускорителя протонов для использования их в различных физических экспериментах; 9 – направление магнитного поля ускорителя

Рассмотрим принцип работы нейтронного генератора и его основные характеристики. Расчетная схема работы нейтронного генератора приведена на рис. 7.10.

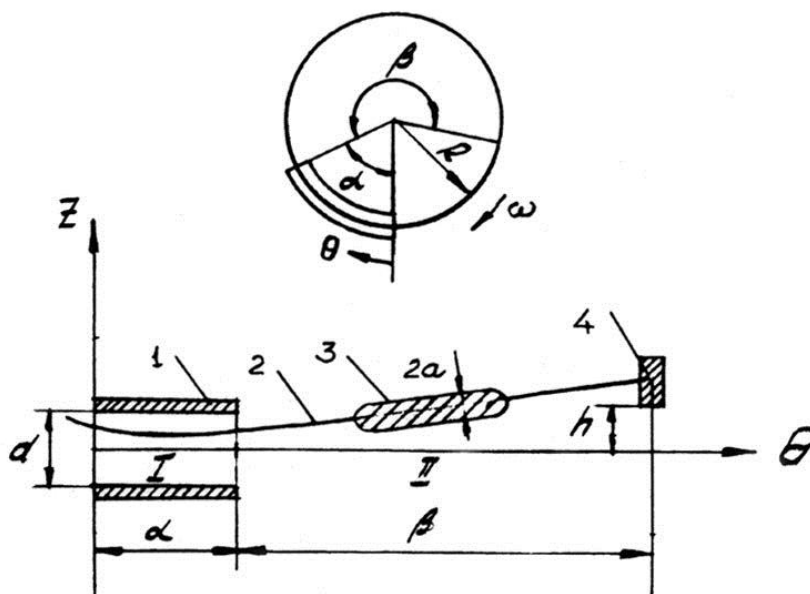


Рис. 7.10. Схема расчета импульсного дефлектора:

1 – пластины дефлекторов; 2 – траектория движения сгустка; 3 – сгусток ускоренных протонов; 4 – мишень

Временные характеристики стартового нейтронного пучка определяются временем взаимодействия ускоренного протонного пучка с нейтронообразующей мишенью. Минимально возможное время взаимодействия определяется угловой протяженностью сгустка $\sim 45^\circ$ и равно $\sim 8-12$ нс, что является приемлемой величиной для использования время-пролетной методики. При достаточно большой величине амплитуды напряжения, подаваемого на дефлекторные пластины, можно осуществить 100%-ный однооборотный сброс протонного пучка на внутреннюю мишень, установленную ниже или выше средней плоскости ускорителя.

Параметры импульсного дефлектора

Зададим геометрию импульсного дефлектора следующим образом. Пусть R – радиус, соответствующий энергии сброса пучка на мишень, α – угловая протяженность отклоняющих пластин дефлектора, а β – угловое расстояние от выхода дефлектора до мишени (рис. 7.10). Соответствующие линейные размеры будут: $l = \alpha R$ и $L = \beta R$.

Уравнение вертикального движения частицы с энергией, соответствующей радиусу R внутри дефлектора (область I, рис. 7.10), может быть записано в следующем виде (изменением полной скорости частицы за счет электрического поля внутри дефлектора пренебрегаем):

$$m\ddot{z} = e\mathcal{E}_z - \frac{e}{c}vB_r. \quad (7.6)$$

Здесь m , e и v – масса, заряд и скорость частицы; \mathcal{E} – напряженность электрического поля внутри дефлектора (поле предполагается однородным по высоте); B_r – радиальная компонента магнитного поля в месте нахождения частицы.

Замечая, что $B_r = -\frac{nB_z}{R}Z$, где $n = -\frac{R}{B_z}\frac{dB_z}{dR}$, B_z – вертикальная компонента магнитного поля в средней плоскости зазора, заменяя дифференцирование по времени дифференцированием по азимутальному углу θ и вводя угловую частоту вращения частицы $\omega = -\frac{eB_z}{mc}$, уравнение (7.6)

можно записать в виде

$$z'' + nz = \frac{e\mathcal{E}_z}{m\omega^2}. \quad (7.7)$$

Начальные условия на входе частицы в дефлектор зададим следующим образом:

$$Z \Big|_{\theta=0} = Z_0; \quad Z' \Big|_{\theta=0} = Z'_0 = \varphi R,$$

где φ – угол между направлением движения частицы и средней плоскостью зазора.

Решение уравнения (7.7) в области I запишется в виде

$$Z = \left(Z_0 - \frac{e\mathcal{E}_z}{nm\omega^2} \right) \cos \sqrt{n}\theta + \frac{Z'_0}{\sqrt{n}} \sin \theta + \frac{e\mathcal{E}_z}{nm\omega^2}.$$

Значения Z и Z' на выходе из дефлектора

$$\begin{cases} Z_\alpha = \left(Z_0 - \frac{e\mathcal{E}_z}{nm\omega^2} \right) \cos \sqrt{n}\alpha + \frac{Z'_0}{\sqrt{n}} \sin \sqrt{n}\alpha + \frac{e\mathcal{E}_z}{nm\omega^2} \\ Z'_\alpha = -\sqrt{n} \left(Z_0 - \frac{e\mathcal{E}_z}{nm\omega^2} \right) \sin \sqrt{n}\alpha + Z'_0 \cos \sqrt{n}\alpha. \end{cases} \quad (7.8)$$

В области II (рис. 7.10), за дефлектором, уравнение вертикального движения частицы полностью совпадает с обычным уравнением вертикальных бетатронных колебаний:

$$Z'' + nZ = 0.$$

Решение этого уравнения может быть записано в виде

$$Z = Z_\alpha \cos \sqrt{n}\theta + \frac{Z'_\alpha}{\sqrt{n}} \sin \sqrt{n}\theta \quad (7.9)$$

(угол θ при этом отсчитывается от выхода дефлектора).

Подставляя в (7.9) выражения для Z_α и Z'_α из (7.8) и полагая $\theta = \beta$, после некоторых преобразований получим

$$\begin{aligned} Z_\beta = & Z_0 \cos \sqrt{n}(\alpha + \beta) + \frac{Z'_0}{\sqrt{n}} \sin \sqrt{n}(\alpha + \beta) + \\ & + \frac{2e\mathcal{E}_z}{nm\omega^2} \sin \left[\sqrt{n} \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \sin \frac{\sqrt{n}\alpha}{2}. \end{aligned} \quad (7.10)$$

Первые два члена выражения (7.10) представляют собой обычные вертикальные бетатронные колебания и могут быть объединены в один:

$$A \sin \left[\sqrt{n}(\alpha + \beta) + \delta \right],$$

где A – амплитуда колебаний; δ – фаза колебаний на входе в дефлектор. Отсюда следует, что вертикальный размер пучка $2A$ на входе дефлектора за счет вертикальных бетатронных колебаний полностью переносится на мишень. Третий член выражения (7.10) представляет собой вертикаль-

ное отклонение пучка за счет действия дефлектора, которое оказывается не зависящим от начальных условий на входе в дефлектор.

Таким образом, расстояние по вертикали от края мишени до средней плоскости должно быть не более $h - A$, где

$$\begin{aligned} h &= \frac{2e\mathcal{E}}{nm\omega^2} \sin \sqrt{n} \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \sin \frac{\sqrt{n}\alpha}{2} = \\ &= \frac{2eU^*ER^2}{(E^2 - E_0^2)d} \frac{\sin \sqrt{n} \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \sin \frac{\sqrt{n}\alpha}{2}}{n}. \end{aligned} \quad (7.11)$$

Здесь U^* – эффективная амплитуда напряжения на дефлекторе с учетом краевых эффектов за счет конечных размеров пластин; d – расстояние между пластинами дефлектора; E – полная энергия частицы; E_0 – ее энергия покоя.

При $n \rightarrow 0$ величина

$$\frac{2 \sin \left[\sqrt{n} \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \sin \frac{\sqrt{n}\alpha}{2}}{n} \rightarrow \alpha \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right).$$

В связи с этим выражение (7.11) может быть записано в виде

$$h = \frac{h_0}{f}, \quad (7.11a)$$

где $h_0 = \frac{eU^*ER^2\alpha \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right)}{(E^2 - E_0^2)d}$ представляет собой вертикальное отклонение

пучка в случае отсутствия радиальной компоненты магнитного поля ($n = 0$),

$$a \quad f = \frac{n \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \alpha}{2 \sin \left[\sqrt{n} \left(\beta + 2 \frac{\alpha}{2} \right) \right] \sin \frac{\sqrt{n}\alpha}{2}}.$$

Введем величину

$$U_0^* = \frac{hd}{R^2 \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \alpha} \frac{E^2 - E_0^2}{E} 10^6 \text{ (кВ)}$$

(энергия измеряется в гигаэлектронвольтах), которая представляет собой напряжение, необходимое для отклонения пучка на величину h при отсутствии радиальной компоненты магнитного поля, т. е. при $n = 0$.

Выражение (7.11) можно записать в виде

$$h = \frac{eU^*ER^2}{(E^2 - E_0^2)d} q(\alpha, \beta, n), \quad (7.116)$$

где $q = \frac{2 \sin \left[\sqrt{n} \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \sin \frac{\sqrt{n} \alpha}{2}}{n}$.

Величина q для различных α , β и n представлена на рис. 7.11.

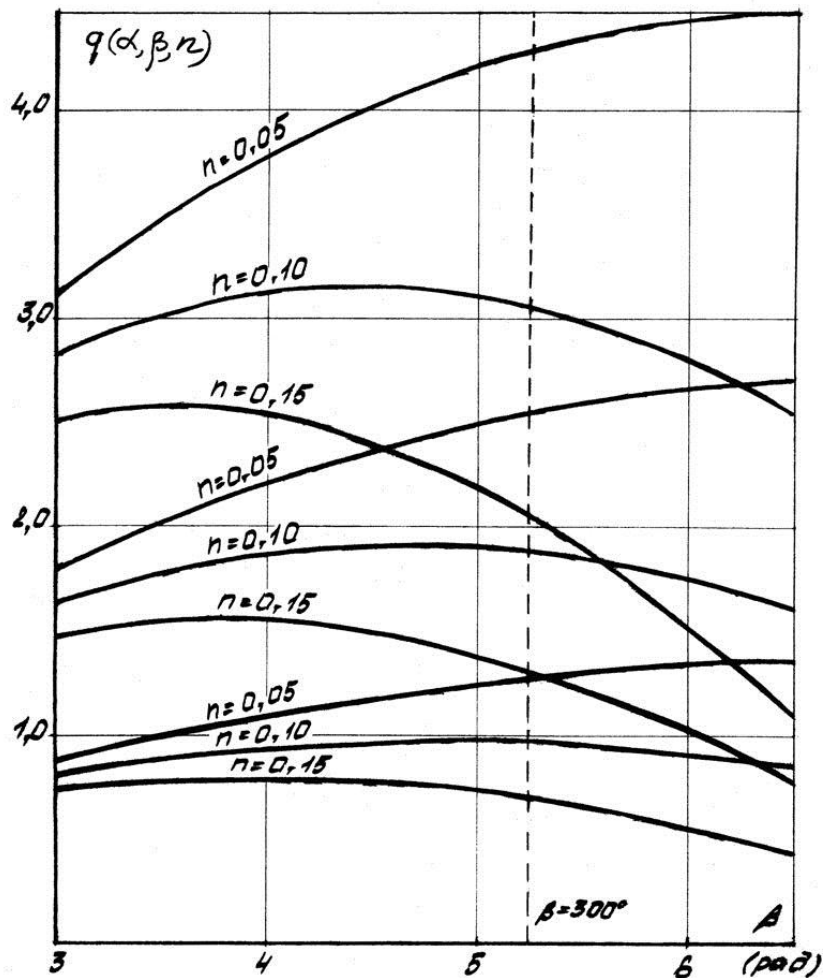


Рис. 7.11. Величина q для различных α , β и n

При заданных α и n величина q имеет максимум при $\beta_{\text{opt}} = \frac{\pi}{2\sqrt{n}} - \frac{\alpha}{2}$, равный $\frac{2}{n} \sin \frac{\sqrt{n} \alpha}{2}$. Величина β_{opt} для различных α и n представлена на рис. 7.12.

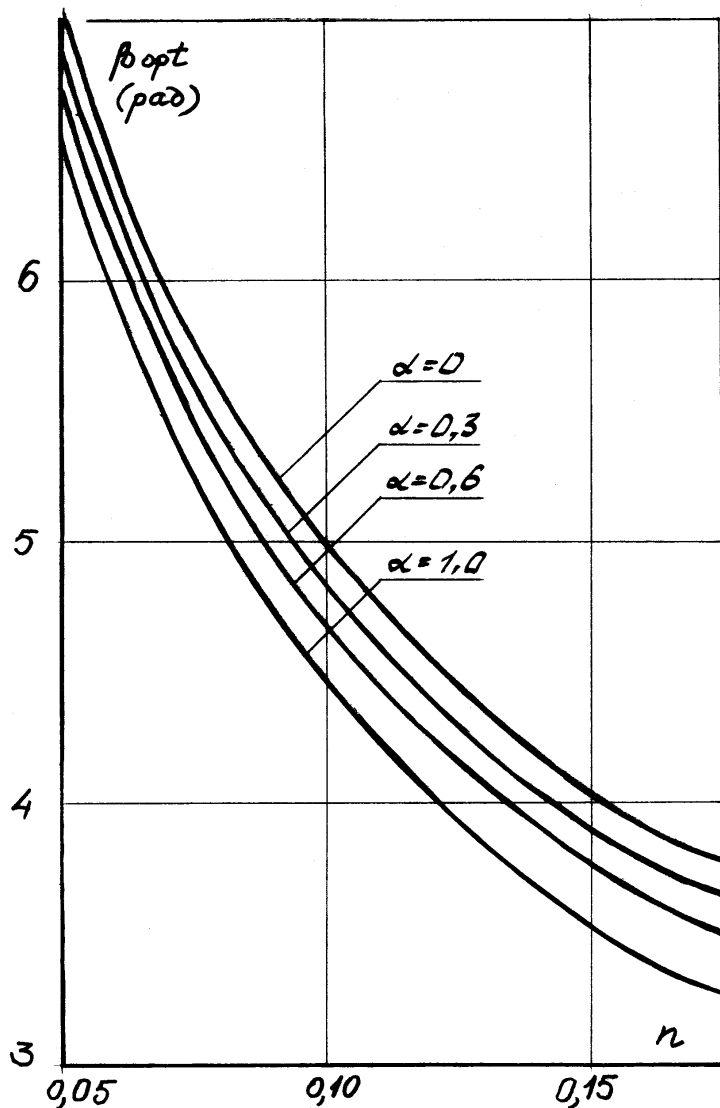


Рис. 7.12. Величина β_{opt} для различных α и n

Из выражений (7.11а, б) видно, что при заданной геометрии дефлектора и заданном напряжении наибольшее отклонение пучка получается при $n = 0$. При $n > 0$ величина отклонения всегда меньше, чем при $n = 0$. При заданных α и n величина отклонения растет с ростом β , при $\beta = \beta_{opt}$ достигает максимума и затем падает. В связи с этим выбор $\beta > \beta_{opt}$ нецелесообразен.

При заданных α и β величина n должна быть выбрана меньше, чем $n_{гр} = \frac{\pi^2}{(2\beta + \alpha)^2}$. Если при этом $\alpha + \beta = 2\pi$ (мишень установлена на входе

в дефлектор), то $n_{гр} = \frac{1}{\left(4 - \frac{\alpha}{\pi}\right)^2}$. Из (7.11б) следует формула для вычис-

ления напряжения, необходимого для отклонения пучка на величину h , при заданных α , β и n :

$$U^* = \frac{hd}{R^2} \frac{E^2 - E_0^2}{E} \frac{10^6}{q(\alpha, \beta, n)} \text{ (кВ)},$$

где E и E_0 измеряются в гигаэлектронвольтах. В нашем случае $R = 316$ см, $E_0 = 0,938$ ГэВ, $E = 1,938$ ГэВ, $U^* = 14,9 \frac{hd}{q}$ (кВ), где h и d измеряются в сантиметрах.

Оценим необходимую величину напряжения на дефлекторе при расстоянии между его пластинами $d = 6$ см. Пусть нижний край мишени расположен на расстоянии $h = a = 2$ см от медианной плоскости, т. е. практически касается пучка. Тогда необходимое напряжение на дефлекторе $U = 84,7$ кВ при $n = 0,05$, $q = 4,25$; $U = 118$ кВ при $n = 0,1$, $q = 3,05$.

Временная схема работы импульсного дефлектора

Временная схема работы импульсного дефлектора и форма его импульса приведены на рис. 7.13.

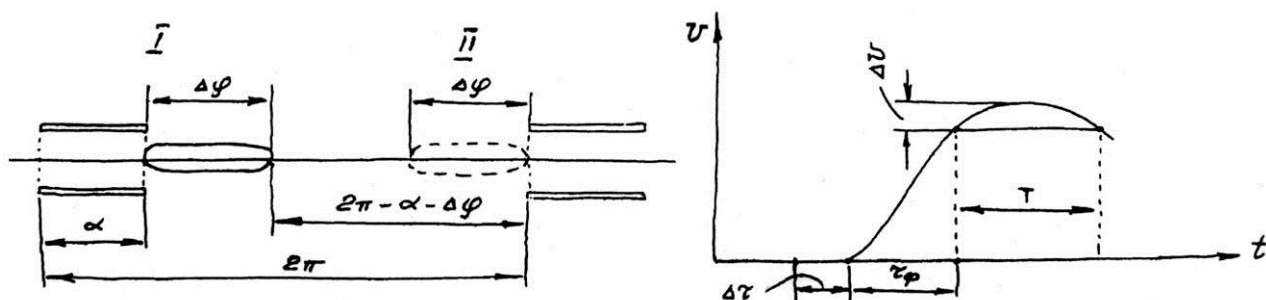


Рис. 7.13. Временная схема работы импульсного дефлектора (слева) и форма импульса дефлектора (справа).

α – угловой размер дефлектора; $\Delta\varphi$ – угловой размер сгустка протонов; U – напряжение на дефлекторе; T – длительность импульса дефлектора; τ_ϕ – длительность фронта импульса; $\Delta\tau$ – суммарная погрешность

Пусть азимутальная протяженность сгустка составляет величину $\Delta\varphi$. Тогда время пролета сгустком дефлектора, т. е. время между выходом из дефлектора (положение I) и очередным входом в него (положение II),

$$t = \frac{2\pi - \alpha - \Delta\varphi}{2\pi f_0}.$$

За этот интервал времени на дефлектор должно быть подано полное напряжение. Отсюда требование ко времени нарастания фронта отклоняющего импульса $\tau_\phi < t + \Delta\tau$, где $\Delta\tau$ – суммарная погрешность в точно-

сти определения углового положения сгустка относительно дефлектора и задержки в схемах запуска (рис. 7.13). Длительность отклоняющего импульса должна быть не меньше времени, в течение которого сгусток находится между пластинами дефлектора, т. е.

$$T \geq \frac{\Delta\varphi + \alpha}{2\pi f_0}.$$

Наиболее жесткие требования налагаются на величину нарастания фронта импульса, которая при амплитуде ~ 100 кВ должна быть ~ 50 нс, что является достаточно сложной технической задачей. Полученные оценки полностью подтвердились при экспериментальной проверке. Генератор импульса сброса обеспечивает на пластинах C -электрода импульсную разность потенциалов до 100 кВ с передним фронтом от 70 до 100 нс.

Конструкция совмещенной системы временной растяжки и быстрого сброса пучка

Основной проблемой при реализации системы однооборотного сброса пучка на внутреннюю нейтронообразующую мишень являлось обеспечение возможности совместной работы C -электрода в качестве ускоряющей системы при растяжке пучка и одновременно в качестве отклоняющего дефлектора при однооборотном сбросе пучка на внутреннюю мишень. Здесь мы использовали совмещенную систему, предложенную сотрудниками Ускорительного отдела ПИЯФ, А. В. Куликовым и Н. Н. Черновым [13]. Предложенная ими принципиальная схема генератора сброса, совмещенная с системой растяжки, представлена на рис. 7.14. Источником импульсного напряжения дефлектора является тиратронный генератор Л 1÷4 с выходным ферритовым трансформатором (7). Выходная обмотка трансформатора, состоящая из центральных жил фидеров питания C -электрода (1), выполнена таким образом, что система обеспечивает синфазную подачу ускоряющего напряжения на пластины в режиме растяжки и противофазную подачу импульса напряжения в режиме сброса. Одновременно достигается отсутствие связи

между импульсным генератором и генератором ВЧ. СУФ позволяет работать одновременно в режиме растяжки и однооборотного сброса при любой последовательности их чередования от цикла к циклу ускорения. Более того, возможен режим, когда в одном цикле ускорения часть пучка растягивается и выводится наружу, а оставшаяся часть импульса сбрасывается на мишень.

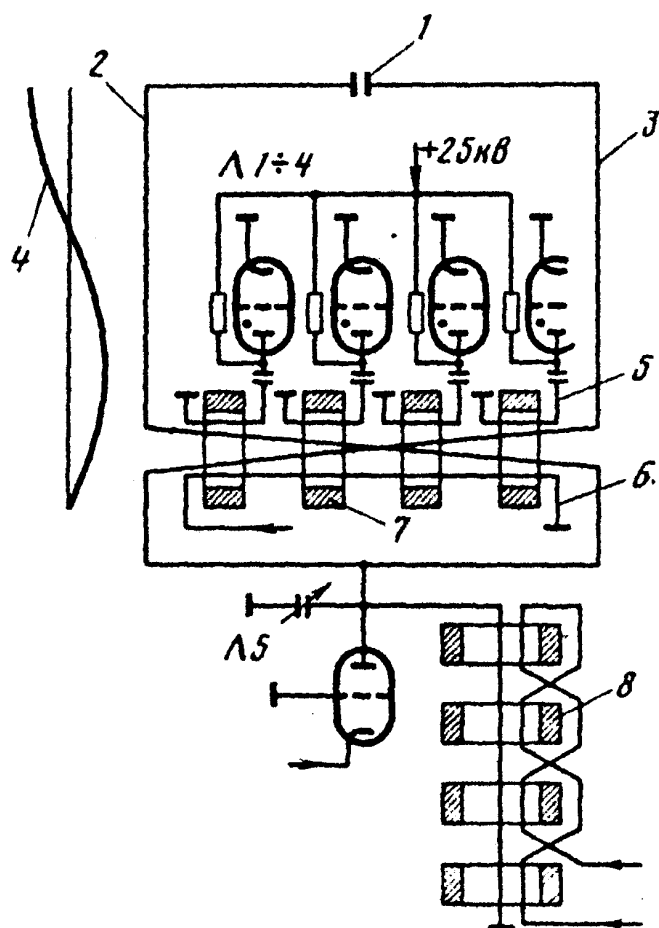


Рис. 7.14. Упрощенная схема генератора сброса:

1 – С-электрод; 2–3 – фидерные линии связи с С-электродом; 4 – распределение напряжения вдоль фидеров в режиме работы растяжки пучка; 5 – первичная обмотка импульсного трансформатора; 6 – обмотка подмагничивания импульсного трансформатора; 7 – ферритовый импульсный трансформатор; 8 – ферритовый вариатор частоты С-электрода; Л 1 ÷ 4 – тиратронный генератор; Л5 – ВЧ-генератор системы растяжки пучка

Разработаны и введены в эксплуатацию совмещенная система временной растяжки пучка с помощью С-электрода и система однооборотного сброса протонного пучка на внутреннюю нейтронообразующую мишень, в которой в качестве импульсного дефлектора, осуществляющего сброс пучка, используются разъединенные пластины С-электрода. Совмещенная система обеспечивает подачу на пластины С-электрода либо ускоряющего напряжения С-электрода, либо импульса напряжения с амплитудой около 100 кВ и длительностью 70 нс, необходимого для сброса протонного сгустка на свинцовую мишень, которая находится ниже средней плоскости зазора магнита. Создание импульсного дефлектора позволило создать на базе синхроциклотрона ПИЯФ уникальный нейтронный спектрометр по времени пролета ГНЕЙС.

В 2008 году с использованием системы ГНЕЙС был получен пучок нейтронов с энергетическим спектром, повторяющим спектр атмосферных нейтронов, для тестирования компонентов радиоэлектроники на радиационную стойкость.

Использование дефлектора для отклонения протонного пучка на внутреннюю мишень позволяет менять временную структуру стартового нейтронного пучка. Подавая на дефлектор импульсы различной амплитуды и длительности, можно варьировать скорость подачи пучка на нейтронообразующую мишень и тем самым изменять временную структуру нейтронного пучка. Другая возможность – подавать на пластины дефлектора синусоидальное напряжение с частотой вертикальных бетатронных колебаний. Подбирая частоту, амплитуду и длительность, можно изменять скорость отклонения протонного пучка и тем самым варьировать временную структуру нейтронного пучка на мишени.

7.3. Система увеличения интенсивности пучка синхроциклотрона ПИЯФ

Эффективность захвата

Как известно, для обеспечения устойчивого режима ускорения в синхроциклотроне для равновесной частицы φ_s с фазой должно быть выполнено условие автофазировки

$$\cos \varphi_s = -\frac{3E_s N}{eV f_s^2 K} \frac{df_{\text{ген.}}}{d\alpha} < 1,$$

где V и $f_{\text{ген.}}$ – амплитуда и частота ускоряющего напряжения на дуанте; E_s и f_s – энергия и частота обращения равновесной частицы; α – угол поворота ротора вариатора частоты в градусах; N – число оборотов ротора вариатора в минуту; параметр $K = 1 + \frac{n}{(1-n)\beta_s^2}$.

Благодаря изменению частоты ускоряющего напряжения захват протонов в ускорительный режим происходит только в короткие промежутки времени, когда частота ускоряющего напряжения сравнивается с частотой обращения протонов вблизи центра ускорителя. Эффективность захвата протонов в режим ускорения определяется как отношение интервала времени $\Delta\tau$, когда осуществляется захват, к периоду модуляции частоты ускоряющего напряжения T_M :

$$\varepsilon = \frac{\Delta\tau}{T_M}.$$

Детальный расчет эффективности захвата для синхроциклотрона с учетом возвращения протонов в течение первого фазового колебания в центр ускорителя был проведен в известной работе Бома и Фолди¹:

$$\varepsilon = \frac{2\sqrt{2}}{T_M \left| \frac{d\omega_{\text{ген.}}}{dt} \right|} \sqrt{\frac{e V_0 \omega_s^2 K}{\pi E_s}} L(\varphi_s),$$

где V_0 – амплитуда ускоряющего напряжения в начале цикла ускорения; $L(\varphi_s)$ – рассчитанная в этой работе функция от φ_s . При $\varphi_s = 60^\circ$ функция $L(\varphi_s)$ имеет максимум, равный 0,58, и при $\varphi_s = 0$ и $\varphi_s = 90^\circ$ обращается в нуль.

Замечая, что для вариатора частоты, имеющего σ лопастей, частота модуляции ускоряющего напряжения $F_M = \frac{N}{60} \sigma$, и, следовательно,

$T_M = \frac{60}{N\sigma}$, выражение для эффективности захвата может быть записано в виде

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}\sigma f_0}{180 \frac{df_{\text{ген.}}}{d\alpha}} \sqrt{\frac{e V_0 K}{\pi E_0}} L(\varphi_s).$$

Необходимо отметить, что теория захвата Бома и Фолди предполагает наличие на начальном этапе ускорения щелевого набора энергии ускоряемого протона. Однако в синхроциклотроне, в системе с одним дуантом и открытым ионным источником, ширина ускоряющей щели оказывается во много раз больше приращения радиуса протона за один оборот, и, как следствие этого, приращение энергии на один оборот при неизменном ускоряющем напряжении зависит от радиуса². Реально щелевой набор энергии в системе с одним дуантом наступает только после того, как протон наберет энергию, соответствующую радиусу 30–40 см. Поэтому приведенные выше формулы для эффективности захвата являются приближенными и носят, скорее, качественный характер. Численные расчеты начальной стадии ускорения, проведенные в ЛЯП ОИЯИ³, показали, что оптимальное значение $\cos \varphi_s$ для синхроциклотрона до реконструкции равно не 0,5, а несколько больше – 0,65.

Настройка ускорителя на оптимальную величину эффективности захвата может быть осуществлена за счет выбора скорости вращения ротора вариатора, соответствующей оптимальному значению равновесной фазы,

¹ *Bohm D. and Foldy L.* // Phys. Rev. 1947. V. 72. P. 649.

² *Данилов В. И. и др.* // Тр. Междунар. конф. по ускорителям. М., 1964. С. 591.

³ Там же. С. 595.

при которой эффективность захвата имеет максимум. Оптимальная скорость вращения ротора, соответствующая значению $\cos \varphi_s = (\cos \varphi_s)_{\text{opt}}$ и постоянной амплитуде ускоряющего напряжения, может быть выражена в виде

$$N_{\text{opt}} = \frac{eVK f_s^2}{3E_s \frac{df_{\text{ген.}}}{d\alpha}} (\cos \varphi_s)_{\text{opt}}.$$

Однако, если частотная и амплитудная программы не обеспечивают постоянство величины $V \cos \varphi_s$ в процессе ускорения, может оказаться, что при некоторых значениях угла α в пределах рабочего диапазона частот величина $\cos \varphi_s$ при выбранной скорости вращения ротора станет больше единицы. Это приведет к потере фазовой устойчивости и потерям пучка. Максимально допустимая скорость вращения ротора, при которой $\cos \varphi_s$ не выходит за пределы единицы, определяется выражением

$$N_{\text{max}} < \left(\frac{eVK f_{\text{ген.}}^2}{3E_s \frac{df_{\text{ген.}}}{d\alpha}} \right)_{\text{max}}.$$

Поэтому в случае $N_{\text{opt}} > N_{\text{max}}$ для предотвращения фазовых потерь пучка необходимо выбрать реальную скорость вращения ротора меньше, чем N_{opt} , что приводит к снижению интенсивности ускоряемого пучка. Таким образом, условие, налагаемое на форму частотной программы $f(\alpha)$, состоит в том, чтобы при выборе оптимальной скорости вращения вариатора в диапазоне захвата она обеспечивала отсутствие фазовых потерь в пределах всего рабочего диапазона частот.

Амплитуда ускоряющего напряжения

Вопрос о зависимости интенсивности пучка синхроциклотрона от амплитуды ускоряющего напряжения рассматривался во многих работах. Разные авторы дают несколько отличные друг от друга результаты, которые можно представить в виде

$$I = \alpha V^n,$$

где α – константа, а n – показатель степени, который находится в пределах от 2 до 3. В качестве основного фактора, определяющего зависимость интенсивности пучка от амплитуды ускоряющего напряжения, выступает наличие в центральной области ускорителя пространственного заряда, который из-за отсутствия вертикальной фокусировки в центральной области приводит к расталкиванию частиц в вертикальном направлении

и гибели части пучка на крышках дуанта. Влияние пространственного заряда особенно сильно сказывается при использовании системы с одним дуантом и открытым ионным источником. Чем больше амплитуда ускоряющего напряжения, тем больше приращение энергии протона на один оборот и тем быстрее ускоряемый протон покинет область действия пространственного заряда.

В хорошо известной работе К. Маккензи¹ проведена оценка интенсивности пучка синхроциклотрона с открытым ионным источником после прохождения пучком центральной области ускорителя и получена зависимость $I \sim V^3$. Оценка основана на предположении, что в центральной области ускорителя фокусировка за счет спадающего по радиусу магнитного поля отсутствует и возникает скачком на некотором радиусе.

В работе Дж. Лоусона² получена зависимость $I \sim V^{5/3}$, основанная на предположении, что магнитное поле вблизи центра ускорителя имеет параболический спад, следовательно, вертикальные магнитные фокусирующие силы действуют уже начиная с самых малых радиусов. Однако сделанная здесь оценка основана также на предположении о наличии с самого начала процесса ускорения щелевого набора энергии, поэтому полученный результат неприменим для синхроциклотрона с открытым ионным источником.

В указанных выше работах не учитывалась вертикальная фокусировка частиц за счет электрического поля дуантов. В работе С. Холма³ учтены оба типа вертикальной фокусировки ускоряемых частиц в центральной области: магнитная и электрическая. Здесь получена зависимость $I \sim V^2$. Однако в этой работе также используется предположение о щелевом наборе энергии.

Наиболее реалистичный результат для синхроциклотрона с открытым ионным источником получен в ЛЯП ОИЯИ, в Дубне^{4,5}. Здесь было показано, что для синхроциклотрона с открытым ионным источником справедлива зависимость $I \sim V^{5/2}$. В связи с этим для увеличения интенсивности ускоряемого пучка необходимо иметь величину амплитуды ускоряющего напряжения как можно больше. Поэтому все проекты реконструкции синхроциклотронов, проведенные, например, в ЦЕРН и ЛЯП ОИЯИ, были направлены в первую очередь на повышение амплитуды ускоряющего напряжения. Основным фактором, ограничивающим амплитуду ускоряющего напряжения в крупных синхроциклотронах, яв-

¹ Mackenzie K. R. // Nucl. Instrum. and Methods. 1964. V. 31. P. 139–146.

² Lawson J. D. // Nucl. Instrum. and Methods. 1965. V. 34. P. 173–174.

³ Holm S. // Nucl. Instrum. and Methods. 1968. V. 64. P. 317–322.

⁴ Данилов В. И. Вопросы повышения интенсивности и эффективности работы синхроциклотрона ОИЯИ. Дис. ... д. ф.-м. н. Дубна, 1969. 176 с.

⁵ Данилов В. И. и др. // Атомная энергия. 1966. Т. 21. Вып. 5. С. 402.

ляется электрическая прочность зазоров вариатора частоты. Необходимость иметь большое перекрытие по частоте ускоряющего напряжения приводит к необходимости иметь большое перекрытие по емкости вариатора частоты, а это, в свою очередь, приводит к необходимости иметь достаточно малые зазоры между рабочими пластинами вариатора. Обычно эти зазоры составляют величину порядка нескольких миллиметров и ограничивают амплитуду ускоряющего напряжения величиной 10–15 кВ.

Однако представляет интерес также и поиск других путей увеличения интенсивности пучка синхроциклотрона, не связанных с коренной реконструкцией его ВЧ-системы, изменением топографии магнитного поля и переходом к ионному источнику закрытого типа. Одним из таких путей для синхроциклотрона с открытым ионным источником является увеличение вертикальной фокусировки в центральной области, где дефокусирующие силы, вызванные наличием пространственного заряда, ограничивают интенсивность пучка ускорителя. Обычно для компенсации расталкивающего действия пространственного заряда в центральной области применяют магнитную и электростатическую фокусировки. Как показывает опыт ряда лабораторий, применение дополнительной магнитной фокусировки в центральной области путем повышения показателя спада магнитного поля из-за технических трудностей ее реализации не является эффективным и не приводит к существенному прогрессу в решении задачи увеличения интенсивности.

Для фокусировки протонов малой энергии в центральной области оказывается удобным использовать электростатическую фокусировку. В этом случае при сравнительно небольших напряжениях на электродах возможно получение фокусирующих сил, превышающих силы магнитной фокусировки в несколько раз. Дополнительным преимуществом электростатической фокусировки является возможность ее регулировки путем изменения потенциалов на электродах. Примером является фокусировка, возникающая от отрицательного напряжения смещения, подаваемого на дуант. На многих ускорителях отмечено повышение интенсивности при увеличении напряжения смещения. На синхроциклотроне ОИЯИ для формирования фокусирующего электрического поля в центральной области был введен дополнительный электрод, на который подавался отрицательный потенциал. Имеется сообщение об испытании такого электрода и на синхроциклотроне ЦЕРН. Электрод аналогичного типа использовался также и на синхроциклотроне ПИЯФ до середины 1977 года.

На синхроциклотроне ПИЯФ была разработана принципиально новая система формирования фокусирующего электростатического поля, обеспечивающая значительно большие фокусирующие силы. Такая система привела к существенному повышению интенсивности ускорителя, обеспечив интенсивность выведенного пучка 1 мкА [12–15].

Трехэлектродная фокусирующая система синхроциклотрона ПИЯФ

Принцип действия

Фокусирующее электростатическое поле в центральной области ускорителя создается с помощью специальных электродов. Основные требования к электростатическому полю и электродам можно сформулировать следующим образом:

- электрическое поле должно иметь максимально возможные вертикальные компоненты, обеспечивающие фокусировку к медианной плоскости на малых радиусах, где магнитная фокусировка мала;
- электрическое поле не должно возмущать движение частиц в горизонтальной плоскости, что может проявляться в появлении дрейфа центра орбит и нарушении процесса захвата в режим ускорения;
- расположение ионного источника и потенциал его анода должны выбираться такими, чтобы, с одной стороны, обеспечивалась эффективная работа источника, а с другой стороны, элементы конструкции источника и его плазменный шнур не приводили к существенному искажению электростатических полей системы.

Рассмотрим с точки зрения выполнения этих требований различные схемы введения фокусирующих электростатических сил. На рис. 7.15а в схематичном виде представлена электростатическая фокусировка от напряжения смещения в системе с одним дуантом. Можно видеть, что подача на дуант отрицательного потенциала смещения при определенной геометрии, в принципе, обеспечивает наличие фокусирующих составляющих электростатического поля E_z . Однако фокусирующие силы ограничены величиной напряжения смещения, которая обычно не превышает нескольких кВ и не может быть сильно увеличена из-за повышения напряжения на элементах радиочастотной системы.

На рис. 7.15б представлена схема фокусирующей системы синхроциклотрона ОИЯИ¹. В этом случае фокусирующие силы могут быть значительно выше, т. к. на дополнительный электрод подается напряжение $\sim (-15 \div -20)$ кВ. Несимметричное расположение дополнительного электрода обеспечивает наличие вертикальной составляющей и в центре магнитного поля синхроциклотрона.

¹ Данилов В. И. и др. // Атомная энергия. 1966. Т. 21. Вып. 5. С. 402.

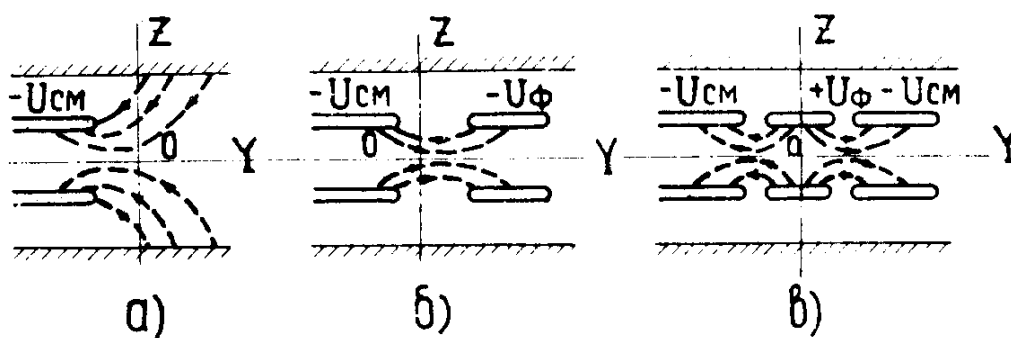


Рис. 7.15. Схемы электростатической фокусировки в центральной области синхроциклотрона:

а) фокусировка полем смещения дуанта; б) фокусировка, используемая на синхроциклотроне ОИЯИ; в) схема фокусировки синхроциклотрона ПИЯФ

Недостатком обеих систем является отсутствие центральной симметрии электростатических полей. Наличие горизонтальной составляющей электростатического поля, перпендикулярной кромке дуанта, приводит к смещению центров орбит от центра ускорителя за счет дрейфа в электрическом поле и, следовательно, к ухудшению качества пучка.

Новая схема электростатической фокусировки, предложенная в ПИЯФ и реализованная на СЦ-1000, представлена на рис. 7.15в. В этой схеме на дуант и боковой электрод подается отрицательное напряжение смещения, а на центральный фокусирующий электрод – высокий положительный потенциал. В новой системе фокусирующая сила значительно больше, а электрическое поле в центральной области обладает центральной симметрией относительно оси OZ , что исключает дрейф для центральных орбит. Электростатическое поле такой системы имеет обширную зону с замкнутыми эквипотенциалами, поэтому дрейф мгновенного центра для нецентральных орбит будет происходить вокруг центра ускорителя по траекториям, близким к эквипотенциалам.

Естественно, что необходимо учитывать наличие радиальной компоненты электрического поля, приводящей к изменению частоты обращения частиц. На практике это означает, что при введении фокусирующего по вертикали поля одновременно необходимо корректировать частотную программу ускоряющего напряжения.

Конструкция

На рис. 7.16 приведена принципиальная схема фокусирующей системы и расположение ее в камере ускорителя. В центральную область синхроциклотрона помещены: центральный фокусирующий электрод (1), имеющий форму вытянутого эллипса, и полукруглый боковой электрод (2). Каждый из электродов состоит из двух пластин, расположенных симметрично по отношению к медианной плоскости. Пластины цен-

трального электрода подключены к источнику положительного напряжения (11), а пластины бокового электрода – к источнику отрицательного смещения дуанта (10). Под пластинами центрального электрода находятся камеры (4) открытого ионного источника типа Пеннинга с холодными катодами (5). Катоды и аноды ионного источника объединены между собой попарно и подключены к блоку питания (9). Аноды ионного источника (4) при помощи переключателя (12) могут подключаться либо к земле, либо к пластинам фокусирующего электрода (1), реализуя две модификации подключения ионного источника. Основной, рабочей, модификацией является схема подключения конусов к пластинам фокусирующего электрода как обеспечивающая наибольший коэффициент захвата протонов в процессе ускорения. Все пластины электродов, а также аноды ионного источника заземлены по ВЧ-напряжению конденсаторами (6).

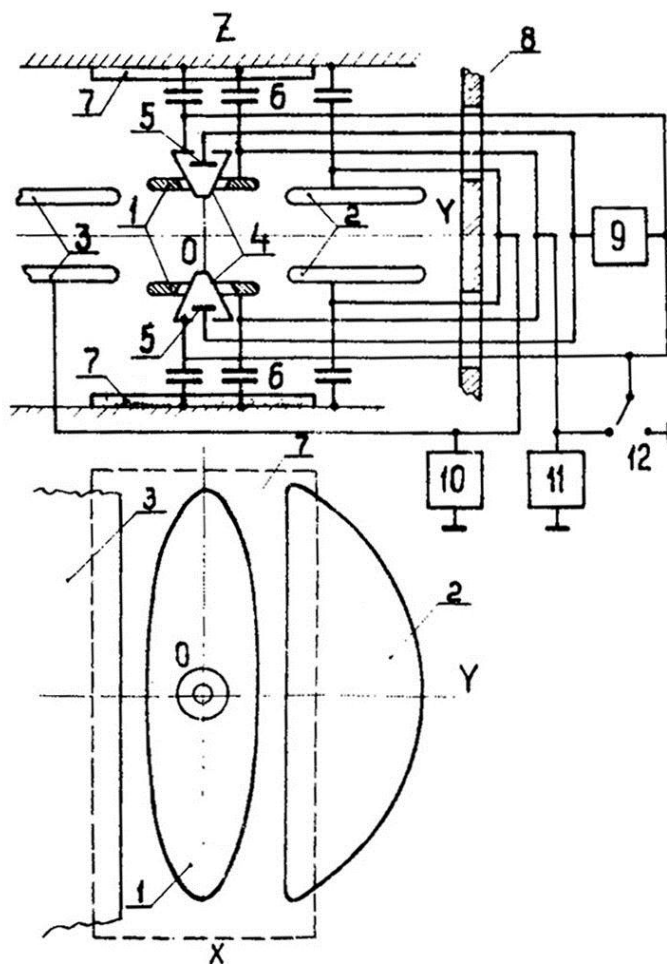


Рис. 7.16. Схема фокусирующей системы синхроциклотрона ПИЯФ: 1 – центральный фокусирующий электрод; 2 – боковой электрод; 3 – дуант; 4 – конусы ионного источника; 5 – катоды ионного источника; 6 – блокировочные конденсаторы; 7 – изоляторы; 8 – стенка вакуумной камеры; 9 – блок питания ионного источника; 10 – источник напряжения смещения дуанта; 11 – блок питания фокусирующего электрода; 12 – переключатель режима работы

На рис. 7.17 приведен чертеж верхней половины центрального электрода и ионного источника, а на рис. 7.18 – фотография фокусирующего устройства в собранном виде. Легкосъемная конструкция центрального электрода позволяет производить быструю замену электрода при проведении работ по оптимизации его геометрии. Электрическая коммутация пластин электродов производится снаружи камеры, что позволяет быстро диагностировать неисправности фокусирующего устройства без вскрытия вакуумной камеры ускорителя. Пластины всех электродов, а также камеры ионного источника охлаждаются при помощи тепловых труб, выполненных из кварцевого стекла с заполнением жидким неполярным диэлектриком. Для охлаждения элементов нижней части фокусирующей системы эти тепловые трубы подключены при помощи дополнительных тепловых мостиков, подводящих тепло к каждой из труб снизу и отводящих его сверху.

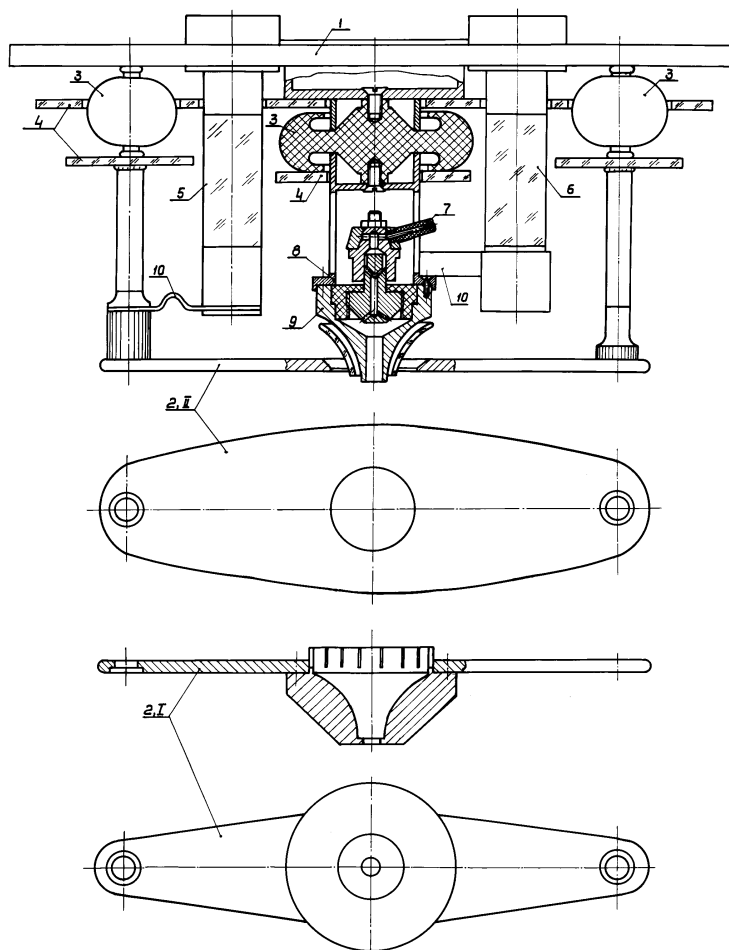


Рис. 7.17. Конструкция верхней половины фокусирующего электрода и ионного источника:

1 – основание; 2 – пластины фокусирующего электрода; 3 – конденсаторы типов К15У-1-100 и К15У-1-470; 4 – стеклянные изоляторы; 5, 6 – тепловые трубы; 7 – штуцер подачи газа; 8 – катод ионного источника; 9 – конус ионного источника; 10 – тепловые мостики



Рис. 7.18. Фокусирующее устройство в собранном виде

Использование фокусирующего устройства показало, что конструкция выдерживает длительную эксплуатацию и без охлаждения, поэтому впоследствии тепловые трубы были демонтированы.

Схема питания и управления

Согласно принципу действия трехэлектродной схемы электростатической фокусировки (рис. 7.15в) на центральный электрод необходимо подавать большой положительный потенциал. Однако, как известно, около любых электродов, находящихся под положительным потенциалом в вакуумной камере синхроциклотрона, при наличии магнитного поля возникает разряд Пеннинга. Этот разряд не только сильно нагружает источник положительного потенциала фокусирующего электрода, но и может приводить к искажению распределения электростатического поля. Для уменьшения мощности источника и нагрева электродов выбрана импульсная схема питания.

Электрическая схема питания фокусирующей системы приведена на рис. 7.19, а на рис. 7.20 показаны диаграммы основных напряжений и синхроимпульсов, поясняющие ее работу. Импульсный источник питания фокусирующего электрода (IV) обеспечивает следующие параметры импульса при отсутствии газа в ионном источнике: амплитуда $U_{\phi} \leq +25$ кВ, длительность импульса на уровне $0,9U_{\max} - 200$ мкс и на уровне $0,5U_{\max} \sim 1$ мс, ток в импульсе $\leq 0,1$ А. Импульс синхронизирован с частотной программой ускорителя.

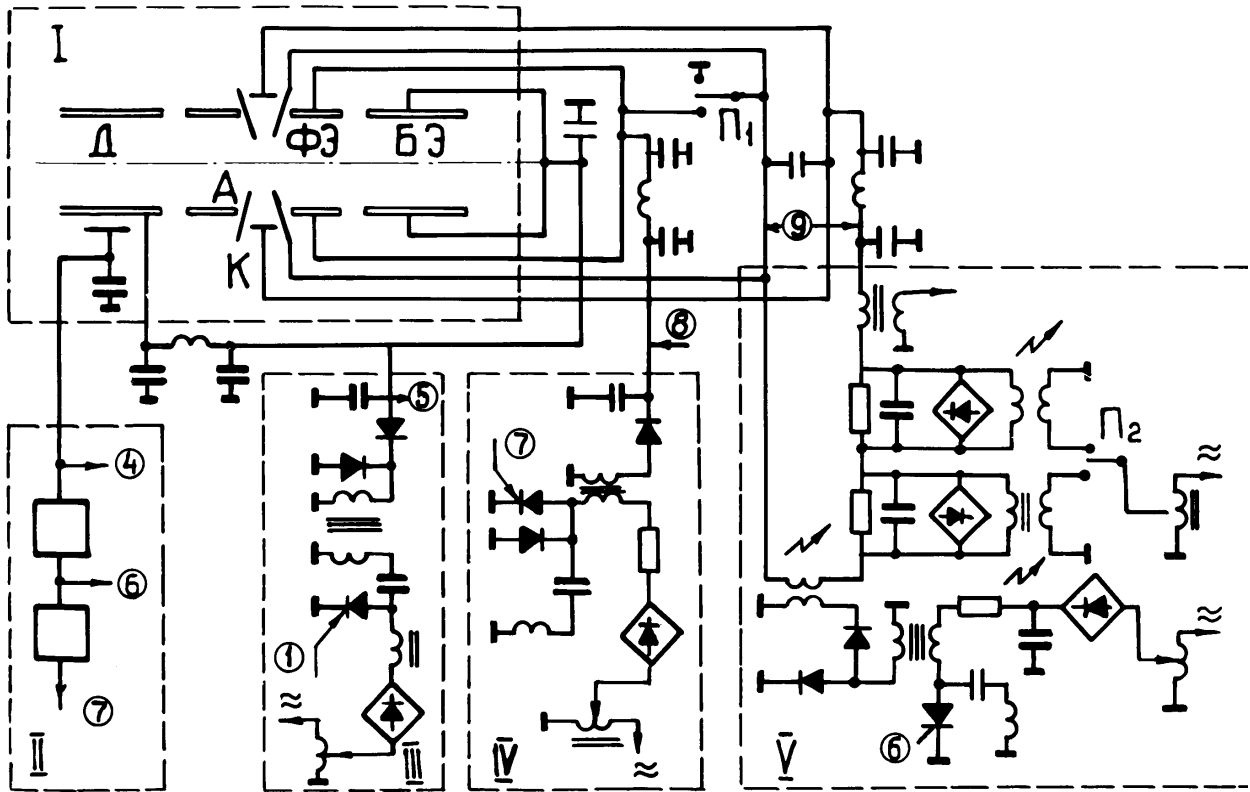


Рис. 7.19. Схема электропитания фокусирующего устройства:

I – камера; II – блок синхронизации с ВЧ-программой; III – источник смещения дуанта; IV – блок питания фокусирующего электрода; V – блок питания ионного источника

Для подачи смещения на дуант и боковой электрод используется принцип подзаряда емкости дуант – земля импульсами отрицательной полярности от источника (III) перед началом каждого цикла ускорения. Такой способ питания дуанта принят с целью автоматического снятия напряжения смещения с ВЧ-системы при возникновении в ней пробоев. При пробое происходит быстрый разряд емкости дуант – земля и автоматический срыв генерации на оставшуюся часть цикла ускорения.

Блок питания (V) позволяет регулировать постоянное напряжение между анодом и катодом ионного источника в пределах ± 300 В. Последовательно с источником постоянного напряжения включен импульсный источник с регулируемой амплитудой до -1 кВ и длительностью $\sim 0,5$ мс. Одновременная подача отрицательного импульсного и положительного постоянного напряжений (рис. 7.20) позволяет получать от ионного источника большие токи в интервале захвата и надежно закрывать его на все остальное время ускорения.

Синхронизация с ВЧ-программой ускорителя осуществляется блоком (II).

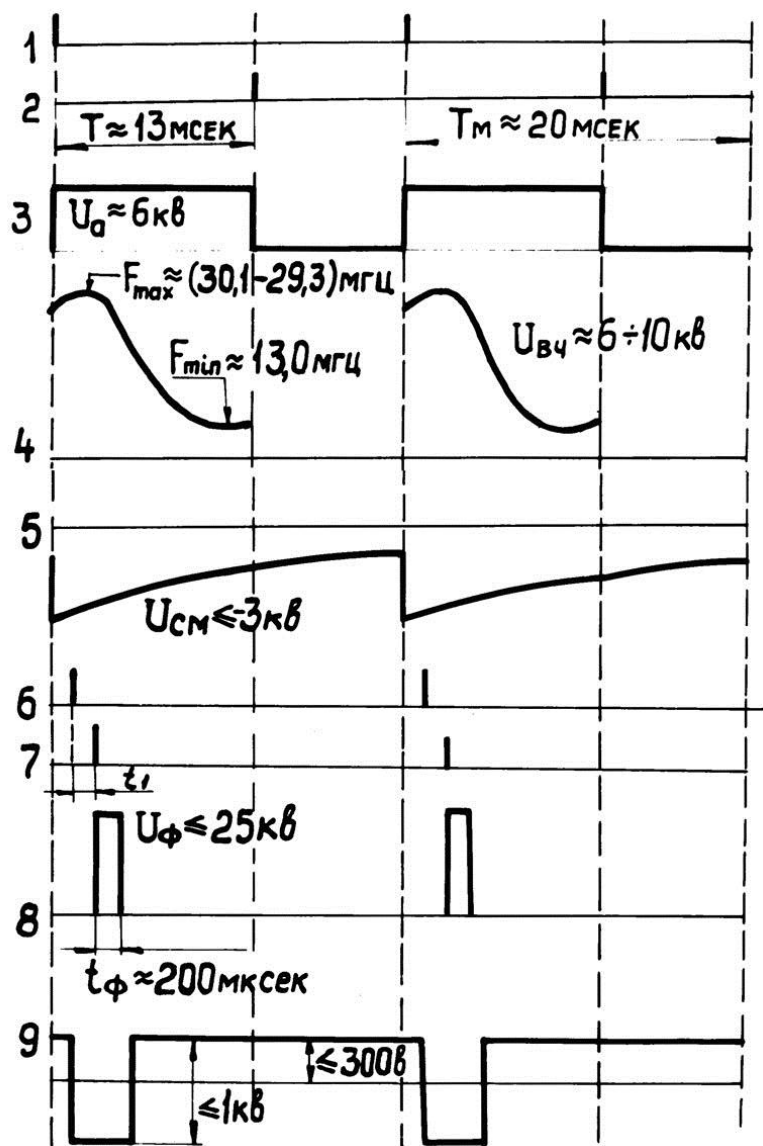


Рис. 7.20. Диаграмма напряжений:

1, 2 – импульсы включения и выключения ВЧ-программы; 3 – амплитуда напряжения на аноде ВЧ-генератора; 4 – частотная программа; 5 – импульс смещения дуанта; 6, 7 – импульсы синхронизации включения напряжения на фокусирующий электрод; 8 – импульс фокусирующего электрода; 9 – напряжение на катоде ионного источника

Распределение электрических полей в центральной области синхроциклотрона

Распределение электрических полей изучалось путем моделирования центральной области ускорительной камеры совместно с дуантом, боковым и фокусирующим электродами и ионным источником в электролитической ванне. При изучении распределения статических полей плазма дуги ионного источника моделировалась металлическим стержнем, диаметр которого соответствовал диаметру отверстия в аноде источника, а потенциал равнялся потенциалу анода. Для ускоряющего ВЧ-поля при-

нималось, что плазма ионного источника не влияет на его пространственное распределение.

Геометрия пластин центрального электрода изображена на рис. 7.17. Длина пластин – 260 мм, расстояние между пластинами по вертикали составляет 180 мм (между конусами – 100 мм). Апертура дуанта и бокового электрода, а также расстояние между ними – 120 мм. Диаметр центрального отверстия конуса ионного источника – 8 мм.

На рис. 7.21 представлено распределение статического потенциала в медианной плоскости при напряжении на фокусирующем электроде $U_{\phi} = +15$ кВ и напряжении смещения на дуанте и боковом электроде $U_{см} = -3$ кВ. Пунктиром показаны границы электродов.

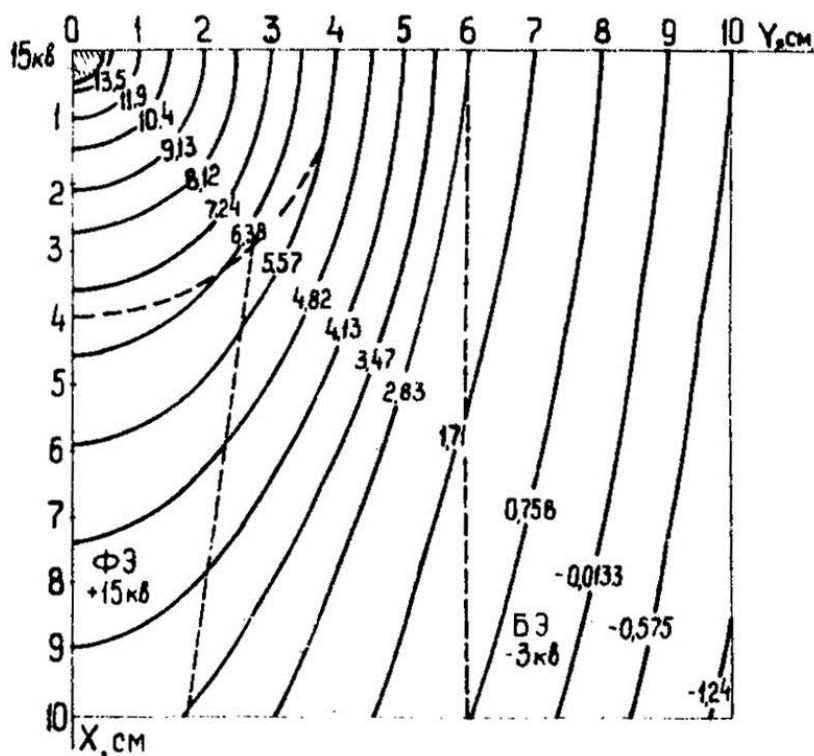


Рис. 7.21. Распределение потенциала электростатического поля в медианной плоскости

На рис. 7.22 показано распределение вертикальной составляющей электростатического поля E_z для вертикальных плоскостей ZOX и ZOY . На рис. 7.23 приведена зависимость от радиуса показателя спада магнитного поля n и эффективного значения $n_{эл.}$ для медианной плоскости ускорителя, а также сумма $n + n_{эл.}$

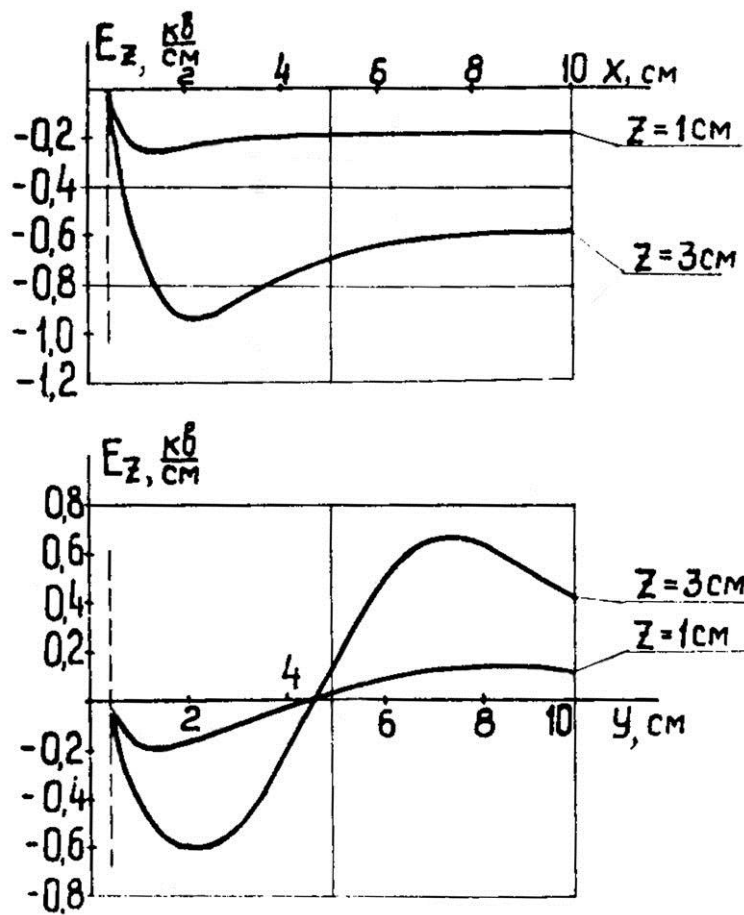


Рис. 7.22. Распределение вертикальных компонент напряженности электростатического поля

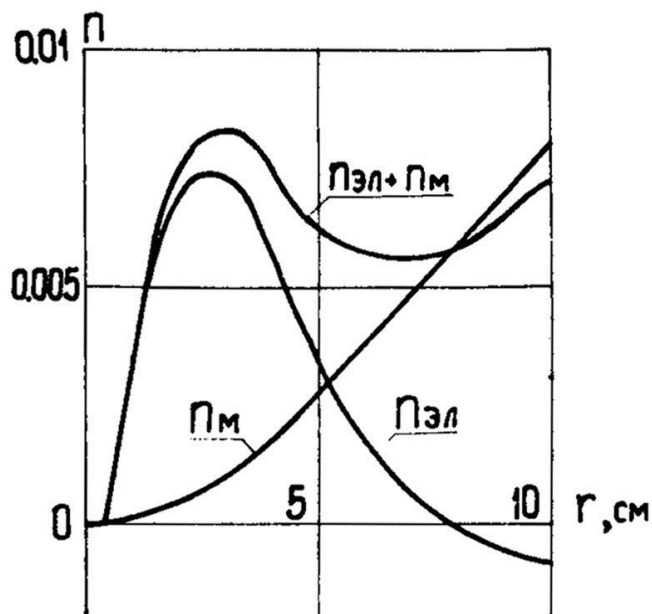


Рис. 7.23. Зависимость показателя спада магнитного поля и эффективного показателя спада электростатического поля $n_{эл}$ от радиуса

Из рис. 7.21–7.23 видно, что электростатическое поле системы вблизи центра ускорителя обладает замкнутыми эквипотенциалами с центральной симметрией, приближающейся к круговой для малых радиусов, а область фокусирующего действия этого поля простирается до радиусов ~ 8 см. Распределение составляющих E_x и E_y по радиусу для плоскостей ZOX и ZOY приведено на рис. 7.24.

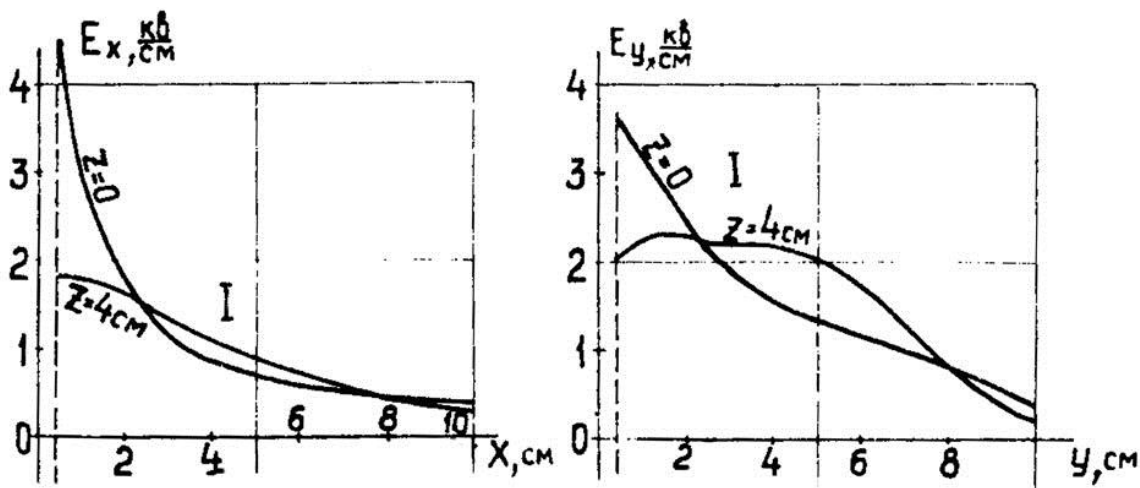


Рис. 7.24. Распределения горизонтальных компонент электростатического поля в плоскостях ZOX и ZOY

Измерения распределений ВЧ электрического поля показало, что установка фокусирующего электрода не приводит к его существенному изменению.

Корректировка частотной программы

Наличие больших величин горизонтальных составляющих электростатических полей (рис. 7.24) приводит к существенному изменению зависимости частоты обращения протона от радиуса. В связи с этим оказалось необходимым предусмотреть возможность оперативной корректировки формы частотной программы ускорителя $f(t)$ вблизи области захвата. Для этой цели были установлены специальные триммерные конденсаторы, подключенные к задней части дуанта. Управление конденсаторами производится дистанционно с пульта управления синхроциклотрона. Место подключения триммерных конденсаторов выбрано таким образом, чтобы изменение формы частотной программы осуществлялось только на начальном этапе цикла ускорения. При увеличении емкости конденсаторов происходит уменьшение максимальной резонансной частоты ВЧ-системы f^{\max} , и диапазон частот захвата сдвигается в область с меньшими значениями производной df/dt .

Такой способ корректировки частотной программы эквивалентен способу изменения df/dt во время захвата путем изменения величины магнитного поля ускорителя. В этом случае область захвата также перемещается относительно кривой $f(t)$ за счет изменения частот обращения, что приводит к изменению производной. В синхроциклотроне ПИЯФ этот способ корректировки может быть использован только при работе с внутренним пучком, т. к. при изменении магнитного поля требуется перестройка системы вывода.

Экспериментальные результаты

Влияние фокусирующей системы на интенсивность выведенного пучка

Экспериментальные результаты были получены при обычном эксплуатационном режиме синхроциклотрона.

На рис. 7.25 (кривая *a*) приведена относительная величина интенсивности выведенного пучка синхроциклотрона I/I_0 в зависимости от напряжения, подаваемого на пластины фокусирующего электрода. Величина $I_0 = 0,08$ мкА соответствует следующим параметрам ускорителя: напряжение на фокусирующем электроде $U_\phi = 0$, напряжение смещения на дуанте и боковом электроде $U_{см} = -2$ кВ, напряжение анод – катод ионного источника $U_{АК} = +100$ В, магнитное поле в центре ускорителя $B_0 = 1,928$ Т и максимальная частота частотной программы ускорителя $f_1^{max} = 30,1$ МГц.

При увеличении напряжения U_ϕ до ~ 6 кВ наблюдается повышение интенсивности выведенного пучка \sim в 4,5 раза. Однако рост напряжения U_ϕ приводит к уменьшению интенсивности, что можно объяснить влиянием радиальной составляющей электростатического поля на радиально-фазовое движение при увеличении U_ϕ .

На рис. 7.25 (кривые *б, в*) приведены зависимости интенсивности выведенного пучка от U_ϕ при $f_2^{max} = 29,7$ МГц и $f_3^{max} = 29,5$ МГц. Такая корректировка формы частотной программы в сторону уменьшения производной df/dt приводит к повышению интенсивности до 8,5 раз и продвижению в область более высоких значений U_ϕ .

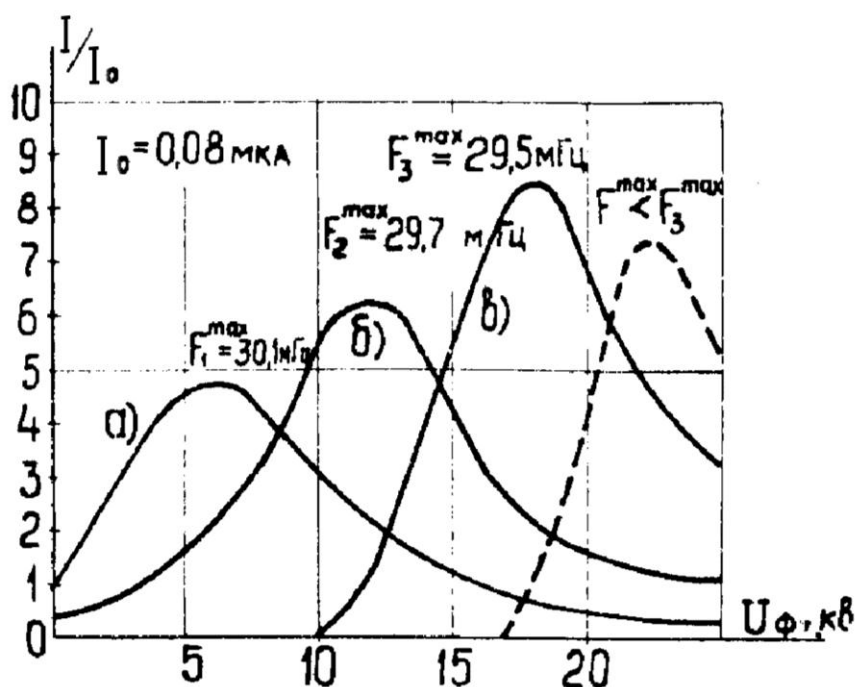


Рис. 7.25. Зависимость интенсивности выведенного пучка от величины фокусирующего напряжения

Значение $f_3^{\max} = 29,5$ МГц является оптимальным. Дальнейшее уменьшение f^{\max} и увеличение U_ϕ приводит уже к меньшим значениям интенсивности пучка. Это может быть объяснено тем обстоятельством, что при больших значениях U_ϕ и, следовательно, при больших величинах радиальной составляющей электростатического поля в центральной области имеет место несогласованность формы частотной программы и зависимости частоты обращения протона от радиуса.

Полностью идентичное (рис. 7.25) семейство зависимостей интенсивности пучка синхроциклотрона от напряжения фокусирующего электрода получается и для случая корректировки частотной программы путем изменения величины магнитного поля B . На рис. 7.26 приведена зависимость относительной интенсивности внутреннего пучка I/I_0 , измеренная на радиусе 293 см, от величины магнитного поля синхроциклотрона при настройке U_ϕ на оптимум для каждого данного значения поля. Здесь же показано значение оптимальной величины напряжения на фокусирующем электроде, при котором было получено соответствующее значение интенсивности. Значение интенсивности $I_0 = 0,27$ мкА получается при $U_\phi = 0$, $U_{cm} = -2$ кВ, $B_0 = 1,928$ Т, $f_1^{\max} = 30,1$ МГц. На этом же рисунке показано изменение интенсивности внутреннего пучка синхроциклотрона при $U_\phi = 0$. Видно, что при отсутствии фокусирующего напряжения интенсивность внутреннего пучка в широких пределах не зависит от вели-

чины магнитного поля и, следовательно, от производной df/dt на начальном этапе ускорения.

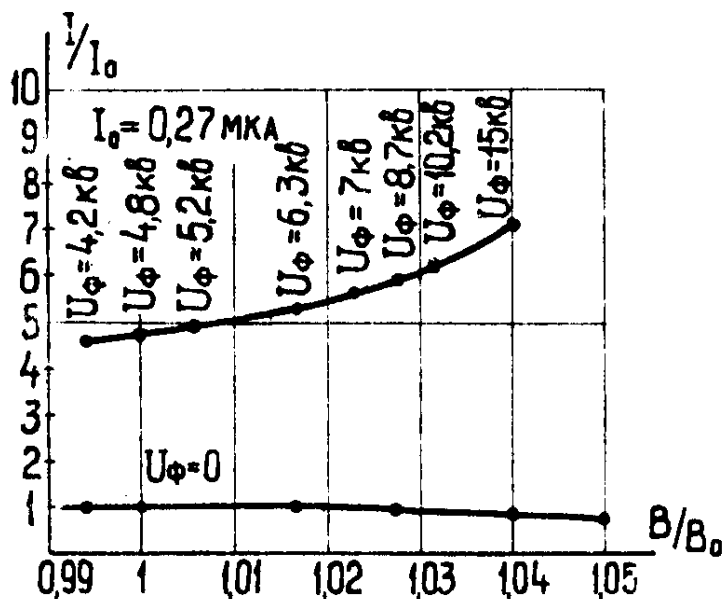


Рис. 7.26. Зависимость интенсивности внутреннего пучка от величины индукции магнитного поля

Влияние электростатического поля на захват

Для того чтобы детально понять причину повышения интенсивности за счет коррекции частотной программы, было произведено экспериментальное исследование процесса захвата. Определение частотных границ диапазона захвата при различных режимах работы ускорителя производилось методом задержки включения ВЧ-генератора и измерения происходящего при этом уменьшения интенсивности пучка синхроциклотрона.

Остановимся подробнее на зависимостях кривых *б* и *в* (рис. 7.25). Обращает на себя внимание тот факт, что при отсутствии напряжения на фокусирующем электроде ($U_\phi = 0$) величина интенсивности синхроциклотрона становится либо меньше I_0 , либо полностью равна 0. Так, например, при $f_2^{\max} = 29,7$ МГц интенсивность выведенного пучка I становится равной $0,4I_0$. Такое уменьшение интенсивности происходит за счет обрезания интервала захвата, т. к. в программе генератора $f(t)$ при $f_2^{\max} = 29,7$ МГц отсутствует часть необходимых частот для перекрытия всего диапазона захвата.

При $f_3^{\max} = 29,5$ МГц и $U_\phi = 0$ интенсивность ускорителя равна нулю, т. к. в программе ВЧ-генератора полностью отсутствуют необходимые для захвата значения частот.

При подаче напряжения на фокусирующий электрод ($U_\phi \neq 0$) граничные частоты диапазона захвата определяются не только величиной

магнитного поля ускорителя, но и радиальной составляющей электрического поля, образованного фокусирующей системой. При увеличении U_ϕ диапазон захвата сдвигается в сторону более низких частот, и тогда становится возможным получение интенсивности. Так, например, на рис. 7.25 (кривая ϵ) видно, что при $f_3^{\max} = 29,5$ МГц появление отличной от нуля интенсивности становится возможным лишь при напряжении на фокусирующем электроде ≥ 10 кВ.

Таким образом, увеличение интенсивности и возможность продвижения в область больших значений U_ϕ при коррекции частотной программы, как отмечалось выше, действительно связано с согласованием как по начальным частотам захвата, так и по величине производной в диапазоне захвата. В пользу этого утверждения говорит также следующий экспериментальный факт. Величина интенсивности синхроциклотрона изменяется в зависимости от того, находится ли область захвата на плоской части вершины импульса фокусирующего электрода или же на одном из его склонов при одной и той же величине мгновенного значения напряжения, соответствующего середине диапазона захвата f_0 . Так, при расположении области захвата на переднем фронте импульса $U_\phi(t)$ интенсивность увеличивается на 10–15 %, а при работе на заднем фронте примерно настолько же падает по сравнению с расположением захвата на плоской части вершины импульса. Увеличение интенсивности на переднем фронте связано, по-видимому, с дальнейшей оптимизацией закона изменения $f(t)$ в районе диапазона захвата за счет изменения во времени амплитуды $U_\phi(t)$.

В ноябре 1978 года интенсивность выведенного пучка синхроциклотрона ПИЯФ была доведена до 1 мкА, а внутреннего пучка – до 3,5 мкА, при этом число протонов, ускоряемых за один цикл, достигло величины $4 \cdot 10^{11}$ в импульсе, что находится на уровне интенсивностей, запланированных при реконструкции синхроциклотронов ЦЕРН и Колумбийского университета.

Достигнутое увеличение интенсивности нельзя считать предельно возможным для данного метода фокусировки. Продвижение в область более высоких интенсивностей, по-видимому, возможно за счет дальнейшей оптимизации геометрии электродов и подбора более оптимального соотношения между формой спада магнитного поля в центральной области и формой начальной части частотной программы.

При рассмотрении перспектив использования данной схемы на других синхроциклотронах следует учитывать тот факт, что синхроциклотрон ПИЯФ из-за высокой предельной энергии 1 ГэВ и связанной с этим большой сложностью ВЧ-системы имеет относительно малую величину амплитуды ускоряющего напряжения (8–10 кВ). Кроме того, ускорение протонов

до энергии 1 ГэВ требует большего времени ускорения (~ в 1,8 раза), чем, например, синхроциклотрон ЦЕРН или Дубны. По этой причине частота модуляции составляет всего 50 Гц.

Использование предложенной схемы на синхроциклотронах с более высоким ускоряющим напряжением (~ 15 кВ) и частотой повторения ~ 150 Гц может, по-видимому, обеспечить интенсивность внутреннего пучка на уровне 10–20 мкА. На устройство фокусирующей системы было получено авторское свидетельство [12].

Заметим также, что продолжение программы по дальнейшему увеличению интенсивности пучка синхроциклотрона ПИЯФ было признано нецелесообразным. При увеличении интенсивности выведенного пучка больше 1 мкА и, следовательно, увеличении радиационной нагрузки на оборудование и персонал пришлось бы переходить на использование дистанционных манипуляторов при обслуживании систем синхроциклотрона.

7.4. Система стабилизации тока в магнитных элементах трактов транспортировки пучков и система компьютерного управления (комплекс систем стабилизации КСС-3)

Блок-схема КСС-3

В ускорителях заряженных частиц с постоянным магнитным полем типа циклотрон, синхроциклотрон и т. п. значительную долю электро-технического оборудования составляют источники стабилизированного питания постоянным током как самих обмоток ускорителя, так и электромагнитов и линз для трактов транспортировки его пучков [16–18].

На синхроциклотроне ПИЯФ все магнитные элементы (МЭ) трактов транспортировки пучков запитаны от электромашинных агрегатов постоянного тока, которые с 1970 года и до сих пор находятся в непрерывной эксплуатации.

В настоящее время для реализации 8 направлений пучков используется 76 МЭ, питаемых от 43 генераторов постоянного тока с 43 системами стабилизации (СС). Тракты транспортировки пучков komponуются из квадрупольных линз типов МЛ-17, 10К-50, 20К-25, 20К-25А, 20К-50 и электромагнитов СП-35, СП-40Б, СП-53, СП-56, СП-57, СП-72. Используются также нестандартные МЭ в качестве магнитов-корректоров горизонтального и вертикального отклонений пучка, выполненные на основе полупроводниковых источников постоянного тока, управляемых по принципу широтно-импульсной модуляции.

Так как переход на современные источники питания, адаптированные к ЭВМ, например, ИСТ (Россия), PS (Словакия) и т. п. требует значительных материальных затрат, то представляет интерес опыт модернизации электромашинных СС с целью улучшения их эксплуатационных характеристик и полной автоматизации с возможностью управления и контроля через терминалы автоматизированной системы управления (АСУ) ускорителя [19], в том числе через стандартные средства Интернета.

Настоящий раздел посвящен третьей модернизации – КСС-3 и включает описание подсистемы АСУ синхроциклотрона ПИЯФ, предназначенной для контроля и управления СС токов в магнитах и линзах трактов транспортировки заряженных пучков ускорителя. КСС-3 управляется и контролируется как в ручном режиме, так и по локальной сети с использованием ПК [20–24].

Функциональная блок-схема одной из 43-х СС приведена на рис. 7.27. Остальные СС подключены к общим магистральным цепям управления и контроля аналогичным образом.

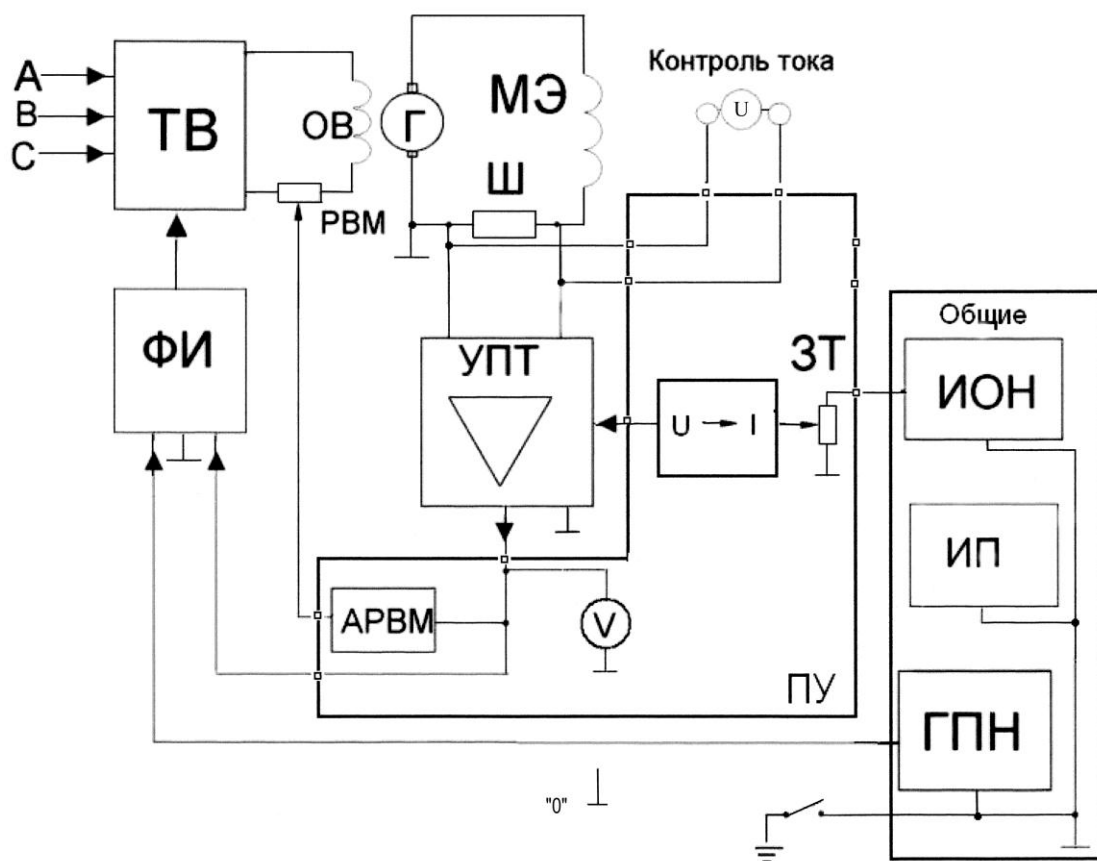


Рис. 7.27. Блок-схема одной из СС (в ручном режиме управления)

Каждая из СС выполнена по обычной схеме авторегулирования с обратной связью (ОС) по величине тока, питающего МЭ, и включает в себя следующие основные блоки:

МЭ – магнитный элемент (поворотный электромагнит, фокусирующая линза, соленоид и т. п.);

Г – генератор постоянного тока электромашинного агрегата, к которому подключается МЭ;

ПУ – пульт ручного управления и контроля за СС;

ОВ – обмотка возбуждения генератора Г;

ТВ – управляемый трехфазный тиристорный выпрямитель для питания ОВ;

Л – схема управления работой ТВ;

РВМ – реостат для независимой регулировки величины тока возбуждения;

АРВМ – блок автоматического управления приводом РВМ;

УБС – устройство блокировки сигнализации;

БЗ – блок защиты;

Ш – токовый шунт, используемый в качестве датчика ОС;

УПТ – усилитель сигнала ошибки (усилитель постоянного тока);

U – напряжение шунта;

ΔU – вольтметр, контролирующий выходное напряжение УП (сигнал рассогласования);

ЗТ – задатчик величины стабилизируемого тока в МЭ (многооборотный потенциометр типа «Гелипот» – в режиме ручного управления, ЦАП – в режиме автоматического управления);

V – вольтметр, контролирующий выходной сигнал УПТ;

МП – микропроцессор.

Все СС объединены в единый комплекс и постоянно подсоединены к общим магистральным шинам питания, управления и контроля. Общими блоками для всех СС являются:

ГПН – источник пилообразного трехфазного напряжения 50 Гц для фазоимпульсного управления ТВ;

ИОН – источник высокостабильного опорного напряжения;

ИП – источники питания полупроводниковой аппаратуры, релейных и сигнальных элементов, БЗ, стойки крейтов КАМАК для автоматизированного управления и т. п.

ФИ – блок формирования импульсов.

При построении КСС-3 сохранены идеология и функциональная структура КСС-2, описанная в [23], при этом большинство блоков модифицированы и переведены на новую элементную базу.

Технические характеристики схемы КСС-3

1. В зависимости от типа и характеристик МЭ:
 - максимальные токи I_{\max} МЭ 62–1 560 А;
 - максимальные напряжения U_{\max} МЭ 30–220 В;
 - постоянная времени t МЭ 0,1–3 с;
 - диапазон регулирования тока 100 % (от 0 до I_{\max}).
2. В зависимости от типа и характеристик генераторов Г:
 - максимальные токи I_{\max} генератора Г 91,5–5 800 А;
 - максимальные напряжения U_{\max} Г 65–220 В;
 - максимальные токи I_{\max} ОВ 3,56–70 А;
 - максимальные напряжения U_{\max} ОВ 115–500 В;
 - постоянная времени T ОВ 0,1–0,3 с.
3. Максимальное напряжение отвода шунта $U_{\text{ш}}$ 2,2 В.
4. Напряжение ИОН $U_{\text{он}}$ +2,35 В.
5. Диапазон преобразователя ($U-I$) 0–4,4 мА.
6. Сопротивление нагрузки преобразователя ($U-I$) 499 Ом.
7. Динамический диапазон выходного напряжения УПТ ± 10 В.
8. Коэффициент усиления УПТ на постоянном токе $\approx 50\,000$.
9. Частота среза коэффициента усиления УПТ 1,3 Гц.
10. Диапазон ГПН ± 10 В.
11. Угол включения ТВ 90° .
12. Чувствительность астатической цепи РВМ (АРВМ) $\pm 0,5$ В.
13. Напряжения: УПТ ± 12 В; ГПН и платы ТВ ± 12 В; ПУ +24 В.
14. Относительная ошибка стабилизации тока 10^{-3} – 10^{-4} .

Принцип работы КСС-3

Все СС работают в режиме как ручного, так и автоматизированного управления и контроля. Ручное управление системами осуществляется с ПУ, размещенных в общих монтажных стойках в измерительном зале корпуса синхроциклотрона. Там же находится крейт с необходимой аппаратурой связи и контроля для работы в автоматическом режиме с использованием ПК и институтской сети связи.

При ручном управлении при помощи ПУ производится: включение – выключение СС, выбор и переключение полярности, установка и регулировка величины тока в МЭ, а также контроль величины напряжения на шунте и контроль выходного напряжения УПТ (вольтметр V).

В ручном режиме (рис. 7.27) для каждой из СС на вход УПТ поступает напряжение с шунта и часть опорного напряжения от эталонного ИОН, величина которого определяется ЗТ. В качестве ЗТ используется многооборотный потенциометр типа ППМЛ, расположенный в ПУ. Сиг-

нал рассогласования между этими напряжениями (сигнал ошибки) увеличивается УПТ и через схему управления ФИ подается на вход управляемого ТВ, осуществляющего авторегулировку тока возбуждения генератора Г и, следовательно, тока в МЭ.

Астатизм системы достигается за счет введения второй цепи ОС по знаку рассогласования (знаку ошибки). При напряжении $\pm 0,5$ В на выходе УПТ включается дополнительная цепь ОС с выхода УПТ через блок АРВМ к приводу РВМ. В зависимости от знака ошибки производится перемещение движка РВМ в сторону отработки статической ошибки рассогласования. Отключение привода реостата происходит в момент, когда выходное напряжение УПТ становится равным нулю. Такое гистерезисное автоуправление используется не только для ограничения величины статической ошибки, но и для автоматического вывода системы на плато стабилизации при включении или перенастройке величины стабилизируемого тока.

При инвертировании полярности тока питания в МЭ синхронно изменяется полярность тока в ОБ и полярность входного сигнала ОС на входе УПТ. Соответствующие коммутирующие элементы (контакторы и реле) на схеме не показаны.

Величина напряжения ОС с шунта при номинальном токе стабилизации $I_{\text{ном.}}$ в МЭ – 2,2 В. Схема сравнения напряжений опоры и шунта позволяет перекрыть весь диапазон стабилизируемых токов $0-I_{\text{ном.}}$ при сохранении величины абсолютной ошибки стабилизации. Точковый шунт имеет несколько отводов, переключением которых можно компенсировать уменьшение напряжения ОС при переходе к величинам стабилизируемых токов $\leq 0,5I_{\text{ном.}}$, уменьшая тем самым относительную ошибку стабилизации. Переключение отводов шунта производится через однофазные тиристорные переключатели с централизованного пульта коммутации и питания систем электроэнергией.

Описание блоков КСС-3

При конструировании КСС-3 особое внимание было обращено на повышение надежности эксплуатации, т. к. выход из строя одной из СС приводит к остановке работы синхроциклотрона на физический эксперимент.

Все блоки комплекса стандартизированы и конструктивно выполнены в модульном исполнении, позволяющем быстро производить их замену. Объединение СС в единый комплекс с использованием общих блоков питания, управления и контроля позволило снизить количество аппаратуры и повысить надежность эксплуатации. Все общие блоки дублированы и имеют резервное переключение.

Ниже приведено краткое описание отдельных устройств, входящих в КСС-3.

Усилитель постоянного тока – УПТ

В цепи ОС для усиления сигнала рассогласования применен УПТ, выполненный по схеме дифференциального усилителя постоянного тока на основе интегральной микросхемы мА А725.

С целью упрощения обслуживания и взаимозаменяемости блоков все УПТ стандартизированы по коэффициентам усиления и частотной коррекции. Коэффициент усиления – $5 \cdot 10^3$. Полоса пропускания УПТ ограничена частотой 1 кГц, а ниже частоты среза 0,3 Гц осуществлен подъем коэффициента усиления 6 дБ на октаву. На нулевой частоте УПТ имеет коэффициент усиления, близкий к паспортному значению микросхемы, $\approx 50 \cdot 10^3$.

С целью максимизации коэффициента соотношения сигнал – шум на измерительном входе микросхемы все УПТ, выполненные в блочном исполнении, располагаются непосредственно на шунтах. Для устранения влияния наводок, ВЧ- и импульсных помех опорный вход микросхемы УПТ защищен LC-фильтром и преобразователем $I-U$ опорного тока в опорное напряжение. Коэффициент преобразования равен 0,5 В/мА, а входное эквивалентное сопротивление на постоянном токе близко к нулю. С этой же целью нулевой провод (\perp) для всех систем выполнен в виде изолированной шины сечением 5 мм² и заземлен только в одной точке K (рис. 7.27). Такая компоновка УПТ позволила обойтись без применения экранированных проводов в подводящих цепях, несмотря на значительную удаленность отдельных элементов СС друг от друга.

Выход УПТ контролируется ноль-прибором визуального контроля, сигнализирующим о нахождении системы в пределах плато стабилизации.

Тиристорный выпрямитель – ТВ

Предназначен для питания ОВ генераторов Г, соответствующих СС. Ток питания – 10–20 А, напряжение питания – 115–500 В. ТВ представляет собой сетевой (3 × 50 Гц) источник тока, управляемый фазоимпульсным способом. Величина тока ТВ регулируется за счет смещения фазы подачи поджигающих тиристоры импульсов.

Формирование этих импульсов происходит в блоке ФИ в моменты сравнения выходного напряжения УПТ с трехфазным пилообразным напряжением, вырабатываемым в общем блоке ГПН. Все СС работают вблизи фазового угла включения $\pi/2$, где коэффициент усиления (преобразования) ТВ имеет максимальное значение независимо от заданной величины стабилизируемых в МЭ токов, т. е. при постоянном значении выходного напряжения ТВ и соответствующем положении движка бал-

ластного РВМ, что достигается введением второй цепи ОС и блоком автоматического управления приводом АРВМ.

Для питания ТВ используются трехфазные анодные трансформаторы соответствующего номинала. Так как все СС объединены в единый комплекс и имеют один рабочий ГПН, то все анодные трансформаторы сфазированы одинаковым образом (АВС).

Пульт управления – ПУ

Предназначен для управления СС в ручном режиме. Выполненные в виде отдельных блоков, ПУ всех СС скомпонованы в общей стойке и территориально находятся в измерительном зале синхроциклотрона, что позволяет физикам-экспериментаторам вмешиваться в режим работы СС. Все ПУ взаимозаменяемы.

В ручном режиме с ПУ возможно осуществлять следующие операции: включение – выключение СС, выбор и переключение полярности, установку величины регулируемого тока.

Для визуального контроля выведены сигналы готовности СС к включению (наличие электропитания, охлаждающей воды, отсутствие постоянного заземления и т. п.), а также сигналы аварийного отключения при возрастании тока $\geq I_{\max}$ при аварийном заземлении и т. п. На ПУ находится также вольтметр V для контроля выхода УПТ и клеммы U для подключения выносного измерителя к шунту.

ПУ является также общим коммутационным узлом для подключения всех остальных модулей (блоков) КСС-3 к магистральным шинам общих блоков питания и контроля, в том числе ЭВМ. Логическая схема коммутации ПУ, схема УБС выполнены без использования электромеханических реле на высокопороговых микросхемах серии 561, транзисторах и светодиодах и исключают аварийную ситуацию при любых неправильных операциях ручного управления.

Блок защиты – БЗ

Так как все СС объединены в единый комплекс и постоянно кондуктивно соединены с общей нулевой шиной, то особое внимание было уделено предупреждению аварийных ситуаций при постороннем (случайном) заземлении любой из цепей СС.

Особенное значение приобретают случаи такого заземления токоведущих проводов питания МЭ. Разветвленная сеть шинопроводов от машин-генераторов Г к МЭ, расположенным в разных корпусах на расстоянии 200–500 м, наличие переключающих пунктов, конструкция токовых шунтов с отводами, переключаемыми силовыми тиристорами, наличие металлического вакуумного канала для проводки пучков, проходящего

через зазоры электромагнитов и фокусирующих линз в непосредственной близости от их обмоток питания, наличие многочисленных реле протока системы водоохлаждения и т. п. существенно увеличивают вероятность попадания посторонней «земли» на шинопроводы МЭ. Происходит это главным образом в периоды остановок ускорителя при перемонтаже вакуумного тракта, профилактических и других работах вблизи МЭ.

Следует отличать случаи постороннего заземления той части шинопровода МЭ, которая находится под потенциалом питания МЭ генератором Г, и той части со стороны шунта, которая находится под нулевым потенциалом. В первом случае постороннее заземление закорачивает выход генератора питания Г, приводя к аварийному короткому заземлению. Во втором случае заземление приводит к ухудшению качества стабилизации и ухудшению соотношения сигнал – шум из-за появления паразитных токов в общем нулевом проводе, оказывающемся заземленным в двух разных точках. Следует указать, что постороннее заземление любой из неработающих СС в любой точке шинопровода также приводит к ухудшению качества стабилизации работающих систем.

КСС-3 снабжен системой защиты, которая запрещает включать или осуществляет аварийное отключение СС в первом случае, а также позволяет проконтролировать отсутствие постороннего заземления во втором случае. При наличии посторонней «земли» в КСС появляются звуковые или световые сигналы. При размыкании общего ключа нулевой шины K весь КСС находится в подвешенном относительно «земли» состоянии.

Для быстрого обнаружения неисправностей в КСС-3 предусмотрен переносной блок настройки и проверки работоспособности отдельной СС. Блок выполнен в конструктивном модуле, соответствующем модулю ПУ, и подключается к СС вместо ПУ в соответствующую ячейку стойки ПУ. Блок снабжен необходимым набором приборов, переключателей, контрольных регуляторов и т. п., которые позволяют продиагностировать работоспособность отдельных блоков СС и быстро выявить причину неисправности в работе КСС.

Автоматизация КСС-3

КСС-3 включен в АСУ синхроциклотрона ПИЯФ и образует подсистему автоматизированного управления токами МЭ – АСУ КСС. Функциональное назначение АСУ КСС-3:

- автоматическое программное управление всеми СС, входящими в КСС-3;
- управление величинами стабилизируемых токов в МЭ;
- контроль текущих значений токов (через напряжение на шунте);

- отображение информации состояния СС на ПК центрального ПУ синхроциклотрона и ПК пользователя;
- накопление и статистическая обработка информации о функционировании СС;
- коррекция значений, вышедших из зоны допусков;
- контроль за состоянием отдельных блоков, входящих в КСС-3.

При переходе с ручного на автоматический режим работы структурная перестройка КСС заключается лишь в переключении ЗТ. В ручном режиме ЗТ является потенциометр ЗТ, находящийся в ПУ и подключенный к общему ИОН, а в автоматическом режиме – соответствующий микропроцессорный регулятор, расположенный в крейте. Изменяется также логика при командах: включение – выключение, изменение полярности и т. п.

Контроллер-стабилизатор тока в магнитных элементах

Для автоматического управления работой каждой СС комплекса работан микропроцессорный контроллер-стабилизатор тока (далее – контроллер) МЭ, подключаемый в контур управления вместо ручного ПУ. Контроллер имеет интерфейс RS485 для подключения к магистрали связи с компьютером верхнего уровня. Таким образом, создается автоматизированный комплекс, связывающий все СС с компьютером, выполняющим функции централизованного ПУ. К магистрали RS485 можно подключить до 127 контроллеров, имеющих адресуемый протокол обмена. Программа пульта имеет дистанционный доступ через стандартные средства Интернета. Это дает возможность реализовывать виртуальный центральный пульт дистанционного управления и контроля КСС на любом удаленном компьютере пользователя.

Для начала работы контроллера достаточно ввести значение полярности тока, величину рабочего напряжения на шунте и дать команду СТАРТ. Далее контроллер работает в автономном режиме. Для обмена информацией с ПК контроллер имеет 32-разрядный статусный регистр с информацией о текущем состоянии как самого контроллера, так и управляемой СС. Биты уточненного состояния помогают локализовать возможные неисправности в системе. В процессе работы ПК может читать текущее значение напряжения на шунте для визуализации работы контроллера. Контроллер имеет встроенную программную защиту от запрещенных операций (например, от попытки переключить полярность тока МЭ под питанием), что совместно с аппаратной защитой, встроенной в СС, и с программной защитой от некорректных операций в ПК повышает общую безопасность управления силовым оборудованием. Контроллер является линейным регулятором с апериодическим процессом

регулирования и интегральным накоплением сигнала рассогласования. Функциональная схема контроллера приведена на рис. 7.28.

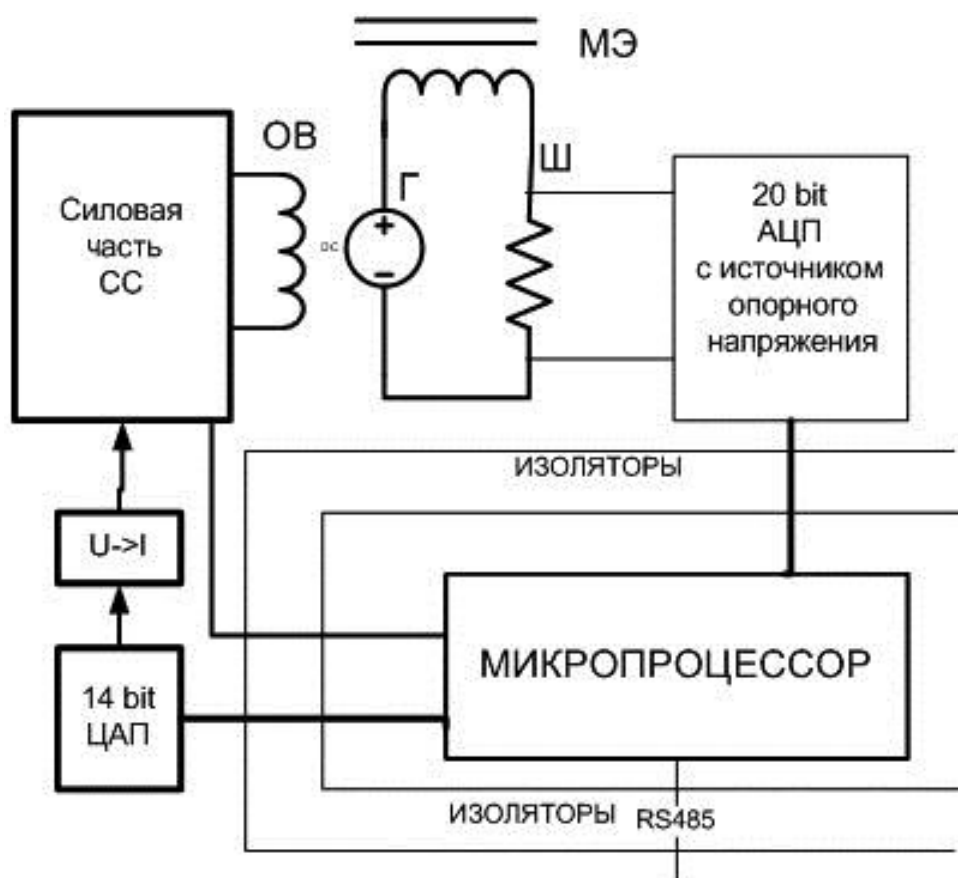


Рис. 7.28. Блок-схема места контроллера в СС

Особенностью реализации контроллера является полная электрическая изоляция измерительных и управляющих узлов друг от друга и от МП. Электрическая прочность изоляции – 1 000 В. Используются изолирующие *DC/DC*-преобразователи, быстрые интегральные изоляторы для внутренних логических сигналов и оптрона для обмена управляющими и статусными сигналами с СС. Изоляция узлов решает проблемы локализации аварийных ситуаций, полностью развязывает цепи заземлений и позволяет функциональным узлам находиться под разными потенциалами. Интерфейс RS485 также имеет изолированный выход на магистраль связи.

Узел аналого-цифрового преобразователя – АЦП

Узел АЦП находится под потенциалом шунта измерительной цепи МЭ. Входы АЦП подключены непосредственно к отводам шунта. Контроллер использует прямое значение напряжения на шунте в качестве опорной величины при стабилизации. Поэтому качество АЦП является основным параметром, определяющим итоговую точность управления.

АЦП обладает следующими параметрами:

- ширина канала – 5 мкВ (20-разрядный, шкала $\pm 2,5$ В);
- индивидуальный ИОН расположен непосредственно у выводов АЦП, долговременная нестабильность – не более $1,4 \cdot 10^{-5}$;
- встроенный в АЦП цифровой фильтр подавляет помеху на частоте 50 Гц не хуже 100 дБ;
- имеется режим самокалибровки нуля и полной шкалы по ИОН, включаемый по команде МП.

АЦП работает в режиме непрерывного измерения и выдает около 400 результатов в секунду. МП обслуживает АЦП в режиме прерываний и выполняет прием и усреднение данных. Таким образом, в распоряжении рабочей программы МП всегда имеются данные о напряжении на шунте.

Узел цифро-аналогового преобразователя – ЦАП

В контроллере используется 14-разрядный ЦАП. Выход ЦАП через преобразователь напряжение – ток со шкалой 0–5 мА на нагрузке до 700 Ом является источником управляющего токового сигнала для силовой части СС. Узел полностью гальванически изолирован, выходной токовый сигнал находится под потенциалом точки подключения в СС. Токовый выход имеет схему контроля на обрыв цепи, сигнал выдается в МП. Стабильность выходного сигнала достигается использованием индивидуального ИОН с параметрами, аналогичными источнику в АЦП. Следует отметить, что максимальная абсолютная погрешность примененных ИОН равна 1 мВ при номинале 2,5 В. Поэтому при замене контроллеров может потребоваться коррекция задаваемого U шунта в младшем знаке. Вследствие деградации парка измерительных приборов разработчик не смог измерить истинное отклонение выходных напряжений ИОН от паспортного номинала. Для 10 проверенных источников в первых трех знаках после запятой отклонение не выявлено.

Микропроцессор. Алгоритм работы контроллера

Основное состояние МП – ФОН. Контролируются сигналы состояния СС, считываются и усредняются данные с АЦП, сравниваются, если контроллер под током, с заданным значением напряжения на шунте, проверяется прием команды от управляющего ПК. Ввод команд от ПК происходит на уровне прерываний.

В состоянии УСТАНОВКА РАБОЧЕЙ ТОЧКИ МП система переходит при получении соответствующей команды от ПК. Сначала проверяются все сигналы состояния СС. Так как точная характеристика кривой

управляющий ток – напряжение шунта неизвестна, реализуется адаптивный алгоритм ввода тока управления с предварительным грубым вычислением границ зоны захвата для перехода в режим стабилизации. Контролируется появление сигнала на шунте и его возрастание по мере ввода тока управления. Приращение ЦАП = 4 разряда. Период его изменений задается таймером. Далее возможны 3 варианта:

1) введенный ток достиг нижней границы рабочей зоны, а напряжение на шунте не появилось. Фиксируется ошибка НЕТ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА;

2) введенный ток достиг верхней границы зоны, а напряжение на шунте не достигло заданного значения. Фиксируется ОШИБКА АП;

3) введенный ток находится в зоне, разница между напряжением на шунте и заданным значением меньше, чем ширина зоны захвата для стабилизации. МП переходит в режим СТАБИЛИЗАЦИЯ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ с изменением ЦАП на ± 1 разряд.

Центральный пульт управления КСС. Программное обеспечение

Пример рабочего окна программы управления КСС-3 приведен на рис. 7.29. Основные усилия при разработке были приложены к максимальному упрощению и обеспечению безопасности работы системы для пользователя, далекого от технических проблем автоматизации.

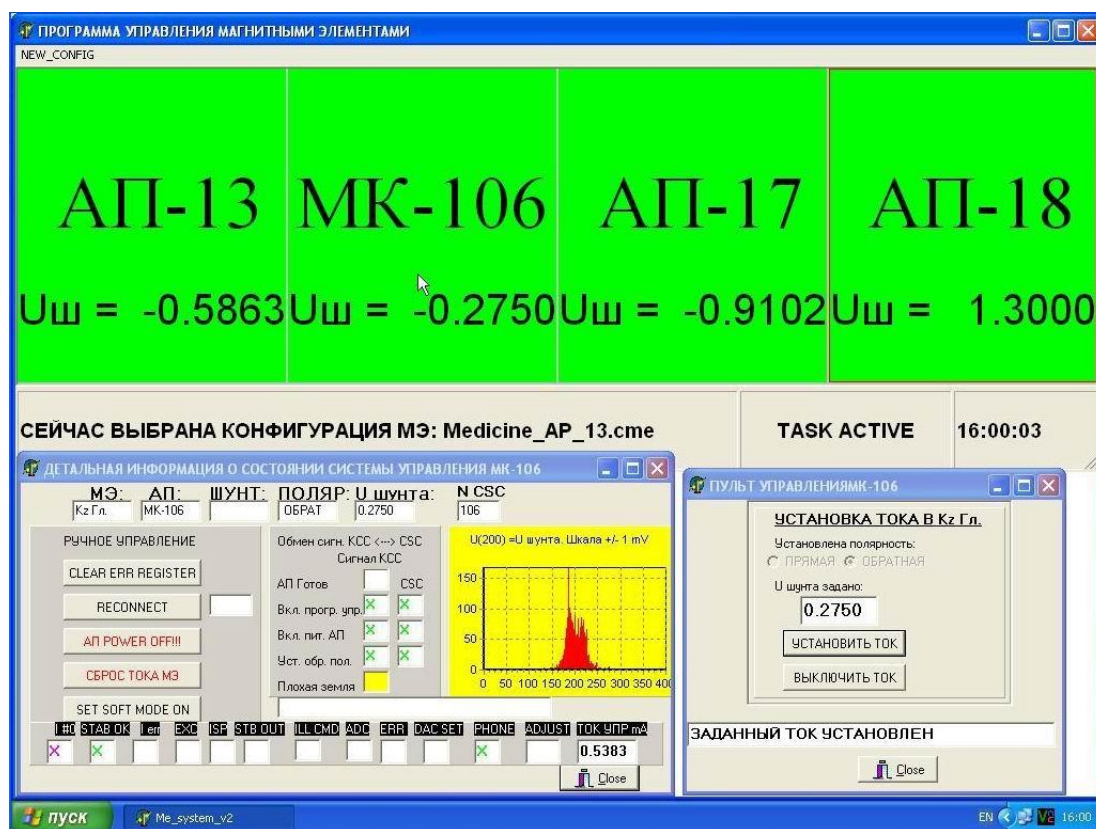


Рис. 7.29. Рабочие окна ПУ КСС-3

При запуске программы вызывается рабочая конфигурация МЭ, заранее подготовленная квалифицированным персоналом. Эта конфигурация отображается в виде таблицы с перечнем рабочих элементов и их текущим состоянием. Исходное состояние должно быть АП В СХЕМЕ. Для установки тока в любом элементе достаточно поместить указатель мыши на квадрат с данным МЭ и нажать правую кнопку. Откроется окно ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ ХХХХ, где ХХХХ – название выбранного МЭ (правый нижний угол). Нажатие кнопки УСТАНОВИТЬ ТОК запускает операцию. Процесс ввода тока виден, как и появление и изменение напряжения на шунте МЭ. По завершении ввода тока соответствующий элемент таблицы МЭ приобретает зеленую окраску. Когда вся система готова к работе, таблица полностью окрашивается в зеленый цвет.

При установке указателя мыши на квадрат с нужным МЭ и нажатии левой кнопки откроется окно ДЕТАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ (левая нижняя часть экрана). Здесь содержится вся информация о текущем состоянии выбранной СС. Для пользователя может представлять интерес гистограмма распределения сигналов на шунте в процессе работы. Она демонстрирует качество работы СС. При выходе из сеанса данные всех гистограмм запоминаются в файлах протоколов. Практика эксплуатации системы показала, что U шунта поддерживается с точностью не хуже ± 150 мкВ в течение нескольких суток.

Для поддержания длительной абсолютной стабильности U шунта программа иницирует 1 раз в час перекалибровку всех АЦП. Все события в системе фиксируются в файле протокола работы. Для выбора новой рабочей конфигурации следует использовать меню NEW. Появится весь список конфигураций, имеющийся в системе.

Отметим, что разработанная система КСС-3 полностью адаптирована также к режиму авторегулирования, что позволяет решать задачи многопараметрической оптимизации трактов пучков по одному или нескольким критериям качества: настройка тракта пучка по максимуму интенсивности, по положению центра тяжести пучка, по поперечному распределению плотности частиц и т. п.

В режиме оптимизации настраиваемого тракта к работе КСС-3 подключаются еще две подсистемы АСУ синхроциклотрона: подсистема управления измерителями профиля пучка (профилόμεтрами) и подсистема управления коллиматорами. В этом режиме выходные уровни ЗТ ЦАП для некоторых из СС устанавливаются по соответствующему алгоритму с учетом информации, получаемой с измерителей параметров пучка. В качестве профилόμεтров используются как координатно перемещаемые датчики – измерители интенсивности пучка, так и многопроволочные пропорциональные ионизационные камеры.

Режим авторегулирования позволяет также осуществлять программное изменение параметров пучка в течение эксперимента или облучения больных: изменение дозы, профиля, пространственное сканирование, коллимирование и т. п. Естественно, что скорость такого авторегулирования ограничена постоянной времени соответствующего МЭ.

В режиме авторегулирования может осуществляться также процесс гистерезисного перемагничивания МЭ и выход на плато заданной величины магнитного поля. Отметим, что использование в МЭ вместо шунтов датчиков-магнитометров, например, на принципе ЯМР затруднено (или практически невозможно) в условиях работы и эксплуатации синхроциклотрона: высокий уровень радиации в местах расположения МЭ, большие величины наводок ВЧ и 50 Гц от импульсно работающего генератора дуанта синхроциклотрона, отсутствие в зазорах МЭ места для расположения датчиков ЯМР из-за наличия вакуум-провода и др.

Описанная подсистема АСУ синхроциклотрона ПИЯФ КСС-3 обеспечивает как ручное, так и автоматизированное управление и контроль за всеми источниками стабилизированного питания МЭ трактов пучков, причем основные эксплуатационные параметры (стабильность, надежность, степень автоматизации и контроля) аналогичны параметрам для источников электропитания магнитов и линз современного уровня (типов ИСТ, PS EVPU и др.), несмотря на использование электромашинных агрегатов и токовых шунтов.

КСС-3 адаптирована к режиму авторегулирования, что позволяет проводить дальнейшее усовершенствование системы, когда тракты будут автоматически настраиваться по выбранному критерию качества пучка (интенсивность, плотность интенсивности, состав вторичных мезонных пучков и т. п.).

Объединение всех СС в единый комплекс значительно сокращает количество необходимой радиоаппаратуры за счет использования общих для всех систем блоков (ИОН, ГПН, блоков общего питания, защиты и т. п.). Требования к надежности работы этих блоков были повышены. Система централизованной диагностики и контроля, а также стандартизация всех радиотехнических блоков позволяют быстро находить неисправности и устранять их.

К недостаткам можно отнести особенность структурной схемы КСС-3, при которой силовые части всех систем питания кондуктивно связаны друг с другом общей «земляной» шиной (\perp). Наличие разветвленной «земляной» цепи, обладающей многочисленными емкостными и резистивными утечками через конструктивные элементы обмоток электромашинных агрегатов, токовых шунтов, обмоток МЭ и т. п. приводит к повышению уровня электромагнитных помех на входах УПТ.

Система прошла период опытной эксплуатации в течение двух лет. Выполнена некоторая коррекция, неизбежная при доводке сложных комплексов. Опыт эксплуатации показал высокую надежность и удобство использования системы.

Публикации

1. **Абросимов Н. К., Волченков В. А., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Коптев В. П., Круглов С. П., Микиртычьянц С. М., Малов Ю. А., Орищин Е. М., Рябов Г. А., Уваров Л. Н., Щербаков Г. В., Шевель Л. Ф.** Измерение времени жизни π^+ -мезона. Препринт ЛИЯФ 1073. Л., 1985. 50 с.
2. **Abrossimov N. K., Borukhovich G. Z., Laptev A. V., Marchenkov V. V., Petrov G. A., Shcherbakov O. A., Tuboltsev Y. V., Yurchenko V. I.** Neutron Time-of-Flight Spectrometer GNEIS at Gatchina 1 GeV Proton Synchrocyclotron // NIM. 1985. V. A242. P. 121–133.
3. **Абросимов Н. К., Десятериков Р. П., Котов А. Г., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Чернов Н. Н.** Система увеличения длительности импульса протонного пучка синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР. Препринт ЛИЯФ 1. Л., 1972. 22 с.
4. **Абросимов Н. К., Котов А. Г., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Чернов Н. Н., Юрченко В. И.** Совмещенная система для увеличения длительности и быстрого сброса протонного пучка синхроциклотрона // Тр. III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1973. Т. 2. С. 94–98.
5. Способ уменьшения потерь частиц в синхроциклотроне при использовании временной растяжки пучка с помощью С-электрода: а. с. № 497934 с приоритетом от 03.01.1974 / **Н. К. Абросимов, А. В. Куликов, Г. Ф. Михеев, Н. Н. Чернов.**
6. **Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Котов А. Г., Михеев Г. Ф., Покровский А. С., Рябов Г. А., Сандлер Б. З., Чернов Н. Н.** Система временной растяжки пучка синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР // Методические и прикладные работы ЛИЯФ: сб. Л., 1988. С. 177–179.
7. Устройство для растяжки во времени пучка синхроциклотрона: а. с. № 370901 с приоритетом от 20.07.1972 / **А. В. Куликов, Н. Н. Чернов.**
8. **Абросимов Н. К., Волченков В. А., Гордеев В. А., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Коптев В. П., Круглов С. П., Микиртычьянц С. М., Рябов Г. А., Щербаков Г. В.** Подпороговое рождение K^+ -мезонов при взаимодействии протонов с энергией 1 ГэВ с ядрами С, Al, Cu и Pb. Препринт ЛИЯФ 704. Л., 1981. 25 с.
9. **Абросимов Н. К., Волченков В. А., Гордеев В. А., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Коптев В. П., Круглов С. П., Микиртычьянц С. М., Рябов Г. А., Щербаков Г. В.** Пучки π^- и μ -мезонов низких энергий на синхроциклотроне ЛИЯФ АН СССР // Тр. VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1983. Т. 2. С. 90–93.

10. **Абросимов Н. К., Борухович Г. З., Каминкер Д. М., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Петров Г. А., Чернов Н. Н.** Гатчинский нейтронный спектрометр на базе синхроциклотрона ФТИ (ГНЕЙС) // Нейтронная физика: материалы Всесоюзного совещания. Киев: Наукова думка, 1972. Ч. II. С. 188.
11. **Абросимов Н. К., Борухович Г. З., Куликов А. В., Левицкий Л. А., Михеев Г. Ф., Петров Г. А., Чернов Н. Н., Юрченко В. И.** Нейтронный спектрометр по времени пролета на базе синхроциклотрона ЛИЯФ им. Б. П. Константинова АН СССР // Нейтронная физика: материалы 3-й Всесоюзной конф. по нейтронной физике. М., 1976. Ч. 6. С. 221–226.
12. Фокусирующее устройство синхроциклотрона: а. с. № 743243 с приоритетом от 15.12.1977 / **Н. К. Абросимов, А. В. Куликов, Г. Ф. Михеев.** Бюл. № 23, 1980. С. 341.
13. **Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А.** Увеличение интенсивности пучка синхроциклотрона ЛИЯФ им. Б. П. Константинова АН СССР за счет улучшения электростатической фокусировки в центральной области // Тр. VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1979. Т. I. С. 277–280.
14. **Абросимов Н. К., Асташин В. В., Дмитриев С. П., Котов А. Г., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Покровский А. С., Рябов Г. А.** Повышение интенсивности пучка синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР. Препринт ЛИЯФ 463. Л., 1979. 33 с.
15. **Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Котов А. Г., Михеев Г. Ф., Покровский А. С., Рябов Г. А., Сандлер Б. З.** Увеличение интенсивности пучка синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР за счет улучшения электростатической фокусировки в центральной области // Методические и прикладные работы ЛИЯФ: сб. Л., 1988. С. 175–177.
16. **Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А.** Реконструкция тракта протонного пучка синхроциклотрона ЛИЯФ // Тр. IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. Т. 1. С. 348–352.
17. **Абросимов Н. К., Герасимов А. М., Дмитриев А. М., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Коровина Л. А., Крышень Л. М., Михеев Г. Ф., Перский М. С., Рябов Г. А.** Реконструкция протонного тракта главного зала синхроциклотрона ЛИЯФ // Методические и прикладные работы ЛИЯФ: сб. Л., 1988. С. 182–183.
18. **Абросимов Н. К., Михеев Г. Ф., Петров И. А., Решетников Д. В., Рябов Г. А.** Коррекция положения пучка на синхроциклотроне на 1 ГэВ. Препринт ЛИЯФ 1168. Л., 1986. 18 с.
19. **Герасимов А. М., Куликов А. В., Михеев Г. Ф.** Автоматизированная система управления синхроциклотрона // Управляемые системы и машины (УСИМ). Киев, 1978. Вып. 1. С. 116–119.

20. *Асташин В. В., Горкин Г. Н., Инжеев В. Н., Куликов А. В., Михеев Г. Ф.* Комплекс систем стабилизации токов магнитов и линз трактов пучков синхроциклотрона на 1 ГэВ ЛИЯФ АН СССР // Материалы VII Всесоюзной школы по автоматизации научных исследований ЛИЯФ АН СССР. Л., 1974. С. 450–455.
21. *Асташин В. В., Горкин Г. Н., Инжеев В. Н., Куликов А. В., Михеев Г. Ф.* Комплекс систем стабилизации токов в магнитных элементах транспортировки заряженных частиц синхроциклотрона на 1 ГэВ ЛИЯФ АН СССР. Препринт ЛИЯФ 108. Л., 1974. 16 с.
22. *Абросимов Н. К., Герасимов А. Н., Коровина Л. А., Крышень Л. М., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А.* Автоматизированная система управления трактами пучков на синхроциклотроне ЛИЯФ АН СССР // Тр. X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1987. Т. 2. С. 221–224.
23. *Абросимов Н. К., Васильев А. М., Герасимов А. М., Дмитриев С. П., Коровина Л. А., Крышень Л. М., Михеев Г. Ф., Новиков В. С., Покровский А. С., Рябов Г. А.* Автоматизированный комплекс систем стабилизированного питания магнитов и линз трактов пучков синхроциклотрона на 1 ГэВ ЛИЯФ АН СССР. Препринт ЛИЯФ 1522. Л., 1989. 22 с.
24. *Иванов Е. М., Михеев Г. Ф., Муратов В. Г., Новиков В. С., Покровский А. С., Соловей В. А.* Автоматизированная система управления трактами транспортировки заряженных пучков синхроциклотрона 1 000 МэВ ПИЯФ РАН. Сообщение ПИЯФ 2837. Гатчина, 2010. 22 с.

Оглавление

От составителя	5
От научного редактора	7
<i>Н. Н. Чернов.</i> Памяти Николая Константиновича Абросимова	7
<i>Г. А. Рябов.</i> Его любили и уважали	10
<i>Г. Ф. Михеев.</i> Краткая биография Николая Константиновича Абросимова	12
Введение	17
Глава 1 Этап строительства и запуска синхроциклотрона ПИЯФ. Программа развития ускорительного комплекса	31
1.1. История вопроса	31
1.2. Крупнейшие синхроциклотроны мира	32
1.3. Программа физических исследований на синхроциклотроне ПИЯФ	38
1.4. Этап строительства и запуска синхроциклотрона ПИЯФ	41
1.5. Программа усовершенствования синхроциклотрона ПИЯФ и развитие его экспериментальной базы	46
Публикации	49
Глава 2 Современное состояние ускорительного комплекса ПИЯФ	50
2.1. Комплекс зданий синхроциклотрона ПИЯФ, размещение оборудования и радиационная защита	51
2.2. Пучки синхроциклотрона ПИЯФ	57
2.3. Экспериментальные комплексы и установки на синхроциклотроне ПИЯФ	67
Публикации	88
Глава 3 Основные сведения из теории резонансных циклических ускорителей с постоянным магнитным полем	92
3.1. Виды циклических ускорителей	92

3.2. Частотная программа синхроциклотрона с учетом изменения магнитного поля вдоль радиуса	114
3.3. Синхротронные колебания. Сепаратриса	117
Рекомендуемая литература	124

Глава 4

Необходимые сведения из радиотехники для расчета параметров высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ	125
4.1. Резонансный контур	125
4.2. Радиотехнические системы с распределенными параметрами	134
4.3. Расчет потерь высокочастотной мощности	157
Рекомендуемая литература	162

Глава 5

Высокочастотная ускоряющая система синхроциклотрона ПИЯФ	163
5.1. Структурные схемы высокочастотных ускоряющих систем крупнейших синхроциклотронов мира	163
5.2. Основные требования к высокочастотной ускоряющей системе синхроциклотрона ПИЯФ	169
5.3. Дуантная система синхроциклотрона ПИЯФ	172
5.4. Вариаторы частоты синхроциклотрона ПИЯФ	183
5.5. Наладка высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ	202
5.6. Высокочастотный генератор синхроциклотрона ПИЯФ. Разработка системы связи генератора с ускоряющей системой	211
5.7. Получение протонного пучка с энергией 750 МэВ	217
5.8. Получение протонного пучка с энергией 1 ГэВ	219
Публикации	222

Глава 6

Модернизация высокочастотной ускоряющей системы и других радиотехнических систем синхроциклотрона ПИЯФ	223
6.1. Цели и задачи модернизации	223
6.2. Конструктивные изменения, внесенные в систему дуант – камера	224
6.3. Новая конструкция вариаторов частоты	225
6.4. Контроль за тепловыми деформациями в конструкции вариатора частоты	242
6.5. Система защиты ускоряющей системы от высокочастотных пробоев	244
6.6. Оптимизация частотной программы синхроциклотрона ПИЯФ ...	247
6.7. Оптимизация амплитудной программы синхроциклотрона ПИЯФ	254

6.8. Другие усовершенствования высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ	259
6.9. Система управления синхроциклотроном ПИЯФ (СУФ)	260
Публикации	265
Глава 7	
Разработка и создание новых систем для комплекса синхроциклотрона ПИЯФ	267
7.1. Система увеличения длительности импульса протонного пучка синхроциклотрона ПИЯФ (система временной растяжки)	267
7.2. Импульсный нейтронный пучок синхроциклотрона ПИЯФ. Система однооборотного сброса протонов на внутреннюю мишень	282
7.3. Система увеличения интенсивности пучка синхроциклотрона ПИЯФ	293
7.4. Система стабилизации тока в магнитных элементах трактов транспортировки пучков и система компьютерного управления (комплекс систем стабилизации КСС-3)	312
Публикации	326
Послесловие	329
Приложение	334
Оглавление	337

Н. К. Абросимов, Г. Ф. Михеев

**РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
СИНХРОЦИКЛОТРОНА
ПЕТЕРБУРГСКОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

Редактор *Г. А. Рябов*

Отпечатано в типографии ФГБУ «ПИЯФ»
188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща
Зак. 341, тир. 100, уч.-изд. л. 20,0; 03.12.2012 г.
Формат бумаги 60x84 1/16. Печать офсетная

Оглавление

От составителя	5
От научного редактора	7
<i>Н. Н. Чернов.</i> Памяти Николая Константиновича Абросимова	7
<i>Г. А. Рябов.</i> Его любили и уважали	10
<i>Г. Ф. Михеев.</i> Краткая биография Николая Константиновича Абросимова	12
Введение	17
Глава 1 Этап строительства и запуска синхроциклотрона ПИЯФ. Программа развития ускорительного комплекса	31
1.1. История вопроса	31
1.2. Крупнейшие синхроциклотроны мира	32
1.3. Программа физических исследований на синхроциклотроне ПИЯФ	38
1.4. Этап строительства и запуска синхроциклотрона ПИЯФ	41
1.5. Программа усовершенствования синхроциклотрона ПИЯФ и развитие его экспериментальной базы	46
Публикации	49
Глава 2 Современное состояние ускорительного комплекса ПИЯФ	50
2.1. Комплекс зданий синхроциклотрона ПИЯФ, размещение оборудования и радиационная защита	51
2.2. Пучки синхроциклотрона ПИЯФ	57
2.3. Экспериментальные комплексы и установки на синхроциклотроне ПИЯФ	67
Публикации	88
Глава 3 Основные сведения из теории резонансных циклических ускорителей с постоянным магнитным полем	92
3.1. Виды циклических ускорителей	92

3.2. Частотная программа синхроциклотрона с учетом изменения магнитного поля вдоль радиуса	114
3.3. Синхротронные колебания. Сепаратриса	117
Рекомендуемая литература	124

Глава 4

Необходимые сведения из радиотехники для расчета параметров высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ	125
4.1. Резонансный контур	125
4.2. Радиотехнические системы с распределенными параметрами	134
4.3. Расчет потерь высокочастотной мощности	157
Рекомендуемая литература	162

Глава 5

Высокочастотная ускоряющая система синхроциклотрона ПИЯФ	163
5.1. Структурные схемы высокочастотных ускоряющих систем крупнейших синхроциклотронов мира	163
5.2. Основные требования к высокочастотной ускоряющей системе синхроциклотрона ПИЯФ	169
5.3. Дуантная система синхроциклотрона ПИЯФ	172
5.4. Вариаторы частоты синхроциклотрона ПИЯФ	183
5.5. Наладка высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ	202
5.6. Высокочастотный генератор синхроциклотрона ПИЯФ. Разработка системы связи генератора с ускоряющей системой	211
5.7. Получение протонного пучка с энергией 750 МэВ	217
5.8. Получение протонного пучка с энергией 1 ГэВ	219
Публикации	222

Глава 6

Модернизация высокочастотной ускоряющей системы и других радиотехнических систем синхроциклотрона ПИЯФ	223
6.1. Цели и задачи модернизации	223
6.2. Конструктивные изменения, внесенные в систему дуант – камера	224
6.3. Новая конструкция вариаторов частоты	225
6.4. Контроль за тепловыми деформациями в конструкции вариатора частоты	242
6.5. Система защиты ускоряющей системы от высокочастотных пробоев	244
6.6. Оптимизация частотной программы синхроциклотрона ПИЯФ ...	247
6.7. Оптимизация амплитудной программы синхроциклотрона ПИЯФ	254

6.8. Другие усовершенствования высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ	259
6.9. Система управления синхроциклотроном ПИЯФ (СУФ)	260
Публикации	265
Глава 7	
Разработка и создание новых систем для комплекса синхроциклотрона ПИЯФ	267
7.1. Система увеличения длительности импульса протонного пучка синхроциклотрона ПИЯФ (система временной растяжки)	267
7.2. Импульсный нейтронный пучок синхроциклотрона ПИЯФ. Система однооборотного сброса протонов на внутреннюю мишень	282
7.3. Система увеличения интенсивности пучка синхроциклотрона ПИЯФ	293
7.4. Система стабилизации тока в магнитных элементах трактов транспортировки пучков и система компьютерного управления (комплекс систем стабилизации КСС-3)	312
Публикации	326
Послесловие	329
Приложение	334
Оглавление	337

Н. К. Абросимов, Г. Ф. Михеев

**РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
СИНХРОЦИКЛОТРОНА
ПЕТЕРБУРГСКОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

Редактор *Г. А. Рябов*

Отпечатано в типографии ФГБУ «ПИЯФ»
188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща
Зак. 341, тир. 100, уч.-изд. л. 20,0; 03.12.2012 г.
Формат бумаги 60x84 1/16. Печать офсетная

Оглавление

От составителя	5
От научного редактора	7
<i>Н. Н. Чернов.</i> Памяти Николая Константиновича Абросимова	7
<i>Г. А. Рябов.</i> Его любили и уважали	10
<i>Г. Ф. Михеев.</i> Краткая биография Николая Константиновича Абросимова	12
Введение	17
Глава 1 Этап строительства и запуска синхроциклотрона ПИЯФ. Программа развития ускорительного комплекса	31
1.1. История вопроса	31
1.2. Крупнейшие синхроциклотроны мира	32
1.3. Программа физических исследований на синхроциклотроне ПИЯФ	38
1.4. Этап строительства и запуска синхроциклотрона ПИЯФ	41
1.5. Программа усовершенствования синхроциклотрона ПИЯФ и развитие его экспериментальной базы	46
Публикации	49
Глава 2 Современное состояние ускорительного комплекса ПИЯФ	50
2.1. Комплекс зданий синхроциклотрона ПИЯФ, размещение оборудования и радиационная защита	51
2.2. Пучки синхроциклотрона ПИЯФ	57
2.3. Экспериментальные комплексы и установки на синхроциклотроне ПИЯФ	67
Публикации	88
Глава 3 Основные сведения из теории резонансных циклических ускорителей с постоянным магнитным полем	92
3.1. Виды циклических ускорителей	92

3.2. Частотная программа синхроциклотрона с учетом изменения магнитного поля вдоль радиуса	114
3.3. Синхротронные колебания. Сепаратриса	117
Рекомендуемая литература	124

Глава 4

Необходимые сведения из радиотехники для расчета параметров высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ	125
4.1. Резонансный контур	125
4.2. Радиотехнические системы с распределенными параметрами	134
4.3. Расчет потерь высокочастотной мощности	157
Рекомендуемая литература	162

Глава 5

Высокочастотная ускоряющая система синхроциклотрона ПИЯФ	163
5.1. Структурные схемы высокочастотных ускоряющих систем крупнейших синхроциклотронов мира	163
5.2. Основные требования к высокочастотной ускоряющей системе синхроциклотрона ПИЯФ	169
5.3. Дуантная система синхроциклотрона ПИЯФ	172
5.4. Вариаторы частоты синхроциклотрона ПИЯФ	183
5.5. Наладка высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ	202
5.6. Высокочастотный генератор синхроциклотрона ПИЯФ. Разработка системы связи генератора с ускоряющей системой	211
5.7. Получение протонного пучка с энергией 750 МэВ	217
5.8. Получение протонного пучка с энергией 1 ГэВ	219
Публикации	222

Глава 6

Модернизация высокочастотной ускоряющей системы и других радиотехнических систем синхроциклотрона ПИЯФ	223
6.1. Цели и задачи модернизации	223
6.2. Конструктивные изменения, внесенные в систему дуант – камера	224
6.3. Новая конструкция вариаторов частоты	225
6.4. Контроль за тепловыми деформациями в конструкции вариатора частоты	242
6.5. Система защиты ускоряющей системы от высокочастотных пробоев	244
6.6. Оптимизация частотной программы синхроциклотрона ПИЯФ ...	247
6.7. Оптимизация амплитудной программы синхроциклотрона ПИЯФ	254

6.8. Другие усовершенствования высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ	259
6.9. Система управления синхроциклотроном ПИЯФ (СУФ)	260
Публикации	265
Глава 7	
Разработка и создание новых систем для комплекса синхроциклотрона ПИЯФ	267
7.1. Система увеличения длительности импульса протонного пучка синхроциклотрона ПИЯФ (система временной растяжки)	267
7.2. Импульсный нейтронный пучок синхроциклотрона ПИЯФ. Система однооборотного сброса протонов на внутреннюю мишень	282
7.3. Система увеличения интенсивности пучка синхроциклотрона ПИЯФ	293
7.4. Система стабилизации тока в магнитных элементах трактов транспортировки пучков и система компьютерного управления (комплекс систем стабилизации КСС-3)	312
Публикации	326
Послесловие	329
Приложение	334
Оглавление	337

Н. К. Абросимов, Г. Ф. Михеев

**РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
СИНХРОЦИКЛОТРОНА
ПЕТЕРБУРГСКОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

Редактор *Г. А. Рябов*

Отпечатано в типографии ФГБУ «ПИЯФ»
188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща
Зак. 341, тир. 100, уч.-изд. л. 20,0; 03.12.2012 г.
Формат бумаги 60x84 1/16. Печать офсетная

Глава 4

Необходимые сведения из радиотехники для расчета параметров высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ

Радиотехника – это всего лишь комбинация из трех элементов: R , L и C , а это проще, чем покер.

Высказывание Н. К. Абросимова перед лекцией по радиотехническим устройствам синхроциклотрона

Прежде чем перейти к рассмотрению резонансных свойств ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона, напомним основные свойства резонансных, или колебательных, контуров и систем с распределенными параметрами.

4.1. Резонансный контур

Как известно, действительную функцию вида $a = A \cos(\omega t + \varphi)$ удобно выражать в виде комплексной мгновенной величины

$$\dot{a} = A [\cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi)] = A e^{j\varphi} e^{j\omega t} = \dot{A} e^{j\omega t},$$

где A – действительная амплитуда; \dot{A} – комплексная амплитуда. При вычислениях временной множитель $e^{j\omega t}$ отбрасывают и оставляют только комплексные амплитуды. Вследствие этого комплексное сопротивление в декартовых или полярных координатах имеет вид

$$\dot{Z} = R + jX = Z e^{j\varphi},$$

где R – активная составляющая; X – реактивная составляющая; $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ – полное сопротивление (импеданс); $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}$ – фазовый угол.

Таким образом, полное сопротивление может быть представлено в виде последовательного соединения всегда положительного активного

сопротивления R и реактивного сопротивления jX (положительного, если оно индуктивное, и отрицательного, если оно емкостное). Последовательное соединение $\dot{Z} = R_s + jX_s$ может быть пересчитано в эквивалентное ему параллельное соединение (рис. 4.1а, б).

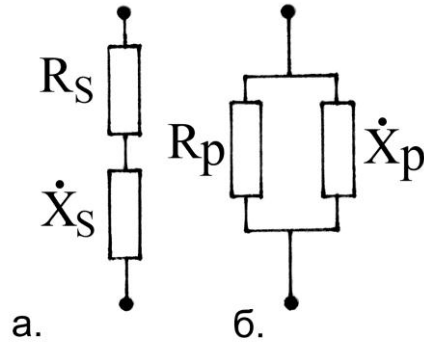


Рис. 4.1. Эквивалентное представление комплексного сопротивления в виде последовательного (а) или параллельного (б) контура

Комплексная проводимость

$$\dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}} = G_p + jB_p = \frac{1}{Z} e^{-j\varphi} = Y e^{j\theta},$$

где $Y = \frac{1}{Z}$; $\theta = -\varphi$. Связь между соответствующими величинами будет

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s}; \quad X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s}; \quad G_p = \frac{1}{R_p}; \quad B_p = -\frac{1}{X_p}. \quad (4.1)$$

Формулы (4.1) применяют для пересчета параллельного соединения в эквивалентное ему последовательное, и наоборот. В частном случае реактивное сопротивление для индуктивности равно $j\omega L$, а для емкости — $\frac{1}{j\omega C}$. Полное сопротивление для последовательного соединения R , L и C будет

$$\dot{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C},$$

а полная проводимость для параллельного соединения G , L и C

$$\dot{Y} = G + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}. \quad (4.2)$$

Модули полных величин находят по правилам действия с комплексными числами:

$$|\dot{Z}| = Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}; |\dot{Y}| = Y = \sqrt{G^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}.$$

Активная и реактивная мощность резонансного контура. Мгновенная мощность $p = ui = u \frac{dq}{dt}$. Если напряжение и ток даны в комплексном виде \dot{U}, \dot{I} , то мощность рассчитывается с применением комплексно сопряженного тока по формуле $\dot{P} = \frac{1}{2} \dot{U} \dot{I}^*$, где \dot{I}^* – комплексно сопряженная величина \dot{I} :

$$\dot{U} = U_a + jU_r; \dot{I} = I_a + jI_r; \dot{P} = P_a + jP_r.$$

Пример – индуктивная нагрузка с активными потерями $X_s = \omega L$ (рис. 4.1а):

$$I_a = \frac{U}{R_s}; \dot{I}_r = \frac{U}{j\omega L} = -j \frac{U}{\omega L};$$

$$\dot{I} = I_a + \dot{I}_r = \frac{U}{R_s} - j \frac{U}{\omega L}; \dot{P} = \frac{1}{2} \dot{U} \dot{I}^* = \frac{U^2}{2R_s} + j \frac{U^2}{2\omega L},$$

$\frac{U^2}{2R_s}$ – амплитуда активной мощности; $\frac{U^2}{2\omega L}$ – амплитуда реактивной мощности.

Реактивная мощность – это мощность, которая сначала потребляется нагрузкой, а затем отдается в сеть. Происходит перекачка энергии из источника в индуктивность и обратно.

Параллельный резонансный контур без потерь мощности в его элементах

Параллельный резонансный контур без потерь представлен на рис. 4.2.

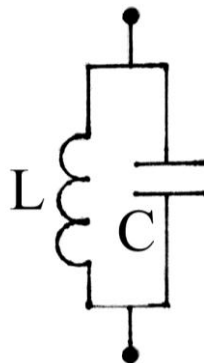


Рис. 4.2. Параллельный резонансный контур без потерь

Используя (4.2), получим

$$\dot{Y} = j\omega C + \frac{1}{j\omega L} = j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right).$$

В резонансе $Y = 0$ при $\omega_0 C = \frac{1}{\omega_0 L}$, отсюда $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансная частота, $\omega_0 = 2\pi f_0$, величина $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \rho$ – волновое сопротивление.

Рассмотрим поведение колебательного контура вблизи резонанса $\omega - \omega_0 = \Delta\omega$; $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \ll 1$:

$$\begin{aligned} \dot{Y} &= j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) = j\frac{1}{\omega L}\left(\omega^2 LC - 1\right) = j\frac{\omega_0}{\rho\omega}\left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1\right) = j\frac{1}{\rho\omega}\left(\frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0}\right) = \\ &= j\frac{1}{\rho\omega} \frac{(\omega - \omega_0)(\omega + \omega_0)}{\omega_0} \approx j\frac{1}{\rho\omega} \frac{\Delta\omega 2\omega}{\omega_0} = \frac{j}{\rho} \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}; \\ \dot{Z} &= \frac{1}{\dot{Y}} = -j\rho \frac{\omega_0}{2\Delta\omega}; \quad X = -\rho \frac{\omega_0}{2\Delta\omega}. \end{aligned}$$

Зависимость $X = X(\omega)$ изображена на рис. 4.3а.

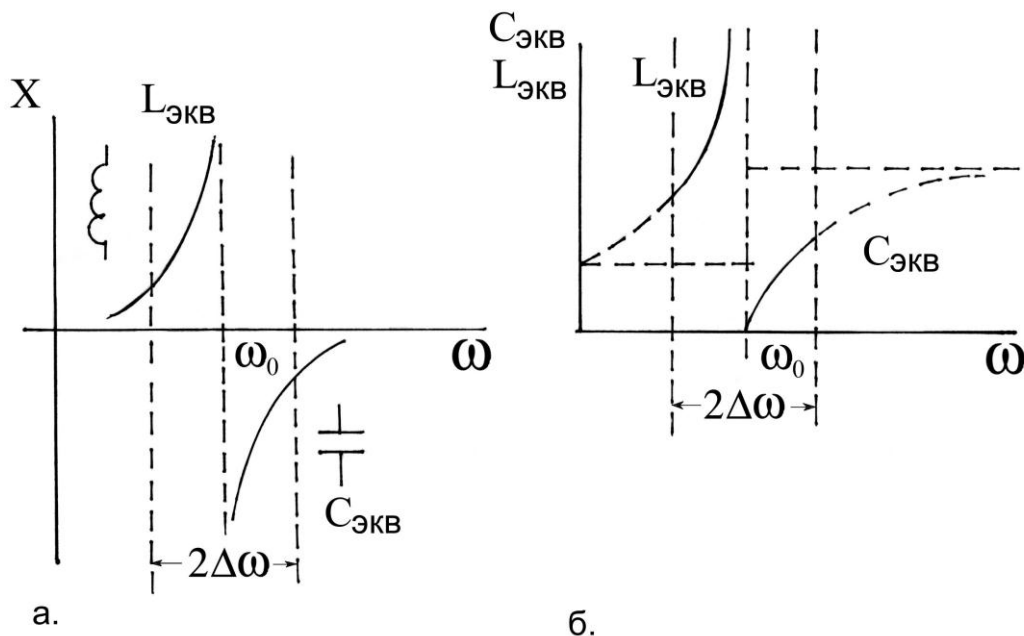


Рис. 4.3. Частотные характеристики параллельного резонансного контура без потерь:

- а) зависимость реактивного сопротивления параллельного контура от частоты вблизи резонанса; б) зависимость эквивалентного сопротивления параллельного контура от частоты вблизи резонанса

Таким образом, при $\omega > \omega_0$ реактивное сопротивление контура $X < 1$ и носит емкостной характер $C_{\text{экв.}}$, а при $\omega < \omega_0$ реактивное сопротивление контура $X > 1$ и носит индуктивный характер $L_{\text{экв.}}$.

Найдем $C_{\text{экв.}}$ при $\omega > \omega_0$, $\Delta\omega > 0$ (рис. 4.3б):

$$X = \frac{1}{j\omega C_{\text{экв.}}} = -j\rho \frac{\omega_0}{2\Delta\omega}, \text{ отсюда } C_{\text{экв.}} = \frac{2\Delta\omega}{\rho\omega\omega_0}.$$

Найдем $L_{\text{экв.}}$ при $\omega < \omega_0$, $\Delta\omega < 0$:

$$X = j\omega L_{\text{экв.}} = -j\rho \frac{\omega_0}{2\Delta\omega} = j\rho \frac{\omega_0}{2|\Delta\omega|}, \text{ отсюда } L_{\text{экв.}} = \rho \frac{\omega_0}{2\omega |\Delta\omega|}.$$

Найдем выражения для токов в ветвях параллельного контура без потерь:

$$\begin{aligned} i_L &= \frac{U}{j\omega L} = -j \frac{U}{\omega L}; \quad i_C = U j\omega C; \\ i &= i_L + i_C = U j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) = j \frac{U}{\omega L} \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1 \right). \end{aligned}$$

Вблизи резонанса

$$i_L \approx -j \frac{U}{\omega_0 L} = -j \frac{U}{\rho}; \quad i_C \approx jU\omega_0 C = j \frac{U}{\rho}; \quad i \approx i_L + i_C = 0.$$

В контуре без потерь активная мощность $P_a = 0$, реактивная мощность $P_r = UI$. При этом выше резонанса, где контур ведет себя как эквивалентная индуктивность,

$$P_r = U \frac{U}{\omega L_{\text{экв.}}} = \frac{U^2}{\omega L_{\text{экв.}}},$$

а ниже резонанса, где контур ведет себя как эквивалентная емкость,

$$P_r = -U^2 \omega C_{\text{экв.}}$$

В резонансе

$$|P_r| = \frac{U^2}{\rho}.$$

Мощность не надо путать с энергией, запасаемой в элементах контура,

$$W_C = \frac{CU^2}{2}; \quad W_L = \frac{LI^2}{2}.$$

Параллельный резонансный контур с учетом потерь мощности в его элементах

Параллельный резонансный контур с учетом потерь мощности представлен на рис. 4.4.

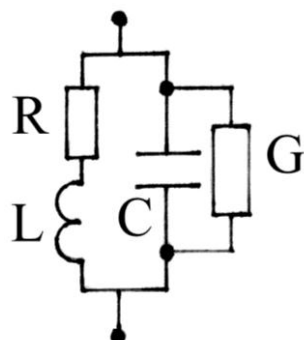


Рис. 4.4. Параллельный резонансный контур с учетом потерь

Реальная индуктивность L всегда имеет омические потери R , а конденсатор – проводимость G . Проводимость контура

$$\dot{Y} = \frac{1}{R + j\omega L} + G + j\omega C = \frac{R - j\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} + G + j\omega C.$$

В реальном случае $R \ll \omega L$ и

$$\dot{Y} = \left(\frac{R}{\omega^2 L^2} + G \right) + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) = G_{\text{экв.}} + jB_{\text{экв.}}$$

Условие резонанса

$$B_{\text{экв.}} = 0; \quad \omega C - \frac{1}{\omega L} = 0; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Вблизи резонанса

$$\dot{Y} = G_{\text{экв.}} + j\omega_0 C \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = G_{\text{экв.}} + jC \frac{\omega_0}{\omega} \left(\frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0} \right) = G_{\text{экв.}} + j \frac{2\Delta\omega}{\rho\omega_0}.$$

Введем понятие *добротности контура* как отношение реактивного сопротивления к активному (вблизи резонанса):

$$Q = \frac{R_{\text{экв.}}}{\omega_0 L} = \frac{\omega_0 C}{G_{\text{экв.}}}, \quad \text{тогда } \dot{Y} = G_{\text{экв.}} \left(1 + jQ \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right); \quad \dot{Z} = \frac{R_{\text{экв.}}}{1 + jQ \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}}.$$

Чтобы получить универсальное выражение, вводят обозначения

$$Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} = \xi, \quad \text{тогда}$$

$$\dot{Y} = G_{\text{ЭКВ.}}(1 + j\xi); \quad \dot{Z} = \frac{R_{\text{ЭКВ.}}}{1 + j\xi} = \frac{R_{\text{ЭКВ.}}}{1 + \xi^2} - j \frac{R_{\text{ЭКВ.}} \xi}{1 + \xi^2} = R + jX;$$

$$|\dot{Z}| = \frac{R_{\text{ЭКВ.}}}{\sqrt{1 + \xi^2}}; \quad R = \frac{R_{\text{ЭКВ.}}}{1 + \xi^2}; \quad X = -\frac{R_{\text{ЭКВ.}} \xi}{1 + \xi^2}; \quad \text{tg } \varphi = \frac{X}{R} = -\xi.$$

На рис. 4.5 представлены функции $f_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}}$, $f_2 = \frac{1}{1 + \xi^2}$, $f_3 = \frac{-\xi}{\sqrt{1 + \xi^2}}$, которые определяют зависимости $|\dot{Z}|$, R и X для параллельного контура вблизи резонанса.

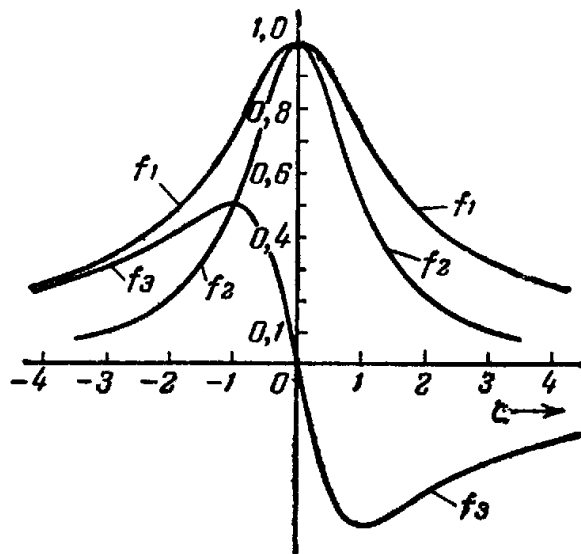


Рис. 4.5. Нормированные кривые модуля и активной и реактивной составляющих полного сопротивления параллельного резонансного контура $f_1 = 1/\sqrt{1 + \xi^2}$; $f_2 = 1/(1 + \xi^2)$; $f_3 = -\xi/(1 + \xi^2)$

Введем понятие *ширины полосы пропускания* $\pm \delta \omega$ как разность частот, при которых модуль полного сопротивления уменьшается до величины $\frac{1}{\sqrt{2}}$ от его значения при резонансе $\frac{|\dot{Z}|}{R_{\text{ЭКВ.}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$, где $\xi = Q \frac{2\delta\omega}{\omega_0} = 1$; $2\delta\omega = \frac{\omega_0}{Q}$; $\frac{2\delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{Q}$. Таким образом, относительная ширина полосы пропускания $\frac{2\delta\omega}{\omega_0}$ обратно пропорциональна добротности

контура Q . $d = \frac{1}{Q}$ носит название коэффициента потерь, или коэффициента затухания контура.

Найдем выражения для токов в ветвях параллельного резонансного контура с учетом потерь (рис. 4.4):

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C + \dot{I}_G.$$

В резонансе

$$I = I_R = \frac{U}{R}; \quad \dot{I}_L = -\dot{I}_C = -j \frac{U}{\rho} \quad \text{при } I_G \ll I_R; \quad \frac{I_C}{I_R} = \frac{I_L}{I_R} = \frac{R}{\rho} = Q.$$

Таким образом, в резонансе реактивные токи в Q раз больше активного тока. Активная мощность $P_a = \frac{U^2}{R}$; реактивная мощность $P_r = \frac{U^2}{\rho}$, $\frac{P_r}{P_a} = Q$.

Последовательный резонансный контур без потерь мощности в его элементах

Рассмотрим последовательный резонансный контур без потерь (рис. 4.6), как это было сделано выше для параллельного контура.

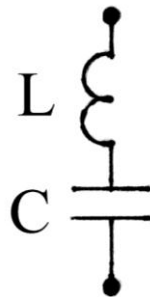


Рис. 4.6. Последовательный резонансный контур без потерь

После несложных преобразований получим, что для последовательного контура без потерь $X = \rho \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$; $C_{\text{экв.}} = -\frac{1}{\rho\omega} \frac{\omega_0}{2\Delta\omega}$; $L_{\text{экв.}} = \frac{\rho}{\omega} \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$. При $\omega < \omega_0$ реактивное сопротивление контура носит емкостный характер $C_{\text{экв.}}$, а при $\omega > \omega_0$ – индуктивный $L_{\text{экв.}}$ (рис. 4.7а, б). Сравнивая рис. 4.3 и 4.7, отметим свойство дуальности параллельного и последовательного контуров.

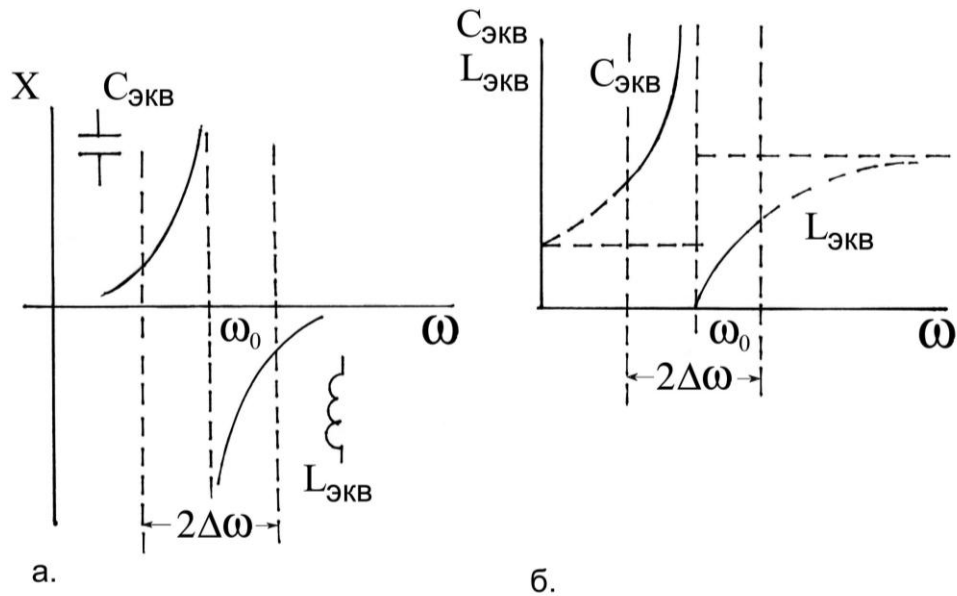


Рис. 4.7. Частотные характеристики

последовательного резонансного контура без потерь:

- а) зависимость реактивного сопротивления последовательного контура от частоты вблизи резонанса; б) зависимость эквивалентного сопротивления последовательного контура от частоты вблизи резонанса

Полученные формулы и свойства резонансных контуров будут использованы нами при анализе вариаторов частоты синхроциклотрона ПИЯФ.

Последовательный резонансный контур с учетом потерь мощности в его элементах

Рассмотрим последовательный резонансный контур с учетом потерь мощности в его элементах (рис. 4.8).

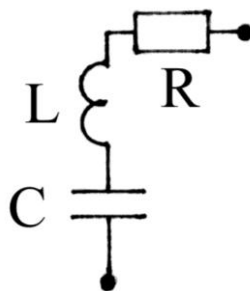


Рис. 4.8. Последовательный резонансный контур с активными потерями

Его сопротивление будет

$$\dot{Z} = R + jX = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\omega L \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0^2},$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Условие резонанса

$$\omega = \omega_0; X = 0.$$

Используя введенные обозначения $\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$, $\xi = Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$,

$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\rho}{R}$, получим, что сопротивление и проводимость последовательного контура с учетом потерь вблизи резонанса $\omega \approx \omega_0$

$$\dot{Z} = R + jX = R(1 + j\xi); \dot{Y} = G + jB = \frac{G}{1 + j\xi};$$

$$|\dot{Z}| = R\sqrt{1 + \xi^2}; R = R; X = R\xi; \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} = \xi;$$

$$|\dot{Y}| = \frac{G}{\sqrt{1 + \xi^2}}; G = \frac{1}{R(1 + \xi^2)}; B = -\frac{\xi}{R(1 + \xi^2)}.$$

Заметим, что графики f_1 , f_2 и f_3 (рис. 4.5) отражают зависимости и для последовательного контура.

4.2. Радиотехнические системы с распределенными параметрами

Радиотехнические системы с распределенными параметрами R , L , C можно условно разделить на три группы:

- 1) линии электропередачи (погонные величины R , L , C изменяются вдоль одной оси координат X , Y , Z);
- 2) мембраны (R , L , C изменяются вдоль двух осей координат X , Y , Z);
- 3) объемные резонаторы (R , L , C изменяются вдоль всех трех координат).

Линии электропередачи

Однородные линии

Рассмотрим двухпроводную однородную линию электропередачи, подключенную с одного конца к генератору напряжения \dot{U}_r и нагруженную с другого конца на комплексное сопротивление нагрузки \dot{Z}_n (рис. 4.9).

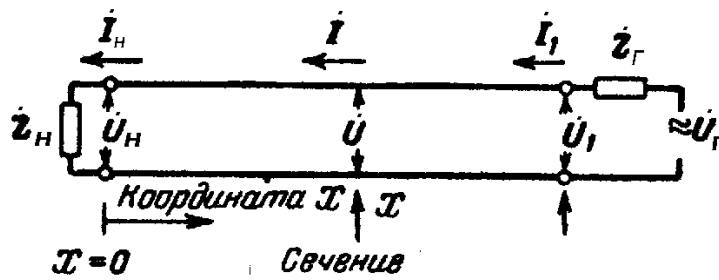


Рис. 4.9. Принципиальная схема однородной линии

Координату X вдоль длины линии будем отсчитывать от места подключения нагрузки Z_H в направлении к возбуждающему линию генератору Z_G . \dot{U} и \dot{I} – комплексные амплитуды напряжения и тока в точке линии, отстоящей от ее начала на расстоянии x . Выделим в линии элемент dx , находящийся на расстоянии x от начала линии. Радиотехнические параметры этого элемента dx представлены на рис. 4.10.

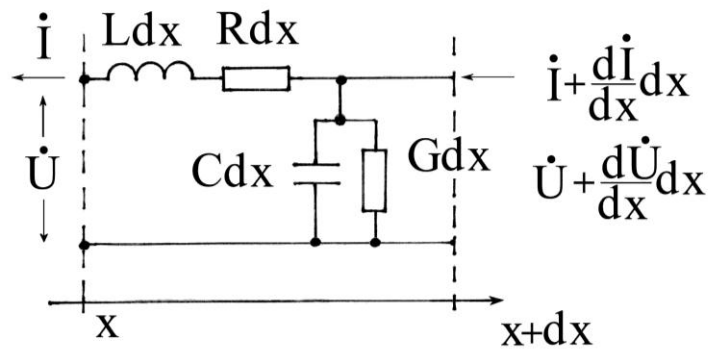


Рис. 4.10. Элемент линии длиной dx . R (Ом/м), L (Гн/м), C (Ф/м), G (1/Ом·м) – погонные величины сопротивления, индуктивности, емкости и проводимости для рассматриваемого участка линии. Rdx , Ldx , Cdx , Gdx – величины сопротивления, индуктивности, емкости и проводимости для участка линии длиной dx

Используя закон Ома для четырехполюсника (рис. 4.10), получим

$$\begin{cases} \left(\dot{U} + \frac{d\dot{U}}{dx} \right) - \dot{U} = \dot{I} (R + j\omega L) dx \\ \left(\dot{I} + \frac{d\dot{I}}{dx} \right) = \dot{I} + \dot{U} (G + j\omega C) dx \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}}{dx} = \dot{I}(R + j\omega L) dx \\ \frac{d\dot{I}}{dx} = U(G + j\omega C) dx \end{cases} \quad (4.3)$$

Уравнения (4.3) можно преобразовать к виду

$$\frac{d^2\dot{U}}{dx^2} - \kappa^2\dot{U} = 0; \quad \frac{d^2\dot{I}}{dx^2} - \kappa^2\dot{I} = 0, \quad (4.4)$$

где $\kappa = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \kappa_\alpha + j\kappa_\beta$. Уравнения (4.4) называются волновыми уравнениями однородной линии, решение которых может быть представлено в виде

$$\dot{U} = \dot{A}e^{\kappa x} + \dot{B}e^{-\kappa x}; \quad \dot{I} = \frac{1}{R + j\omega L} \frac{d\dot{U}}{dx} = \frac{\kappa}{R + j\omega L} (\dot{A}e^{\kappa x} - \dot{B}e^{-\kappa x}). \quad (4.5)$$

Так как $\frac{R + j\omega L}{\kappa} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \dot{\rho} = \rho_\alpha + j\rho_\beta$ — комплексное волновое сопротивление линии, то

$$\dot{I} = \frac{1}{\dot{\rho}} (\dot{A}e^{\kappa x} - \dot{B}e^{-\kappa x}). \quad (4.6)$$

Рассмотрим физический смысл полученных уравнений (4.5) и (4.6). Переходя от комплексных амплитуд к действительным, получим

$$\dot{u} = Ae^{\kappa x + j\omega t} + Be^{-\kappa x + j\omega t} = Ae^{\kappa_\alpha x} e^{j(\omega t + \kappa_\beta x)} + Be^{-\kappa_\alpha x} e^{j(\omega t - \kappa_\beta x)}. \quad (4.7)$$

Полученное решение есть сумма прямой (по направлению x) и обратной (против x) волны. Коэффициент κ_α характеризует затухание. Амплитуда прямой и обратной волн уменьшается по мере их распространения, причем затухание амплитуд для прямой и обратной волн всегда > 0 и одинаково по величине. Фаза прямой волны $\omega t + \kappa_\beta x = \varphi_{пр.}$. Фаза обратной волны $\omega t - \kappa_\beta x = \varphi_{обр.}$. Из (4.7) можно найти скорость распространения волны. Зафиксируем «нулевую» фазу $\omega t + \kappa_\beta x = 0$, отсюда фазовая скорость

$$V_\phi = \frac{dx}{dt} = \frac{-\omega}{\kappa_\beta}.$$

Бегущая в линии волна переносит мощность

$$P = \frac{1}{2}IU = \frac{1}{2}I^2\rho = \frac{1}{2} \frac{U^2}{\rho}.$$

При согласовании линии $\dot{Z}_H = \dot{\rho}$, когда имеется только падающая волна, эта мощность P_0 полностью подводится к сопротивлению нагрузки \dot{Z}_H и поглощается в ее активной части. При $\dot{Z}_H \neq \dot{\rho}$ отраженная волна уносит часть этой мощности обратно. Поглощенная в \dot{Z}_H мощность при этом равна

$$P = \frac{1}{2} I_{\min} U_{\max} = \frac{1}{2} I_{\max} U_{\min} = \frac{1}{2} m I_{\max}^2 \rho = \frac{1}{2} m \frac{U_{\max}^2}{\rho} = m P_0.$$

Таким образом, только бегущие волны передают в нагрузку мощность. В режиме стоячей волны мощность в нагрузку не поступает.

Однородная линия без потерь мощности

В системах, рассматриваемых нами в дальнейшем, погонные омические сопротивления много меньше их реактивных сопротивлений $R \ll 1 / \omega C$, $R \ll \omega L$. Поэтому рассмотрим свойства линии без потерь.

Полагая $R = 0$, $G = 0$, получим

$$\kappa_\alpha = 0; \kappa_\beta = \omega \sqrt{LC}; \kappa = j \omega \sqrt{LC},$$

и фазовая скорость распространения волны

$$V_\phi = \frac{1}{\sqrt{LC}} = V_{\text{св.}}; \kappa_\beta = \frac{\omega}{V_{\text{св.}}} = \frac{2\pi}{TV_{\text{св.}}} = \frac{2\pi}{\lambda},$$

где $V_{\text{св.}}$ – скорость распространения света. Заметим, что в линии с учетом потерь скорость распространения волны меньше $V_{\text{св.}}$ (то же можно сказать и о неоднородной линии). Если линия расположена в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ , то скорость распространения волны будет

$$V_\phi = \frac{V_{\text{св.}}}{\sqrt{\epsilon}}.$$

Для линии без потерь волновые уравнения вместо (4.5) будут иметь вид

$$\dot{U} = A e^{j \frac{2\pi x}{\lambda}} + B e^{-j \frac{2\pi x}{\lambda}}; \dot{I} = \frac{1}{\rho} \left(A e^{j \frac{2\pi x}{\lambda}} - B e^{-j \frac{2\pi x}{\lambda}} \right). \quad (4.8)$$

Определим постоянные A и B . При $x = 0$

$$U = U_H = A + B; I = I_H = \frac{1}{\rho} (A - B); U_H = I_H Z_H. \quad (4.9)$$

Из системы (4.9) находим

$$A = \frac{U_H + \rho I_H}{2} = \frac{U_H}{2} \left(1 + \frac{\rho}{Z_H} \right); B = \frac{U_H - \rho I_H}{2} = \frac{U_H}{2} \left(1 - \frac{\rho}{Z_H} \right).$$

Отметим, что уравнения (4.8) с учетом формул Эйлера

$$\cos \alpha = \frac{e^{j\alpha} + e^{-j\alpha}}{2}, \quad \sin \alpha = \frac{e^{j\alpha} - e^{-j\alpha}}{2j}$$

могут быть также записаны в виде

$$\dot{U} = \dot{U}_H \cos \frac{2\pi x}{\lambda} + j \dot{I}_H \rho \sin \frac{2\pi x}{\lambda}; \quad \dot{I} = \dot{I}_H \cos \frac{2\pi x}{\lambda} + j \frac{\dot{U}_H}{\rho} \sin \frac{2\pi x}{\lambda}. \quad (4.10)$$

Введем коэффициент отражения

$$\dot{\Gamma} = \frac{B}{A} = \frac{\dot{Z}_H - \rho}{\dot{Z}_H + \rho}. \quad (4.11)$$

Заметим, что коэффициент отражения не зависит от x , т. е. одинаков для любого сечения линии. Модуль $|\dot{\Gamma}|$ – это отношение амплитуды обратной волны к амплитуде прямой волны в нагрузке линии (в точке $x = 0$). Фаза $\dot{\Gamma}$ – это разность фаз между прямой и обратной волнами в нагрузке линии (в точке $x = 0$).

Введем эквивалентное сопротивление линии в сечении x . Учитывая (4.10), получим

$$\dot{Z}_x = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{\dot{Z}_H + j\rho \operatorname{tg} \frac{2\pi x}{\lambda}}{1 + j \frac{\dot{Z}_H}{\rho} \operatorname{tg} \frac{2\pi x}{\lambda}}. \quad (4.12)$$

Использование зависимости (4.12) позволяет преобразовать линию длины ℓ с нагрузкой \dot{Z}_H в эквивалентную ей укороченную линию длины $\ell - x$ с нагрузкой \dot{Z}_x (рис. 4.11а, б).

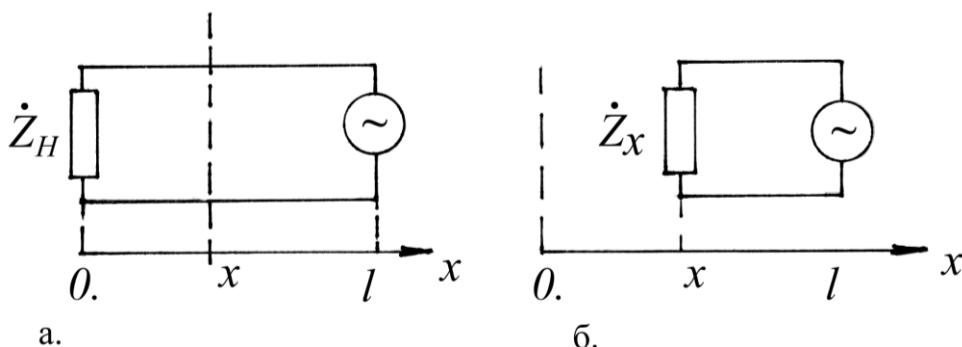


Рис. 4.11. Схема преобразования длины линии: а) линия длины ℓ с нагрузкой \dot{Z}_H ; б) линия длины $\ell - x$ с нагрузкой \dot{Z}_x

Рассмотрим частные случаи однородной линии без потерь, которые широко применяются в радиотехнике и имеют непосредственное отношение к дуантной системе синхроциклотрона и системе растяжки пучка с использованием C -электрода.

В случае *короткозамкнутой линии* ($\dot{Z}_n = 0$) $U_n = 0$ и вместо (4.10) получим

$$\dot{U} = j\dot{I}_n \rho \sin \frac{2\pi x}{\lambda}; \dot{I} = \dot{I}_n \cos \frac{2\pi x}{\lambda}.$$

Коэффициент отражения (4.11) для короткозамкнутой линии $\Gamma = -1$, $|\Gamma| = 1$. Это означает, что амплитуда обратной волны равна амплитуде падающей, а фаза $\dot{\Gamma}$ равна 180° . В линии образуется стоячая волна.

Эквивалентное сопротивление (4.12) для короткозамкнутой линии будет

$$\dot{Z}_x = j\rho \operatorname{tg} \frac{2\pi x}{\lambda} = jX(x).$$

Зависимость входного реактивного сопротивления X короткозамкнутой линии от относительной длины линии x/λ изображена на рис. 4.12. Таким образом, реактивное сопротивление X может иметь как индуктивный ($X > 0$), так и емкостный ($X < 0$) характер. Заметим, что через интервал длины линии $\Delta x = \frac{\lambda}{2}$ ее сопротивление становится равным нулю, и в этих точках стоячей волны возникают узлы напряжения и пучности тока (рис. 4.13). Заметим также, что свойства линии на отдельных ее участках эквивалентны свойствам контуров: на участках, где $X > 0$, эквивалентны параллельному контуру, на участках, где $X < 0$, – последовательному.

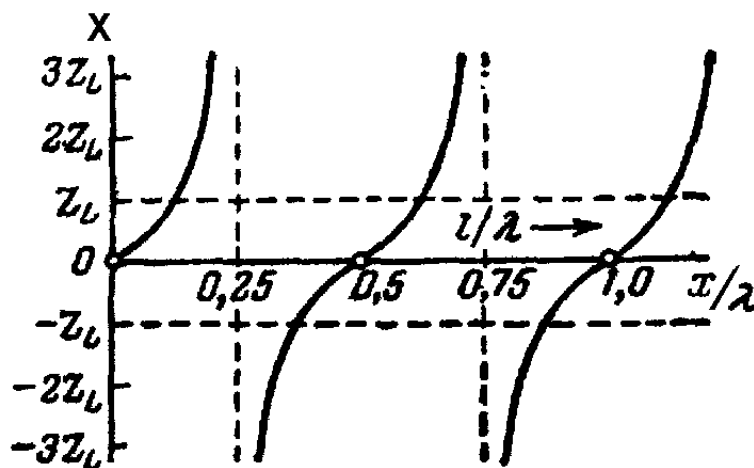


Рис. 4.12. Входное реактивное сопротивление короткозамкнутой линии

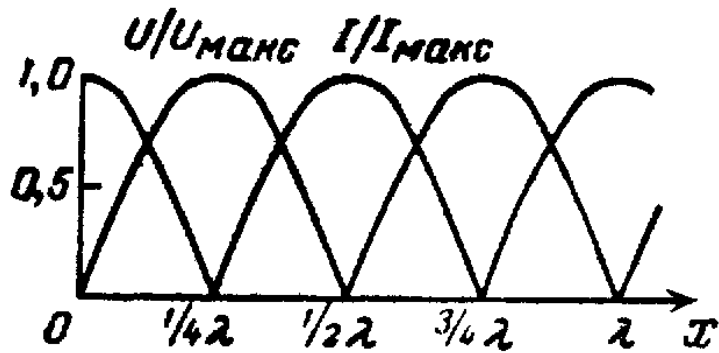


Рис. 4.13. Ток и напряжение вдоль короткозамкнутой линии

Для линии, разомкнутой на конце ($\dot{Z}_H = \infty$), $I_H = 0$ и вместо (4.10) получим

$$\dot{U} = \dot{U}_H \cos \frac{2\pi x}{\lambda}; \quad \dot{I} = j \frac{\dot{U}_H}{\rho} \sin \frac{2\pi x}{\lambda}.$$

Коэффициент отражения (4.11) для разомкнутой линии $\Gamma = 1$. Это означает, что амплитуда обратной волны равна амплитуде падающей, а фаза равна нулю. В линии образуется стоячая волна.

Эквивалентное сопротивление (4.12) для разомкнутой линии будет

$$\dot{Z}_x = -j\rho \operatorname{ctg} \frac{2\pi x}{\lambda} = jX(x).$$

Зависимость входного реактивного сопротивления X для разомкнутой линии от относительной длины линии x/λ изображена на рис. 4.14. Через интервал длины линии $\Delta x = \frac{\lambda}{2}$ ее сопротивление становится равным нулю, и в этих точках возникают узлы тока и пучности напряжения (рис. 4.15).

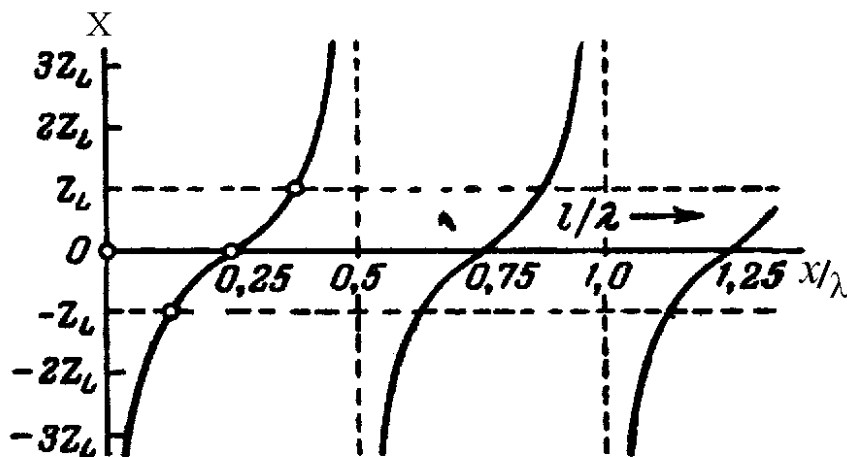


Рис. 4.14. Входное реактивное сопротивление разомкнутой линии

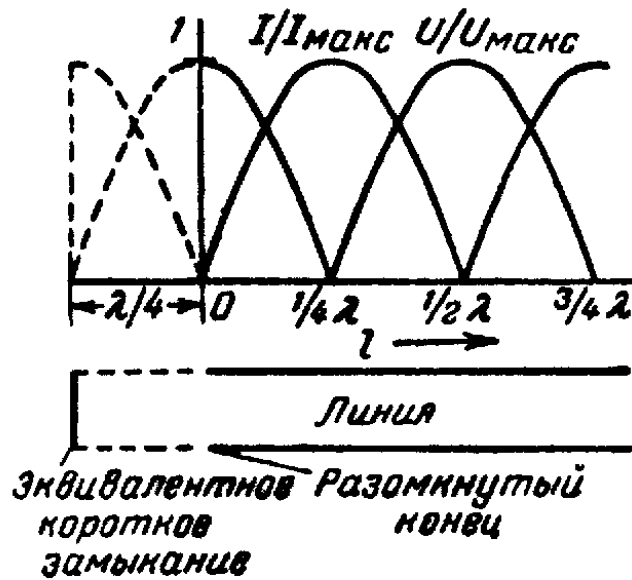


Рис. 4.15. Ток и напряжение вдоль разомкнутой линии

Пусть длина линии, замкнутой на реактивное индуктивное сопротивление ($\dot{Z}_H = j\omega L$), равна ℓ . Рассмотрим короткозамкнутую линию, длина которой больше длины исходной линии ℓ на величину ℓ_L (рис. 4.16а, б).

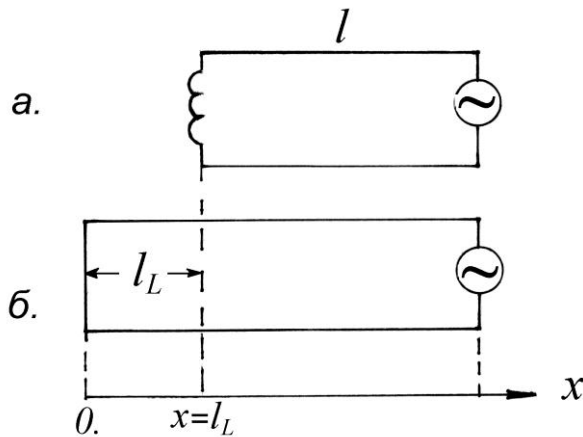


Рис. 4.16. Схема преобразования длины линии: а) линия длиной ℓ с индуктивной нагрузкой; б) короткозамкнутая линия длиной $\ell + x$

Согласно (4.12) эквивалентное сопротивление линии в сечении $x = \ell_L$ будет

$$\dot{Z}_x = j\rho \operatorname{tg} \frac{2\pi \ell_L}{\lambda}.$$

Отсюда

$$\ell_L = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{\rho}.$$

Таким образом, индуктивную нагрузку линии можно заменить короткозамкнутым отрезком линии длины ℓ_L , и исследование линии сводится к вышеописанному случаю короткозамкнутой линии длиной $\ell + \ell_L$.

Для случая линии, замкнутой на реактивное емкостное сопротивление $\left(\dot{Z}_H = \frac{1}{j\omega C} \right)$, аналогично предварительно рассмотрим разомкнутую линию, длина которой больше исходной на величину ℓ_C (рис. 4.17а, б).

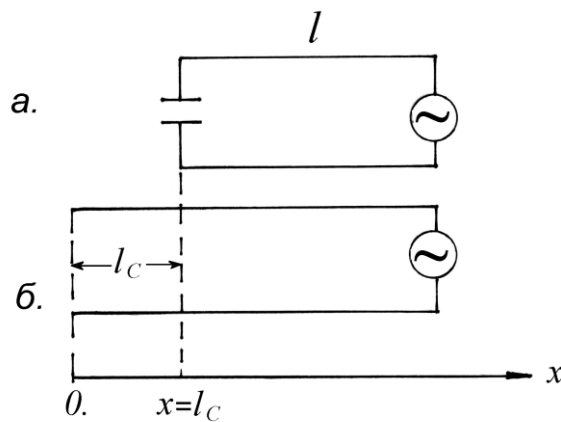


Рис. 4.17. Схема преобразования длины линии: а) линия длиной ℓ с емкостной нагрузкой; б) разомкнутая линия длиной $\ell + x$

Согласно (4.12) эквивалентное сопротивление линии в сечении $x = \ell_C$ будет

$$\dot{Z}_x = j\rho \operatorname{tg} \frac{2\pi \ell_C}{\lambda}. \quad (4.13)$$

Отсюда

$$\ell_C = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arcctg} \frac{1}{\rho\omega C}.$$

Таким образом, емкостную нагрузку линии можно заменить разомкнутым отрезком линии длины ℓ_C , и исследование линии сводится к вышеописанному случаю разомкнутой линии длиной $\ell + \ell_C$.

Отметим, что во всех разобранных выше четырех случаях $\frac{U_{\max}}{I_{\max}} = \rho$.

Для линии, замкнутой на активное сопротивление ($Z_{\text{н}} = R$), рассмотрим случай $Z_{\text{н}} = \rho$. В этом случае справедливы уравнения (4.10), и коэффициент отражения (4.11) будет

$$\dot{I} = \frac{\dot{Z}_{\text{н}} - \rho}{\dot{Z}_{\text{н}} + \rho} = 0,$$

т. е. отраженная волна отсутствует и есть только одна волна, бегущая от генератора к нагрузке. Такой режим не зависит от длины линии.

Рассмотрим линию, нагруженную активным сопротивлением произвольной величины ($Z_{\text{н}} = R = m\rho$). Пусть $m = \frac{R}{\rho} > 1$, тогда, используя (4.10), получим

$$\dot{U} = \dot{U}_{\text{н}} \left(\cos \frac{2\pi x}{\lambda} + j \frac{1}{m} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \right); \quad \dot{I} = \dot{I}_{\text{н}} \left(\cos \frac{2\pi x}{\lambda} + jm \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \right)$$

и их модули

$$U = U_{\text{н}} \sqrt{\cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda} + \frac{1}{m^2} \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda}}; \quad I = I_{\text{н}} \sqrt{\cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda} + m^2 \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda}}. \quad (4.14)$$

Найдем минимальные и максимальные значения модуля напряжения U . Запишем (4.14) иначе:

$$U = U_{\text{н}} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{m^2} - 1 \right) \sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda}}. \quad (4.15)$$

Из (4.15) видно, что $U_{\text{min}} = U_{\text{н}}$, когда $\sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda} = 0$, и $U_{\text{max}} = \frac{U_{\text{н}}}{m}$, когда $\sin^2 \frac{2\pi x}{\lambda} = 1$. Отношение $\frac{U_{\text{min}}}{U_{\text{max}}} = m$ называют коэффициентом бегущей

волны – КБВ. Обратную величину $\frac{1}{m}$ называют коэффициентом стоячей волны – КСВ. Если m близко к единице $m = 1 - \Delta m$, то $< \Delta m$ называют рассогласованием.

На рис. 4.18 приведены нормированные зависимости U/U_{max} и I/I_{max} от длины волны λ при $m = 0,5$. Кривые имеют одинаковую форму и смещены на $\lambda/4$ относительно друг друга. На рис. 4.19 приведены зависимости U/U_{max} при различных m от 1 до 0. При $m \neq 1$ в линии устанавливается суперпозиция стоячих и бегущих волн. Заметим, что U_{max} (определяющее пробивную прочность линии) в $\frac{1}{\sqrt{m}}$ раз больше, чем напряжение в согласованной линии.

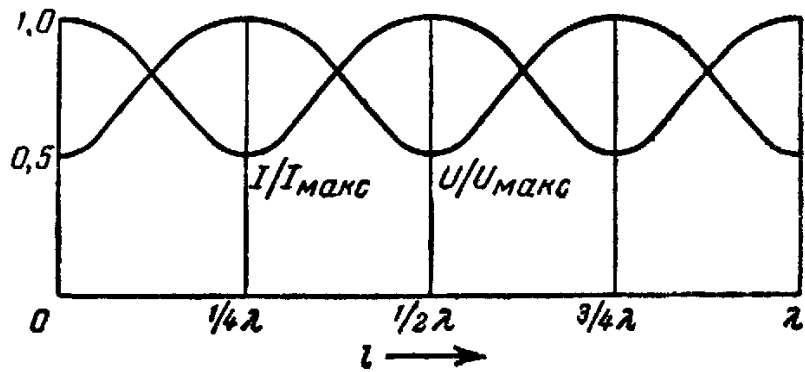


Рис. 4.18. Ток и напряжение вдоль линии, нагруженной активным сопротивлением $Z_H = m\rho$

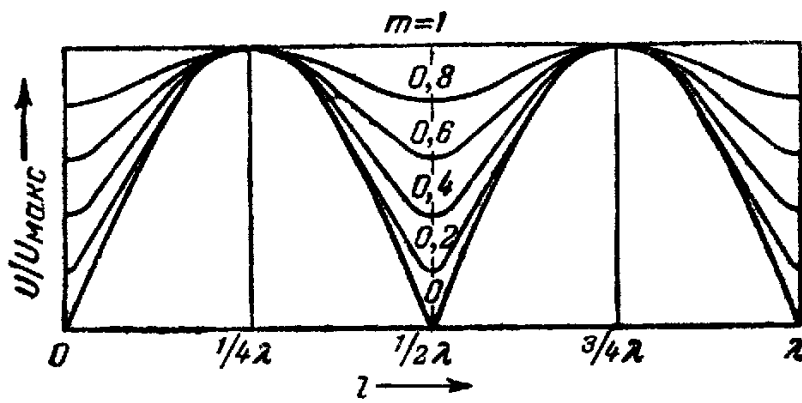


Рис. 4.19. Кривые напряжения при разных m

Если линия нагружена произвольным сопротивлением \dot{Z}_H , то, согласно (4.12), комплексное сопротивление нагрузки можно заменить активным сопротивлением $m\rho$ с добавлением перед ним отрезка линии длиной l' . Тогда

$$\dot{Z}(x) = \rho \frac{m + j \operatorname{tg} 2\pi \frac{l' + x}{\lambda}}{1 + j m \operatorname{tg} 2\pi \frac{l' + l(x)}{\lambda}}$$

и исследование линии сводится к варианту, разобранному ранее.

На рис. 4.20а–в показаны распределения в линии напряжений и токов при различных видах нагрузки.

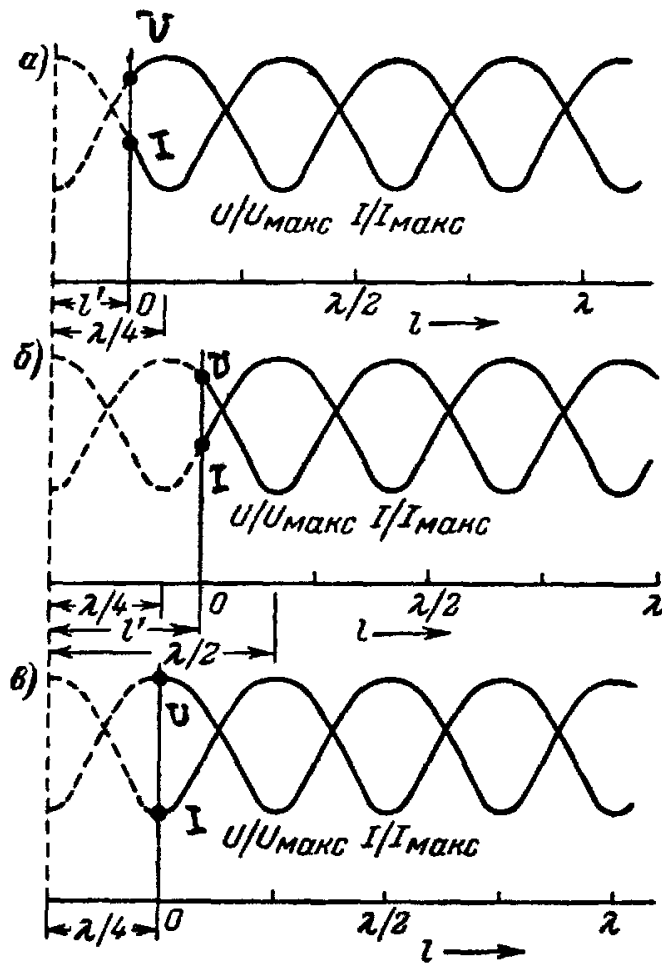


Рис. 4.20. Кривые напряжения при комплексных нагрузках:
 а) нагрузка с индуктивной фазой; б) нагрузка с емкостной фазой;
 в) активная нагрузка

Коэффициент перекрытия резонансной частоты линии

В связи с тем что для работы синхроциклотрона требуется пере-стройка резонансной частоты его ускоряющей системы, рассмотрим воп-рос о коэффициенте перекрытия частоты в линии.

Рассмотрим отрезок линии длиной l , нагруженный переменным емкостным сопротивлением (рис. 4.21). Согласно (4.12), сопротивление линии в точке $x = 0$ будет

$$Z_{x=0} = \rho \frac{-j \frac{1}{\omega C} + j \rho \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda}}{1 + \frac{1}{\rho \omega C} \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda}}$$

В резонансе $Z_{x=0} = \infty$, следовательно,

$$1 + \frac{1}{\rho \omega C} \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda} = 0; \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda} = -\rho \omega C. \quad (4.16)$$

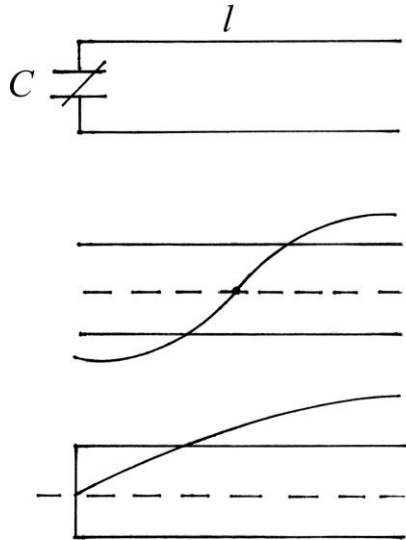


Рис. 4.21. Коэффициент перекрытия резонансной частоты линии

Определим, как меняется резонансная длина волны линии при изменении емкостной нагрузки от C_{\min} до C_{\max} в пределе $C_{\min} = 0$, $C_{\max} = \infty$. При $C = 0$ из (4.16) следует, что $\frac{2\pi\ell}{\lambda_1} = \pi$ и $\lambda_1 = 2\ell$. При $C = \infty$ из (4.16)

следует, что $\frac{2\pi\ell}{\lambda_2} = \frac{\pi}{2}$ и $\lambda_2 = 4\ell$. Коэффициент перекрытия по частоте

$$K_f = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{4\ell}{2\ell} = 2.$$

Распределение эпюр напряжений для этих случаев показано на рис. 4.21. Таким образом, реальный коэффициент перекрытия по частоте для однородной линии не может быть больше двух, $K_f = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} \leq 2$.

Неоднородные линии

Как отмечалось выше, для ускорения протонов до энергии 1 ГэВ в синхроциклотроне ПИЯФ требуется перекрытие по частоте

$$K_f = \frac{\omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{к}}} = \frac{E_0 + W_{\text{к}}}{E_0} \frac{B_0}{B_{\text{к}}} = 2,3,$$

где $\omega_{\text{н}}$ – частота ускоряющей системы в начале цикла ускорения; $\omega_{\text{к}}$ – частота ускоряющей системы в конце цикла ускорения. Обеспечить величину перекрытия $K_f = 2,3$ в однородной линии невозможно, т. к. для нее $K_f \leq 2$. Реализовать $K_f > 2$ возможно в неоднородной линии с переменным по длине линии волновым сопротивлением $\rho(x)$.

Покажем, как изменяется коэффициент K_f в случае использования неоднородной линии. Ограничимся простейшим случаем, когда линия длиной l состоит из двух отрезков длиной l_1 и l_2 , имеющих разные параметры ρ_1 и ρ_2 (рис. 4.22):

$$\rho_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}; \rho_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}.$$

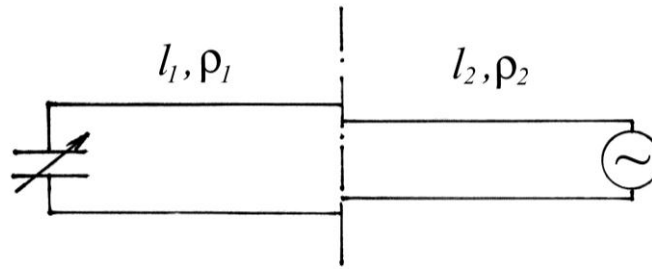


Рис. 4.22. Схема двухступенчатой неоднородной линии

Как известно, в однородной линии $\frac{U}{I} = \rho$. В рассматриваемой линии

$$\frac{U_1}{\rho_1} = \frac{U_2}{\rho_2} = I; \quad \frac{U_2}{U_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

На границе отрезков l_1 и l_2 имеется излом в эюре распределения напряжения и тока. Для простоты будем считать $l_1 = l_2 = l/2$. Сопротивление на стыке двух отрезков при $x = l/2$, согласно (4.13), будет

$$\dot{Z}(l/2) = j\rho_1 \operatorname{tg} \frac{2\pi l/2}{\lambda} = j\rho_1 \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda}.$$

Используя (4.12), найдем входное сопротивление линии $x = l$:

$$\dot{Z}_{\text{вх.}} = \frac{\dot{Z}_H + j\rho_2 \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda}}{1 + j \frac{\dot{Z}_H}{\rho_2} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda}} = \frac{j\rho_1 \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda} + j\rho_2 \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda}}{1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda}} = \frac{j(\rho_1 + \rho_2) \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda}}{1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \operatorname{tg}^2 \frac{\pi l}{\lambda}}.$$

При $C = \infty$ короткозамкнутая линия $\dot{Z}_{\text{вх.}} = 0$:

$$\operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda} = 0; \quad \frac{\pi l}{\lambda} = 2\pi; \quad \lambda = \frac{l}{2}.$$

При $C = 0$ разомкнутая линия $\dot{Z}_{\text{вх.}} = \infty$:

$$1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \operatorname{tg}^2 \frac{\pi l}{\lambda} = 0; \quad \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda} = 1; \quad \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda} = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}};$$

$$\lambda = \frac{\pi \ell}{\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}} = \frac{4\ell}{\frac{4}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}}.$$

Если $\rho_1 = \rho_2$, то $\operatorname{arctg} 1 = \pi/4$ и $\lambda = 4\ell$. Если $\rho_1 > \rho_2$, то $\frac{4}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} < 1$

и $\lambda > 4\ell$. Если $\rho_2 > \rho_1$, то $\frac{4}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} > 1$ и $\lambda < 4\ell$.

Таким образом, коэффициент перекрытия по частоте

$$K_f = \frac{f_{\text{н}}}{f_{\text{к}}} = \frac{\lambda_{\text{к}}}{\lambda_{\text{н}}} = \frac{2}{4\pi \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}},$$

и при $\rho_1 > \rho_2$ $K_f = \frac{f_{\text{н}}}{f_{\text{к}}} > 2$, при $\rho_1 < \rho_2$ $K_f = \frac{f_{\text{н}}}{f_{\text{к}}} < 2$, при $\rho_1 = \rho_2$ $K_f = \frac{f_{\text{н}}}{f_{\text{к}}} = 2$.

В общем случае неоднородной линии, способы расчета которой будут приведены в дальнейшем, для получения коэффициента перекрытия по частоте > 2 необходимо, чтобы волновое сопротивление линии $\rho(x)$ убывало вдоль длины линии x . Заметим, что в качестве предельного случая неоднородной линии можно рассматривать контур с сосредоточенными параметрами L, C ($\rho_1 \rightarrow \infty, \rho_2 \rightarrow 0$), для которого, как известно, коэффициент перекрытия может быть любым, вплоть до ∞ .

Неоднородная линия с переменным волновым сопротивлением

Рассмотрим одномерную задачу. Пусть задана линия, у которой индуктивность $L(x)$ и емкость $C(x)$, рассчитанные на единицу длины, являются функциями от x . В этом случае имеем

$$\frac{1}{\sqrt{L(x)C(x)}} = c; \quad \sqrt{\frac{L(x)}{C(x)}} = \rho(x),$$

где c – скорость света; $\rho(x)$ – волновое сопротивление линии.

Уравнения линии можно записать в виде

$$\frac{dV}{dx} = -j\omega L(x)I(x); \quad \frac{dI}{dx} = -j\omega C(x)V(x).$$

Исключая из этих уравнений I , получим

$$\frac{d^2V}{dx^2} - \frac{\rho'}{\rho} \frac{dV}{dx} + k^2V = 0, \quad \text{где } k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

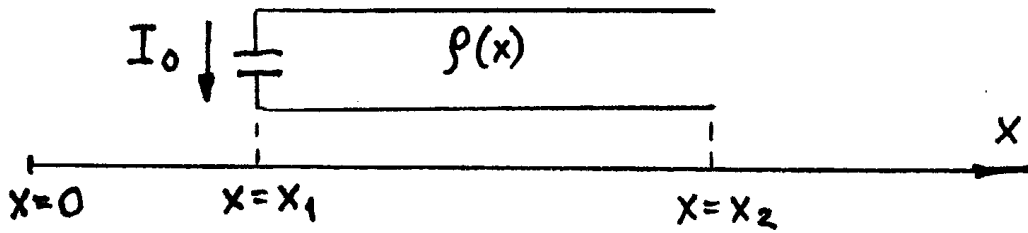


Рис. 4.23. Схема линии с переменным волновым сопротивлением $\rho(x)$

Рассмотрим в качестве примера отрезок линии с переменным волновым сопротивлением, изменяющимся по закону $\rho = \frac{A}{x}$, где $A = \text{const}$, разомкнутый на конце, и к началу которого подключен вариатор частоты (рис. 4.23). В этом случае уравнение линии принимает вид

$$\frac{d^2V}{dx^2} - \frac{1}{x} \frac{dV}{dx} + k^2V = 0.$$

Условия на концах линии записываются в виде

$$\left. \frac{dV}{dx} \right|_{x=x_1} = -j\omega L(x_1)I_0 = -jk\rho(x_1)I_0;$$

$$\left. \frac{dV}{dx} \right|_{x=x_2} = 0.$$

Решение уравнения при заданных граничных условиях имеет вид

$$V(x) = -j\rho(x_1)I_0 \frac{J_0(kx) - N_0(kx) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)}}{N_1(kx_1) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)} - J_1(kx_1)}.$$

Здесь $J_n(kx)$ и $N_n(kx)$ – функция Бесселя 1 и 2-го рода.

Условие последовательного резонанса отрезка линии выражается в виде

$$J_0(kx_1) - N_0(kx_1) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)} = 0.$$

Условие параллельного резонанса

$$N_1(kx_1) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)} - J_1(kx_1) = 0.$$

Входное сопротивление линии

$$Z_{\text{вх.}} = \frac{U(x_1)}{I_0} = -j\rho(x_1) \frac{J_0(kx_1) - N_0(kx_1) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)}}{N_1(kx_1) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)} - J_1(kx_1)}.$$

Коэффициент трансформации напряжения от конца к началу линии

$$n_g = \frac{U(x_1)}{U(x_2)} = \frac{J_0(kx_1) - N_0(kx_1) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)}}{J_0(kx_2) - N_0(kx_2) \frac{J_1(kx_2)}{N_1(kx_2)}}.$$

Метод расчета неоднородной линии с переменным волновым сопротивлением

Одной из возможностей аппроксимации дуанта синхроциклотрона является представление его в виде неоднородной ступенчатой линии, состоящей из последовательно соединенных отрезков линии с разными волновыми сопротивлениями (рис. 4.24).

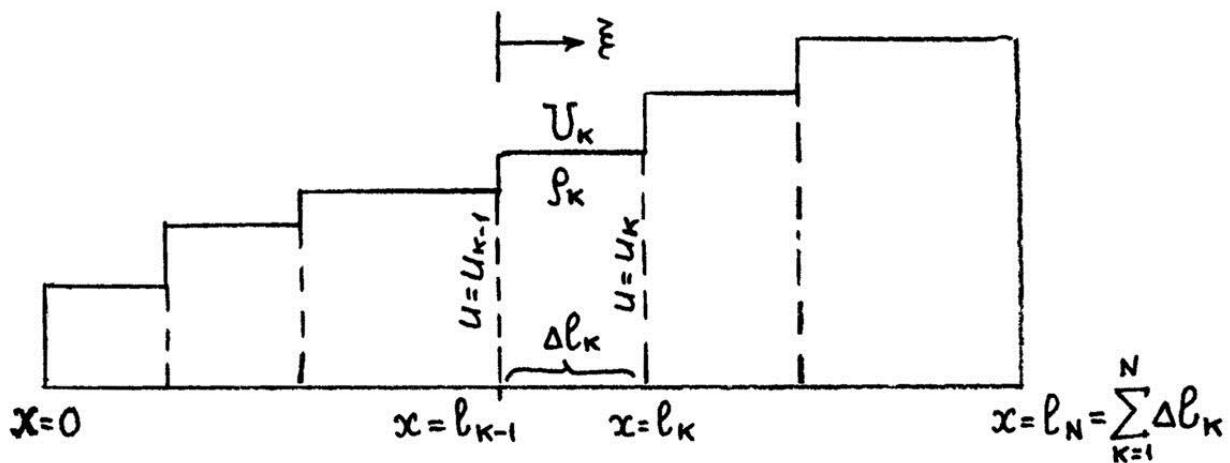


Рис. 4.24. Схема дуанта в виде отдельных участков с разными волновыми сопротивлениями

Разобьем дуант на N участков (отрезков) перпендикулярно его продольной оси. Рассмотрим k -й отрезок, заключенный в пределах от $x = l_{k-1}$ до $x = l_k$. Длины каждого из отрезков обозначим через $\Delta l_k = l_k - l_{k-1}$, а его волновое сопротивление через ρ_k . Входное сопротивление линии в точке $x = l_k$ обозначим через X_k :

$$X_k = \frac{X_{k-1} + \rho_k \operatorname{tg} \frac{2\pi \Delta \ell_k}{\lambda}}{1 - \frac{X_{k-1}}{\rho_k} \operatorname{tg} \frac{2\pi \Delta \ell_k}{\lambda}}.$$

На конце первого отрезка

$$X_1 = -\rho_1 \operatorname{ctg} \frac{2\pi \Delta \ell_1}{\lambda}.$$

Распределение напряжения вдоль каждого из отрезков может быть записано в виде

$$U_k(\xi) = V_k \cos \left(\frac{2\pi \xi}{\lambda} + \varphi_k \right),$$

где V_k – амплитуда напряжения на k -м отрезке, а φ_k – фаза. Координата ξ отсчитывается от начала каждого k -го отрезка.

Найдем рекуррентные соотношения для определения U_k . Для этого заменим отрезок линии, находящийся перед k -м отрезком и имеющий входное сопротивление X_{k-1} , на отрезок линии, разомкнутой на конце и имеющей волновое сопротивление ρ_k и входное сопротивление X_{k-1} . Длину этого отрезка обозначим через ℓ'_{k-1} . Получаем

$$\ell'_{k-1} = \begin{cases} \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{\rho_k}{|X_{k-1}|} & \text{при } X_{k-1} < 0 \\ \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{\rho_k}{X_{k-1}} & \text{при } X_{k-1} > 0 \end{cases}.$$

Таким образом, мы имеем отрезок линии с волновым сопротивлением ρ_k , имеющий длину $\Delta \ell_k + \ell'_{k-1}$ и разомкнутый на конце. Напряжение на левом разомкнутом конце этой линии равно U_k . В начале и в конце k -го отрезка имеем

$$U_k = V_k \cos \frac{2\pi(\Delta \ell_k + \ell'_{k-1})}{\lambda};$$

$$U_{k-1} = V_k \cos \frac{2\pi \ell'_{k-1}}{\lambda} = V_{k-1} \cos \frac{2\pi(\Delta \ell_{k-1} + \ell'_{k-2})}{\lambda}.$$

Отсюда следуют соотношения

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\cos \frac{2\pi \Delta \ell_1}{\lambda}}{\cos \frac{2\pi \ell'_1}{\lambda}};$$

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{\cos \frac{2\pi(\Delta\ell_2 + \ell'_1)}{\lambda}}{\cos \frac{2\pi\ell'_2}{\lambda}}; \dots; \frac{V_k}{V_{k-1}} = \frac{\cos \frac{2\pi(\Delta\ell_{k-1} + \ell'_{k-2})}{\lambda}}{\cos \frac{2\pi\ell'_{k-1}}{\lambda}} \dots$$

Таким образом, получаем выражение для амплитуды напряжения на k -м отрезке в виде

$$\frac{V_k}{V_1} = \frac{\cos \frac{2\pi\Delta\ell_1}{\lambda} \cos \frac{2\pi(\Delta\ell_2 + \ell'_1)}{\lambda} \dots \cos \frac{2\pi(\Delta\ell_{k-1} + \ell'_{k-2})}{\lambda}}{\cos \frac{2\pi\ell'_1}{\lambda} \cos \frac{2\pi\ell'_2}{\lambda} \dots \cos \frac{2\pi\ell'_{k-1}}{\lambda}}.$$

Распределение напряжения вдоль k -го отрезка

$$U_k(\xi) = V_k \cos \frac{2\pi(\xi + \ell'_{k-1})}{\lambda}.$$

Коэффициент трансформации напряжения от начала к концу дуанта выражается в виде

$$n_g = \frac{V_N}{V_1} \cos \frac{2\pi(\Delta\ell_N + \ell'_{N-1})}{\lambda}.$$

Входное сопротивление на конце дуанта

$$X_N = \frac{X_{N-1} + \rho_N \operatorname{tg} \frac{2\pi\Delta\ell_N}{\lambda}}{1 - \frac{X_{N-1}}{\rho_N} \operatorname{tg} \frac{2\pi\Delta\ell_N}{\lambda}}.$$

Отсюда могут быть записаны условия резонанса системы дуант – камера:

$$X_{N-1} + \rho_N \operatorname{tg} \frac{2\pi\Delta\ell_N}{\lambda} = 0 \quad (\text{последовательный резонанс}),$$

$$1 - \frac{X_{N-1}}{\rho_N} \operatorname{tg} \frac{2\pi\Delta\ell_N}{\lambda} = 0 \quad (\text{параллельный резонанс}).$$

Метод расчета радиотехнической системы с распределенными параметрами в виде двумерной мембраны

Заметим, что конструкция дуантной системы синхроциклотрона имеет вертикальную симметрию относительно медианной плоскости и ее вертикальные размеры много меньше горизонтальных, поэтому дуант представляет собой систему в виде двухкоординатной мембраны. Заметим также, что характеристики дуантной системы зависят от величины и места присоединения вариаторов, поэтому рассмотрим параметры вол-

новой мембраны, нагруженной по границе контура емкостным сопротивлением.

В общем виде волновое уравнение для двумерной мембраны имеет вид

$$\Delta U + k^2 U = 0,$$

где $U(x, y)$ – напряжение на дуанте в точке x, y ; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновой фактор. Граничные условия записываются в виде

$$\left. \frac{\partial U}{\partial n} \right|_{\text{гран.}} = -j\omega L i_n,$$

где n – нормаль к границе дуанта; L – индуктивность, рассчитанная на единицу площади; i_n – нормальная к границе составляющая плотности тока. Рассчитанные на единицу площади емкость и индуктивность связа-

ны соотношением $c = \frac{1}{\sqrt{CL}}$, где c – скорость света.

Мембрана прямоугольной формы

Рассмотрим в качестве примера дуант в виде мембраны прямоугольной формы с подключенным к нему одним вариатором частоты (рис. 4.25).

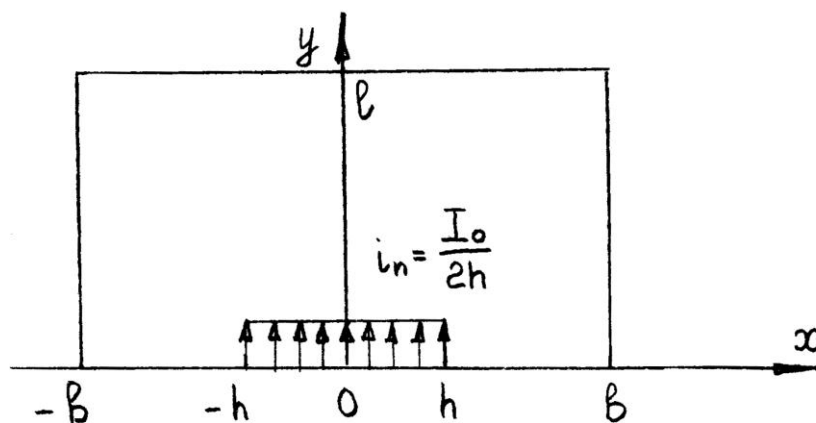


Рис. 4.25. Дуант в виде мембраны прямоугольной формы

Длина дуанта – ℓ , ширина – $2b$, ширина подключения вариатора – $2h$, причем $h \leq b$. Волновое сопротивление дуанта вдоль оси OY определяется выражением

$$\rho = \frac{1}{2b} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Будем считать, что распределение тока в месте подключения вариатора равномерное по оси X . Тогда плотность тока $i_n = \frac{I_0}{2h}$.

Волновое уравнение записывается в виде

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + k^2 U = 0.$$

Граничные условия

$$\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x = \pm b} = 0; \quad \left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y = \ell} = 0; \quad \left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y = 0} = \begin{cases} -jk\rho I_0 \frac{b}{h} & (\text{при } |x| \leq h) \\ 0 & (\text{при } |x| > h) \end{cases}.$$

При заданных граничных условиях переменные разделяются, и решение, удовлетворяющее граничным условиям при $x = \pm b$ и при $y = \ell$, может быть записано в виде

$$U(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} D_n \frac{\cos p'(\ell - y)}{\sin p'\ell} \cos px,$$

где $p = \frac{n\pi}{b}$; $p' = \sqrt{k^2 - p^2}$; $n = 0, 1, 2, \dots$

Для того чтобы удовлетворить граничному условию при $y = 0$, разложим функцию $\left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0}$ в ряд Фурье:

$$\left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0} = -jk\rho I_0 \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \cos px \right],$$

где $\beta_n = \frac{n\pi h}{b}$. Используя граничное условие при $y = 0$, получим

$$U(x, y) = -j\rho I_0 \left\{ \frac{\cos k(\ell - y)}{\sin k\ell} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k}{p'} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \frac{\cos p'(\ell - y)}{\sin p'\ell} \cos px \right\}.$$

При $h = b$ имеем

$$U(y) = -j\rho I_0 \frac{\cos k(\ell - y)}{\sin k\ell}; \quad Z_{\text{вх.}} = \frac{U_0}{I_0} = -j\rho \operatorname{ctg} k\ell.$$

Рассмотрим более подробно выражение для p' .

Если $b < \frac{\lambda}{2}$, то $p'_0 = k$, $p'_n = j \sqrt{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - k^2} = jp''_n$ (при $n \geq 1$).

Если $\frac{\lambda}{2} < b < \lambda$, то $p'_0 = k$, $p'_1 = j\sqrt{k^2 - \frac{\pi^2}{b^2}}$, $p'_n = jp''_n$ (при $n \geq 2$)

и т. д.

Замечая, что $\sin j\alpha = j \operatorname{sh} \alpha$ и $\cos j\alpha = \operatorname{ch} \alpha$, находим: при $b < \frac{\lambda}{2}$

$$U(x, y) = -j\rho I_0 \left\{ \frac{\cos k(\ell - y)}{\sin k\ell} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k}{p''_n} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \frac{\operatorname{ch} p''_n(\ell - y)}{\operatorname{sh} p''_n \ell} \cos p_n x \right\};$$

при $\frac{\lambda}{2} < b < \lambda$

$$U(x, y) = -j\rho I_0 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\cos k(\ell - y)}{\sin k\ell} + \frac{2k}{p'_1} \frac{\sin \beta_1}{\beta_1} \frac{\cos p'_1(\ell - y)}{\sin p'_1 \ell} \cos p_1 x - \\ - 2 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{k}{p''_n} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \frac{\operatorname{ch} p''_n(\ell - y)}{\operatorname{sh} p''_n \ell} \cos p_n x \end{array} \right\}.$$

Вычислим входное сопротивление дуанта. Для этого вначале вычислим входную проводимость участка dx линии подсоединения вариатора. Имеем

$$dY_{\text{вх.}} = \frac{I_0}{2h} \frac{dx}{U(x, 0)},$$

отсюда получаем

$$Y_{\text{вх.}} = \frac{I_0}{h} \int_0^h \frac{dx}{U(x, 0)}.$$

Входное сопротивление дуанта

$$Z_{\text{вх.}} = \frac{1}{Y_{\text{вх.}}} = \frac{h}{I_0} \frac{1}{\int_0^h \frac{dx}{U(x, 0)}}.$$

При $b < \frac{\lambda}{2}$ имеем

$$Z_{\text{вх.}} = \frac{-j\rho h}{\int_0^h \frac{dx}{\operatorname{ctg} k\ell - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k}{p''_n} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \operatorname{cth} p''_n \ell \cos p_n x}}.$$

Мембрана в форме части сектора

Рассмотрим дуант в форме части кольца, ограниченного двумя концентрическими окружностями с радиусами $r = R_1$ и $r = R_2$ и двумя лучами, исходящими из центра окружностей под углом 2α (рис. 4.26). Варистор частоты подключен к заднему концу дуанта при $r = R_1$ в пределах угла 2ε .

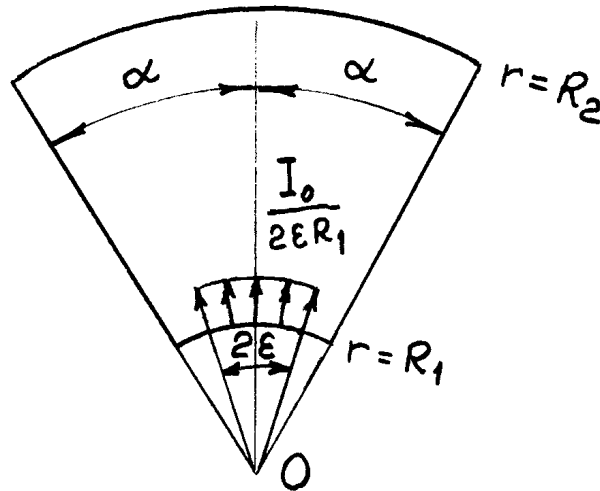


Рис. 4.26. Дуант в виде мембраны в форме части сектора

Уравнение для распределения напряжения по дуанту имеет вид

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + k^2 U = 0, \text{ где } k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Граничные условия

$$\left. \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right|_{\varphi = \pm \alpha} = 0; \quad \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r = R_2} = 0; \quad \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r = R_1} = \begin{cases} -j\omega L \frac{I_0}{2\varepsilon R_1} & (\text{при } |\varphi| \leq \varepsilon) \\ 0 & (\text{при } |\varphi| > \varepsilon) \end{cases}.$$

Нетрудно убедиться, что

$$\omega L \frac{I_0}{2\varepsilon R_1} = \frac{2\pi}{T} \frac{L}{2\alpha R_1} I_0 \frac{\alpha}{\varepsilon} = k\rho(R_1) I_0 \frac{\alpha}{\varepsilon},$$

где $\rho(R_1)$ – волновое сопротивление дуанта, рассматриваемого как одномерная линия при $r = R_1$. Решение уравнения для распределения напряжения, удовлетворяющее граничным условиям при $\varphi = \pm \alpha$ и при $r = R_2$, может быть представлено в виде

$$U(r, \varphi) = \sum C_n \left[J_p(kr) - N_p(kr) \frac{J'_p(kR_2)}{N'_p(kR_2)} \right] \cos p\varphi,$$

где $p = \frac{n\pi}{\alpha}$, а $J_p(kr)$ и $N_p(kr)$ – функции Бесселя 1 и 2-го рода. Коэффициенты C_n могут быть найдены из разложения $\left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=R_1}$ в ряд Фурье. Имеем

$$\left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=R_1} = -jk\rho(R_1)I_0 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \cos p\varphi \right\},$$

где $\beta_n = \frac{n\pi\varepsilon}{\alpha}$. Отсюда выражение для $U(r, \varphi)$ принимает вид

$$U(r, \varphi) = -j\rho I_0 \left\{ \begin{aligned} & \frac{J_0(kr) - N_0(kr) \frac{J'_0(kR_2)}{N'_0(kR_2)}}{J'_0(kR_1) - N'_0(kR_1) \frac{J'_0(kR_2)}{N'_0(kR_2)}} + \\ & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} \frac{J_p(kr) - N_p(kr) \frac{J'_p(kR_2)}{N'_p(kR_2)}}{J'_p(kR_1) - N'_p(kR_1) \frac{J'_p(kR_2)}{N'_p(kR_2)}} \cos p\varphi \end{aligned} \right\},$$

где

$$J'_p(kr) = \frac{p}{kr} J_p(kr) - J_{p+1}(kr); \quad N'_p(kr) = \frac{p}{kr} N_p(kr) - N_{p+1}(kr).$$

Входное сопротивление дуанта определяется из выражения

$$Z_{\text{вх.}} = \frac{\varepsilon}{I_0} \frac{1}{\int_0^{\varepsilon} \frac{d\varphi}{U(R_1, \varphi)}}.$$

4.3. Расчет потерь высокочастотной мощности

Определение потерь мощности в элементах ВЧ ускоряющей системы синхротрона связано с определенными трудностями как из-за наличия эффекта скин-слоя, так и из-за учета тангенса угла потерь в реактивных элементах системы сложной геометрической формы. Отметим, что удельные потери мощности зависят от частоты.

Скин-слой

Толщина эквивалентного проводящего скин-слоя дается выражением

$$S = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu f}} \text{ (см).}$$

Здесь удельная проводимость ρ выражена в Ом · см, а частота f – в герцах, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ Гн/см. Если выражать S в микронах, ρ – в Ом · см, а f – в мегагерцах, то

$$S = 5,03 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (мк).}$$

Значения удельной проводимости для различных материалов дано в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Удельная проводимость для различных материалов

Материал	$\rho \cdot 10^6$, Ом · см
Серебро	1,62
Медь	1,72
Алюминий	2,82
Латунь	7
Сплав АМГ-6	7,1
Хром	15
Никель	7,24
Нерж. сталь	70

Удельное поверхностное сопротивление проводника при частоте f определяется как

$$\rho' = \frac{\rho}{S} \text{ (Ом).}$$

Если ρ измеряется в Ом · см, а f – в мегагерцах, то

$$\rho' = 0,2 \sqrt{\rho f} \text{ (Ом).}$$

В табл. 4.2 представлены величины толщины эквивалентного проводящего слоя в микронах и величины удельного поверхностного сопротивления для различных материалов в интересующем нас диапазоне частот.

Таблица 4.2

**Величины толщины эквивалентного проводящего слоя
и удельного поверхностного сопротивления**

f	Серебро		Медь		Алюминий		Латунь	
	МГц	мк	МОм	мк	МОм	мк	МОм	мк
30	11,6	1,39	12,0	1,44	15,3	1,84	24,2	2,90
27	12,2	1,32	12,6	1,36	16,2	1,75	25,5	2,75
24	13,0	1,25	13,4	1,29	17,1	1,65	27,0	2,59
21	13,9	1,17	14,3	1,20	18,3	1,54	28,9	2,42
18	15,0	1,08	15,5	1,11	19,8	1,42	31,2	2,25
15	16,4	0,99	16,9	1,02	21,7	1,30	34,2	2,05
12	18,3	0,88	18,9	0,91	24,2	1,16	38,2	1,83

f	АМГ-6		Хром		Никель		Нерж. сталь	
	МГц	мк	МОм	мк	МОм	мк	МОм	мк
30	24,3	2,91	35,4	4,24	24,6	2,95	76,4	9,17
27	25,6	2,77	37,3	4,03	25,9	2,80	80,5	8,70
24	27,2	2,61	39,5	3,79	27,5	2,64	85,4	8,20
21	29,1	2,44	42,3	3,55	29,4	2,47	91,3	7,67
18	31,4	2,26	45,6	3,29	31,7	2,28	98,6	7,10
15	34,4	2,06	50,0	3,00	34,7	2,08	108	6,48
12	38,5	1,85	55,9	2,68	38,8	1,86	121	5,80

Тангенс угла потерь

Выведем формулы для тангенса угла потерь в индуктивностях и конденсаторах. Как известно, $\operatorname{tg} \delta$ представляет собой отношение активного тока к реактивному в рассматриваемом элементе, поэтому активная мощность, выделяемая в индуктивности, будет

$$P = \frac{I^2 \omega L}{2} \operatorname{tg} \delta = \frac{V^2}{2 \omega L} \operatorname{tg} \delta,$$

а мощность, выделяемая в пластинах конденсаторов,

$$P = \frac{V^2 \omega C}{2} \operatorname{tg} \delta = \frac{I^2}{2 \omega C} \operatorname{tg} \delta.$$

С другой стороны, для индуктивностей и конденсаторов

$$P = \frac{I^2 R_n}{2} = \frac{V^2}{2R_n},$$

где R_n – сопротивление потерь.

Сравнивая выражения для вычисления мощностей, найдем: для индуктивностей

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R_n}{\omega L};$$

для емкостей

$$\operatorname{tg} \delta = R_n \omega C.$$

Рассмотрим несколько частных случаев.

Прямолинейный цилиндрический проводник вблизи заземленного угла

Прямолинейный цилиндрический проводник вблизи заземленного угла представлен на рис. 4.27.

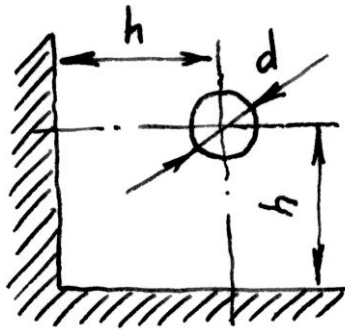


Рис. 4.27. Цилиндрический проводник вблизи угловой плоскости

Если измерять S в сантиметрах, ρ – в Ом · см, а частоту f – в герцах, то

$$S = 5,03 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (см)}.$$

Потери на 1 см цилиндрического проводника диаметром d определяются как

$$\frac{dR}{dx} = \frac{\rho}{\pi d S} = 0,632 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{\rho f}{d}}.$$

Таким образом, для цилиндрического проводника длиной ℓ (см)

$$R_n = 0,632 \cdot 10^{-4} \sqrt{\rho f} \frac{\ell}{d}.$$

Индуктивность проводника зависит от его формы и расстояния до заземленных поверхностей. Для прямолинейного проводника, расположенного вблизи заземленного прямого угла (рис. 4.27), индуктивность может быть вычислена по формуле

$$L = \frac{1}{9 \cdot 10^{16}} \frac{\ell}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(1,41 \frac{2h}{d} \right) \text{ (Гн)},$$

где $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ (Ф/м), ℓ измеряется в метрах. Если L выразить в сантиметрах единицы индуктивности, а ℓ в сантиметрах линейной длины, то

$$L = 2\ell \cdot \ln \left(2,82 \frac{h}{d} \right) \text{ (см)}.$$

Так, например, для $d = 4$ см и $h = 5$ см имеем $L = 2,52 \ell$ (см).

$$\text{tg } \delta = \frac{10^4}{2d \ln \left(2,82 \frac{h}{d} \right)} \sqrt{\frac{\rho}{f}},$$

где d выражено в сантиметрах, ρ – в Ом · см, f – в герцах. Для медного проводника диаметром 4 см при $h = 5$ см имеем

$$\text{tg } \delta = \frac{1,3}{\sqrt{f \text{ (Гц)}}} = \frac{1,3 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{f \text{ (МГц)}}}.$$

Конденсатор из двух пластин

Конденсатор из двух пластин представлен на рис. 4.28.

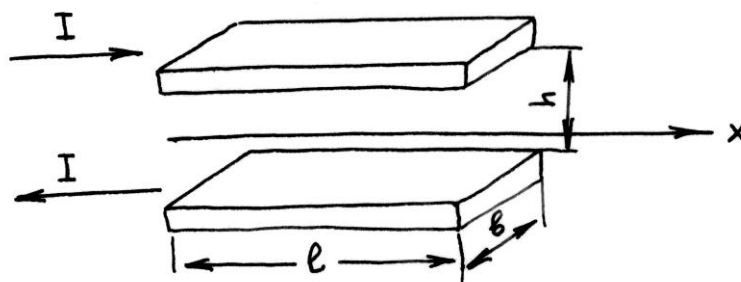


Рис. 4.28. Схема конденсатора из двух пластин

Если ток входит в конденсатор по одной из сторон при $x = 0$, то распределение тока вдоль оси X будет (рис. 4.28)

$$i = \frac{Ix}{\ell}.$$

Рассмотрим участок dx . Сопротивление этого участка $dR = \frac{\rho dx}{Sb}$, а мощность, выделяемая на этом участке на обеих пластинах, есть $dP = i^2 dR$. Суммарная мощность

$$P = \int_0^{\ell} i^2 dR = \frac{I^2 \rho \ell}{3Sb}.$$

Отсюда, переходя к величине сопротивления потерь, получим

$$R_n = 1,33 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{\rho f} \ell}{b}.$$

Емкость конденсатора

$$C = \frac{0,9 \cdot 10^{-12} b \ell}{4\pi h}.$$

Тангенс угла потерь определится как

$$\operatorname{tg} \delta = 0,6 \cdot 10^{-16} \frac{\ell^2 \sqrt{\rho} f^{3/2}}{h}.$$

Так, например, для конденсатора из сплава АМГ-6 при $\ell = 10$ см, $h = 0,4$ см имеем

$$\operatorname{tg} \delta = 4 \cdot 10^{-17} f^{3/2} \text{ (Гц)} = 4 \cdot 10^{-8} f^{3/2} \text{ (МГц)}.$$

Приведенные в главе 4 соотношения использовались нами при расчете ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона, в частности параметров его вариаторов частоты, дуанта, системы прямой и обратной связи генератора с дуантной системой, а также при расчете системы растяжки с С-электродом и др.

Рекомендуемая литература

1. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М., 1976.
2. Мейнке Х., Гундлах Ф. В. Радиотехнический справочник. М.–Л., 1960.
3. Власов В. Ф. Курс радиотехники. М.–Л., 1962.
4. Скрипников Ю. Ф. Колебательный контур. М., 1970.
5. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М., 1971.
6. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М., 1984.

Глава 5

Высокочастотная ускоряющая система синхроциклотрона ПИЯФ

5.1. Структурные схемы высокочастотных ускоряющих систем крупнейших синхроциклотронов мира

Разработка проекта ВЧ-системы синхроциклотрона ФТИ была выполнена в НИИЭФА^{1,2}. В ходе разработки проекта был проведен анализ уже существовавших к тому времени ВЧ-систем синхроциклотронов в Дубне³, Беркли⁴, ЦЕРН⁵ и других местах. Были проанализированы возможности использования для синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ 1/4-, 1/2- и 3/4-волновых резонансных систем.

Ниже приведены конструктивные решения ВЧ-систем крупнейших синхроциклотронов мира. На рис. 5.1а приведена схема ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона ОИЯИ на энергию 680 МэВ. Дуант «удлиннен» коаксиальной вставкой. На рис. 5.1б показаны распределения амплитуд при низшей (I) и высшей (II) частотах ускоряющего напряжения.

На рис. 5.2 представлен дуант синхроциклотрона ЦЕРН на энергию 600 МэВ. Дуант имеет ускоряющую кромку сильно скошенной формы, что уменьшает величину прироста энергии за оборот, но обеспечивает постоянство амплитуды ускоряющего напряжения вдоль ускоряющей кромки.

На рис. 5.3 приведена схема ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона ЦЕРН. Для «удлинения» системы между дуантом и вариатором включена согласующая коаксиальная вставка.

¹ Отчет НИИЭФА им. Д. В. Ефремова. № 1055. 1961.

² Ройфе И. М., Середенко Е. В. // ЖТФ. Т. 41, № 9. 1971. С. 1797.

³ Минц А. Л., Невяжский И. К., Поляков Б. И. // Радиотехника и электроника. Т. 1. Вып. 7. 1956. С. 893–902.

⁴ Smith B. H., MacKenzie K. R., Riedel J., Kerns Q., Baker W. R., Park C. W., Thornton R. L. Preprint UCRL 3779. 1957. P. 28.

⁵ Krienen F. // NIM 5. No. 5. 1959. P. 280–299.

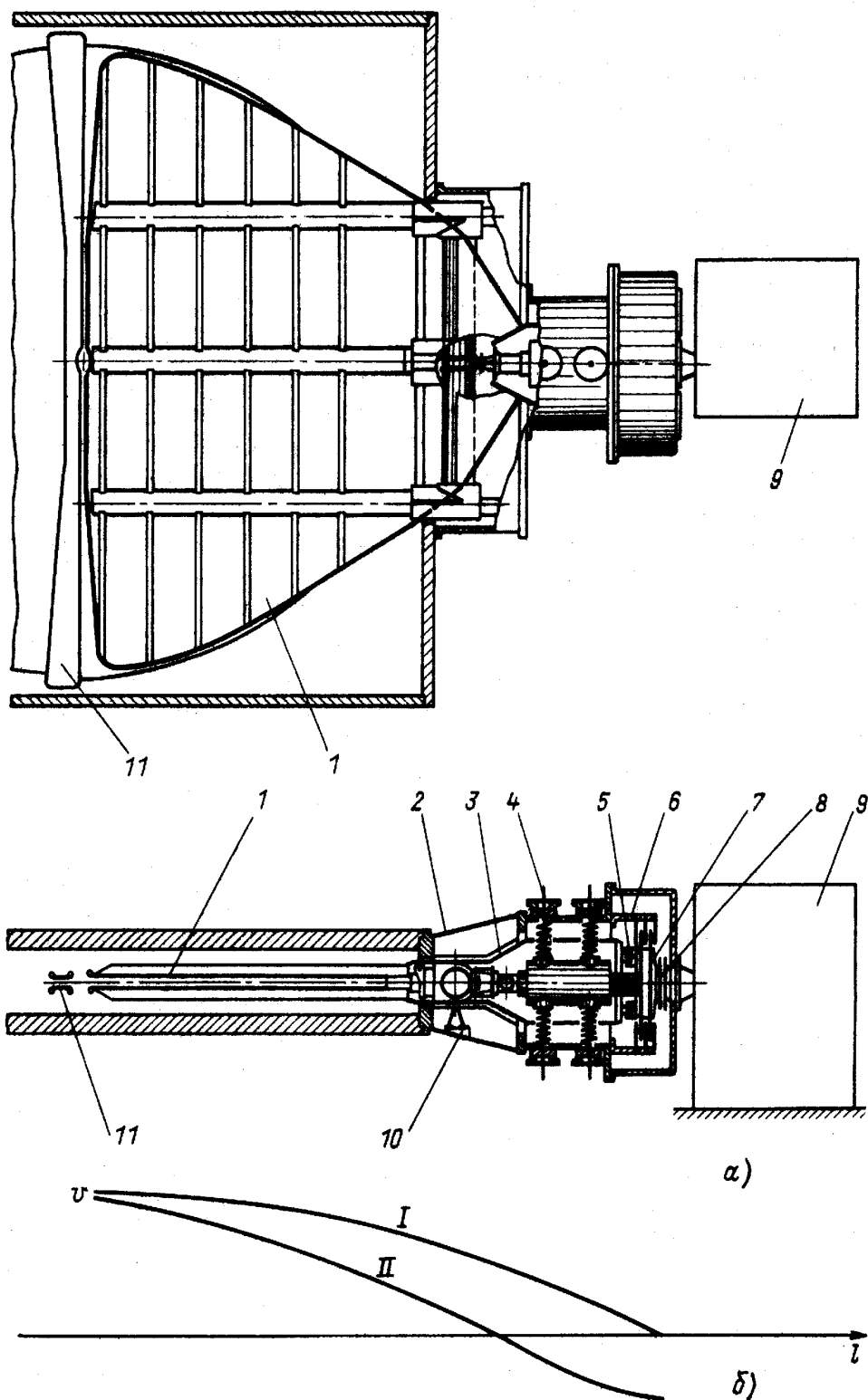


Рис. 5.1. ВЧ ускоряющая система синхроциклотрона 680 МэВ (ОИЯИ, Дубна):

а) схема: 1 – дуант; 2, 3 – внутренний и внешний проводники коаксиала; 4 – спиральная опора; 5 – блокирующие конденсаторы двигателя; 6 – статор вариатора; 7 – ротор вариатора; 8 – конденсатор связи; 9 – генератор; 10 – изолятор; 11 – антидуантная рамка; б) распределение напряжений: I, II – низшая и высшая частоты

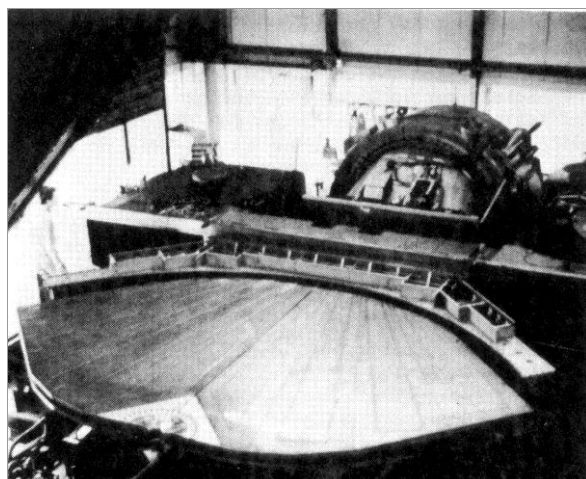


Рис. 5.2. Дуантная система синхроциклотрона 600 МэВ (ЦЕРН, Женева)

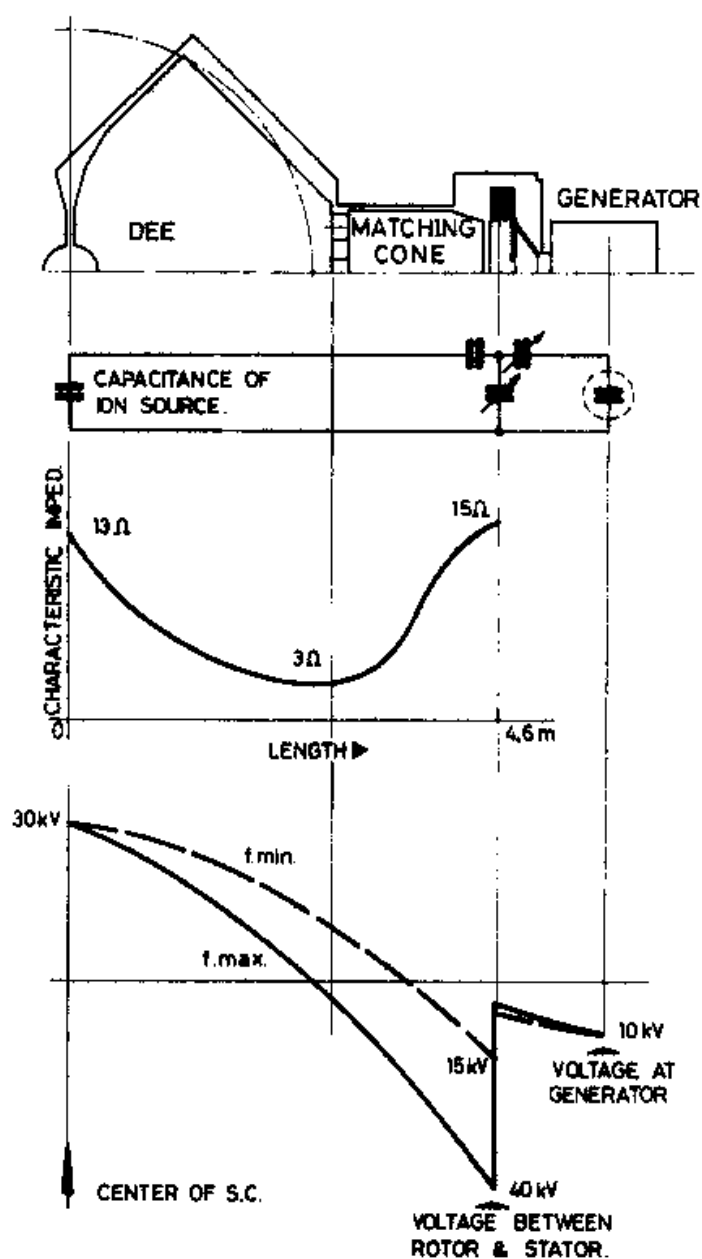


Рис. 5.3. Схема ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона ЦЕРН

На рис. 5.4, 5.5 приведены конструкция и схемное решение ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона на энергию 570 МэВ Лаборатории НЕВИС (США).

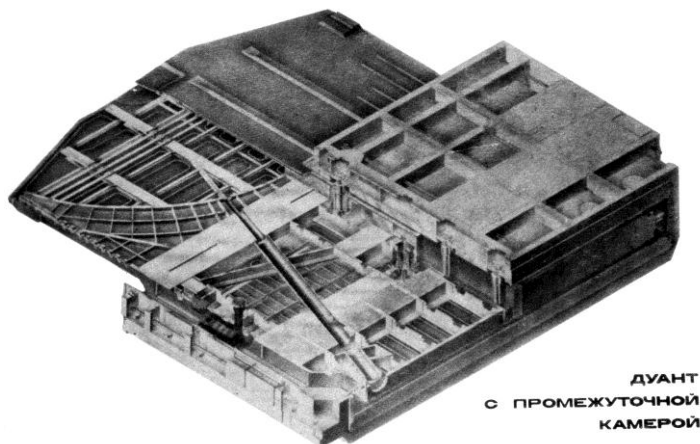


Рис. 5.4. Конструкция ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона 570 МэВ (Лаборатория НЕВИС, США)

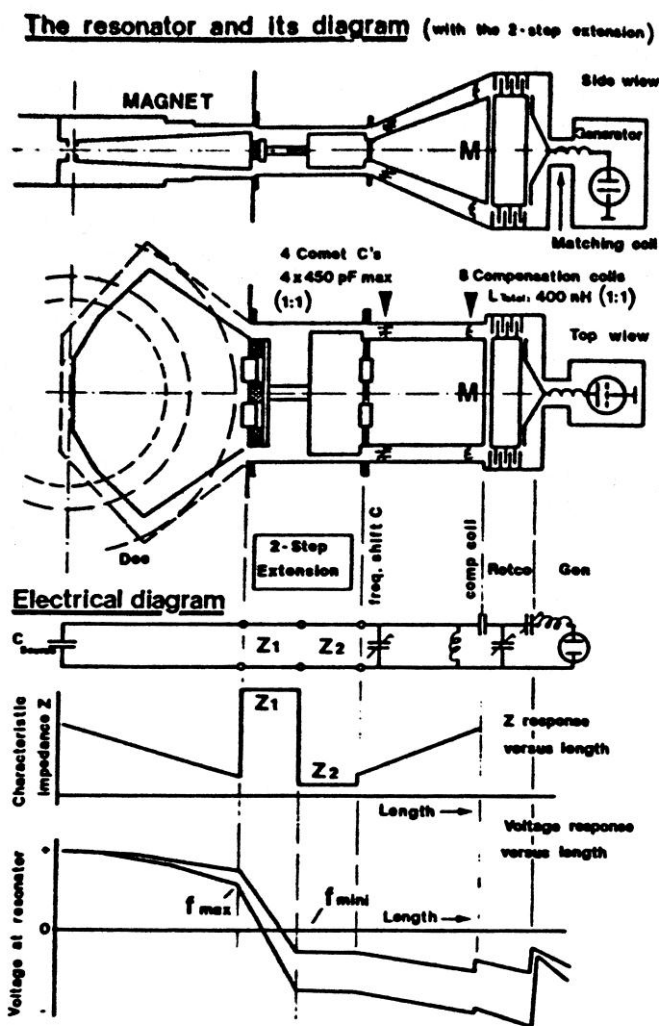


Рис. 5.5. Схема ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона 570 МэВ (Лаборатория НЕВИС, США)

Схема ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ изображена на рис. 5.6, 5.7.

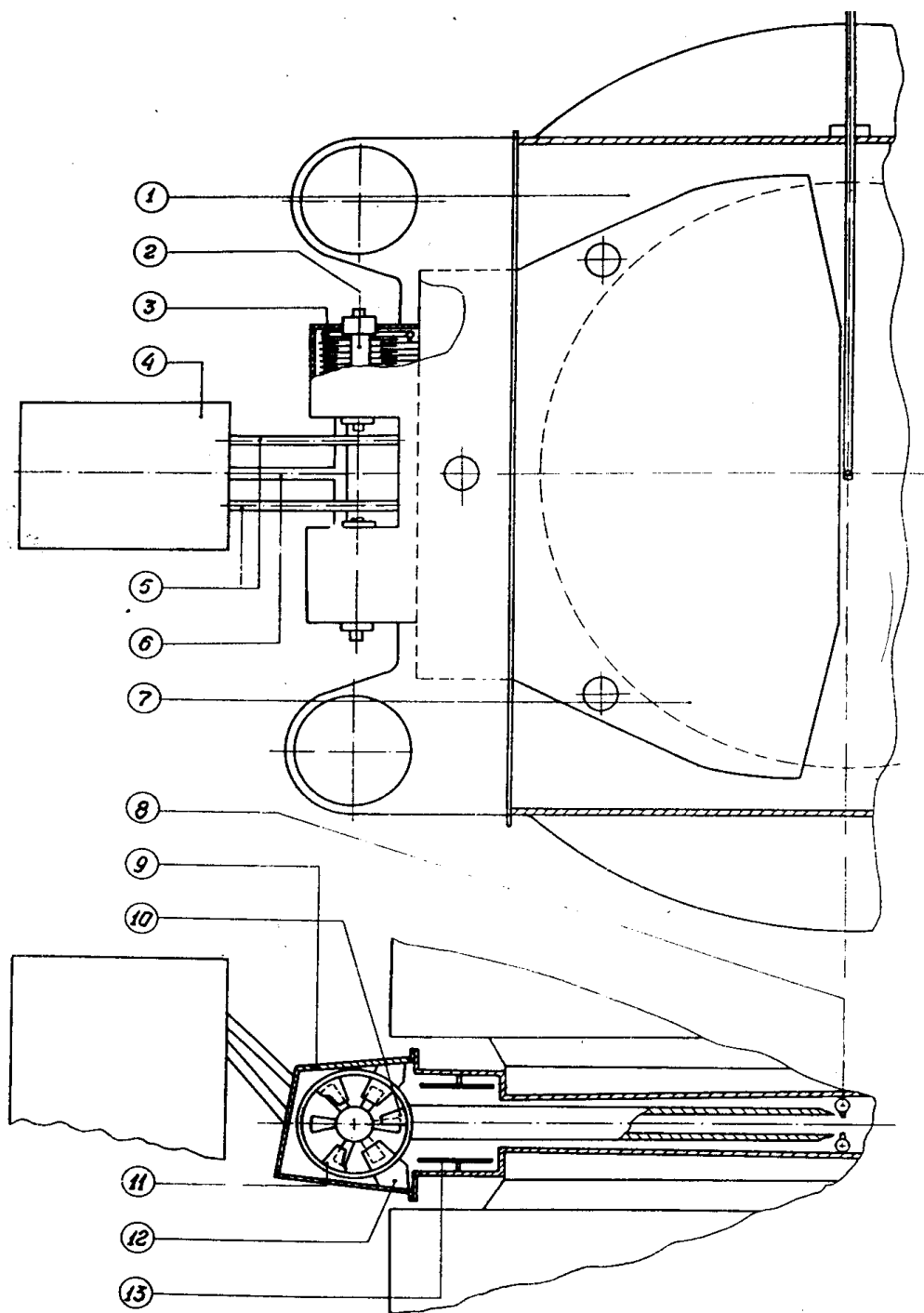


Рис. 5.6. Схема ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ: 1 – вакуумная камера; 2 – ротор вариатора частоты; 3 – статорные емкостные пакеты; 4 – ВЧ-генератор; 5 – фидеры прямой связи; 6 – фидер обратной связи; 7 – дуант; 8 – ионный источник Пеннинга; 9 – кожух вариатора; 10 – дуантный емкостный пакет пластин вариатора; 11 – индуктивный емкостный пакет вариатора; 12 – заземляющий емкостный пакет пластин; 13 – регулируемые пластины плакировки камеры

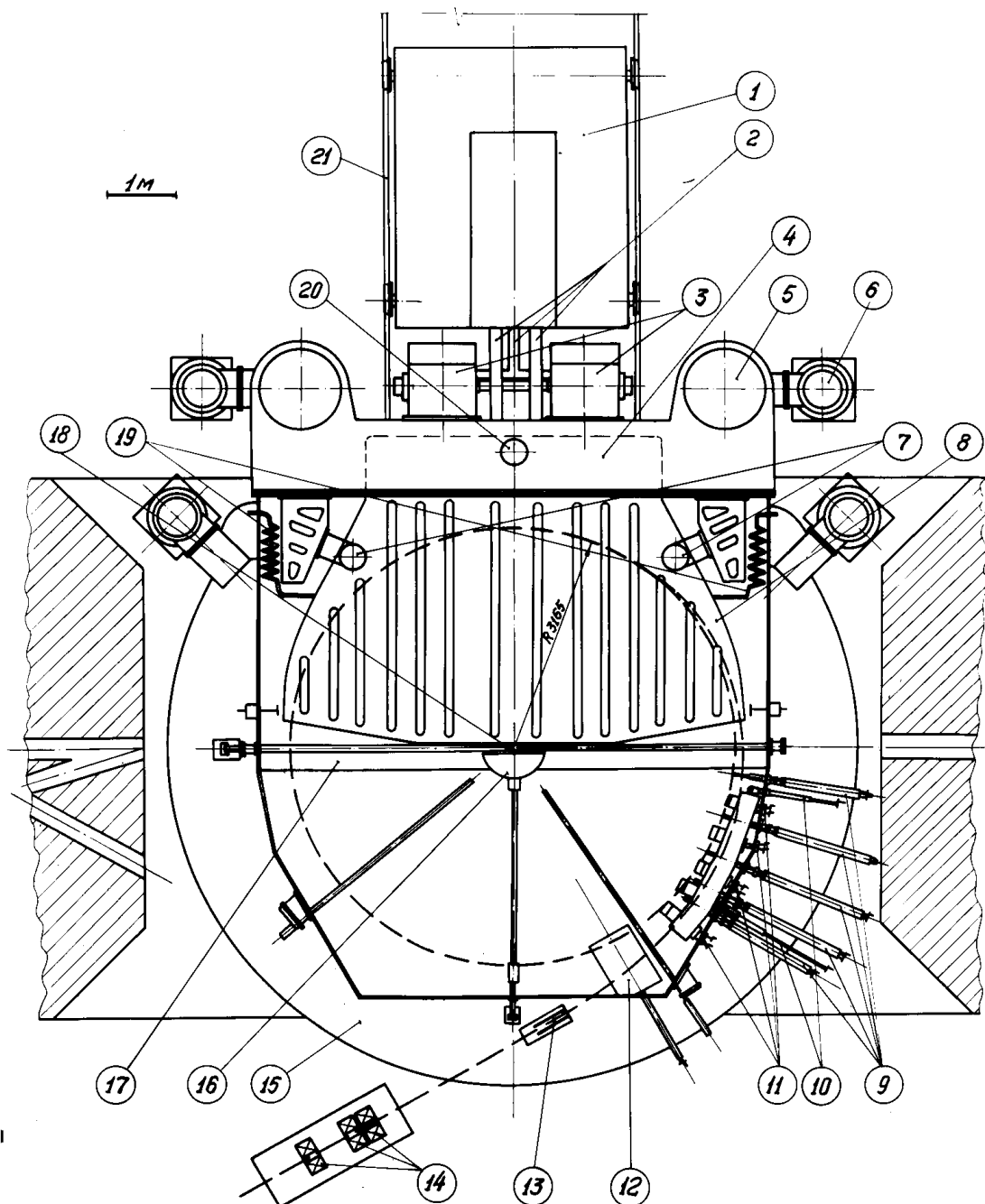


Рис. 5.7. Расположение ВЧ-системы

в вакуумной камере синхроциклотрона ПИЯФ:

1 – ВЧ-генератор; 2 – фидеры связи; 3 – вариаторы частоты; 4 – отсек камеры; 5, 6 – высоковакуумные насосы; 7 – керамические опоры дуанта; 8 – дуант; 9 – пробники; 10, 11 – приводы магнитного канала; 12 – регенератор; 13 – фокусирующая секция магнитного канала; 14 – линзы МЛ-3А; 15 – обмотка электромагнита; 16 – фокусирующий электрод; 17 – плакировка камеры; 18 – ионный источник; 19 – дроссели системы охлаждения; 20 – пружинная опора дуанта; 21 – рельсовый путь

Перейдем к описанию основных требований к ускоряющей системе синхроциклотрона ПИЯФ.

5.2. Основные требования к высокочастотной ускоряющей системе синхроциклотрона ПИЯФ

Наиболее сложной проблемой при создании синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ с азимутально-симметричным магнитным полем оказалась проблема, связанная с разработкой, изготовлением и наладкой ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона, что явилось следствием высокой, близкой к предельно возможной для данного типа ускорителей, энергии ускоряемых протонов. Основные требования к ВЧ-системе синхроциклотрона могут быть сформулированы в следующем виде.

1. ВЧ-система должна обеспечить ускорение протонов от нулевой энергии до энергии 1 ГэВ, что при выбранных параметрах магнитного поля соответствует расчетному диапазону изменения частоты ускоряющего напряжения в течение цикла ускорения от 28,88 до 13,18 МГц и перекрытию по частоте, равному 2,2. Учитывая необходимость обеспечения отличных от нуля значений производной частотной программы в начале и конце цикла ускорения, диапазон частот и коэффициент перекрытия по частоте должны быть несколько больше. Реальный диапазон частот должен быть по крайней мере от 30 до 13 МГц, а перекрытие по частоте – 2,3.

2. Важными параметрами ВЧ-системы синхроциклотрона, определяющими условия захвата частиц в режим ускорения и фазовую устойчивость пучка в процессе ускорения, являются: форма зависимости частоты резонансной системы от времени – частотная программа $f(t)$ и связанная с ней зависимость от времени амплитуды ускоряющего напряжения на дуанте – амплитудная программа $V(t)$. Благодаря наличию автофазировки, формы этих зависимостей в случае синхроциклотрона не являются критичными и в определенных пределах могут изменяться. С точки зрения получения максимальной интенсивности ускоряемого пучка оптимальные частотная и амплитудная программы должны обеспечить:

- оптимальные условия для захвата частиц в режим ускорения в центре ускорителя;
- отсутствие фазовых потерь пучка в процессе ускорения;
- минимальное время ускорения сгустка и, как следствие этого, максимально возможную частоту повторения ускорения;
- максимально возможное отношение длительности цикла ускорения к периоду модуляции ускоряющего напряжения (коэффициент использования цикла).

3. Для получения высокой интенсивности ускоряемого пучка ВЧ-система должна обеспечить получение достаточно высокой амплитуды ускоряющего напряжения во всем диапазоне частот.

4. ВЧ-система должна обладать высокими эксплуатационными характеристиками: отсутствием пробоев и перегревов отдельных частей системы, надежностью и стабильностью при работе в длительном режиме.

Рассмотрим более подробно, к каким параметрам ВЧ-системы приводят указанные выше требования.

В связи с разработкой синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ – самого большого ускорителя этого типа – необходимо было рассмотреть комплекс вопросов построений ВЧ-системы с параметрами, обеспечивающими ускорение протонов до энергии, в 1,5–2 раза превышающей полученную на существующих синхроциклотронах.

Известно, что с ростом энергии ускоренных частиц возрастают трудности построений дуантной системы. Для протонного синхроциклотрона на сверхвысокие энергии, т. е. на энергии порядка 1 ГэВ и выше, вопрос ставится не только о выборе наиболее целесообразной схемы и конструкции дуантной системы, но и ее осуществимости вообще, что обусловлено как расширением диапазона рабочих частот, так и тем, что с увеличением энергии относительные размеры дуанта возрастают и становятся соизмеримыми с длинами волн ускоряющего напряжения.

В подавляющем большинстве синхроциклотронов применяется дуантная ускоряющая система, где полые электроды – дуанты – помещены между полюсами электромагнита. Изменение частоты ускоряющего напряжения осуществляется изменением резонансной частоты дуантной системы, являющейся анодным контуром генератора, с помощью введенного в этот контур элемента с периодически меняющимися параметрами. Сравнительно низкая скорость изменения частоты обуславливает возможность применения механических средств – переменных конденсаторов с вращающимся или вибрирующим ротором. Такие устройства получили название вариаторов частоты. Осуществление частотной модуляции с помощью других методов (применение реактивной лампы, ферритов и т. д.), как показывают оценки, требует гораздо большей (до мегаватт) мощности, что для синхроциклотрона на сверхвысокие энергии неприемлемо.

Таким образом, ВЧ ускоряющая система состоит из дуанта, вариатора частоты, подключенного к дуанту непосредственно или через соединительную линию, и устройства связи генератора с дуантом.

Минимальный продольный размер дуанта (продольным названо направление, перпендикулярное ускоряющему краю дуанта) определяется конечным радиусом ускоренных частиц. С ростом энергии ускорителя увеличиваются габариты дуанта. Для мощных синхроциклотронов размеры дуанта становятся соизмеримыми с длиной волны ускоряющего напряжения.

В полуволновой системе эквивалентная схема представляет собой разомкнутую на ускоряющем крае линию длиной больше $1/4 \lambda_{\min}$, к другой стороне которой подключен вариатор, вынесенный из области магнитного поля. Если линия однородная, то максимальный возможный коэффициент перекрытия частоты будет равен 2 при изменении емкости вариатора от 0 до ∞ . Расширение диапазона частот в полуволновой системе осуществляется за счет подключения к вариатору сосредоточенных индуктивностей и применения неоднородной линии дуантной камеры.

Строго говоря, дуант, помещенный в камеру, представляет собой объемный резонатор сложной конфигурации. Однако, т. к. зазор между дуантом и крышкой камеры мал по сравнению с размерами дуанта и длиной волны, ускоряющую систему можно рассматривать как двумерную систему. Рассмотрение волновых свойств дуанта проведено для случая подключения к нему двух вариаторов симметрично продольной оси системы. Такие схемы применялись на крупнейших синхроциклотронах.

В ВЧ-системах с двумя вариаторами частоты возможно нарушение симметрии относительно продольной оси, вызванное неодинаковым реактивным сопротивлением вариаторов из-за отклонения от расчетных размеров. Оценка допустимой поперечной асимметрии позволяет определить возможность использования разных конструкций элементов дуантной системы и допуски на точность их изготовления.

Поперечная асимметрия дуантной системы, вызванная неодинаковым сопротивлением вариаторов, приводит к изменению распределения ВЧ-напряжения и тока в системе. Результаты анализа показывают, что если входные сопротивления дуанта для продольного и поперечного типов колебаний отличаются, т. е. частоты рабочих и поперечных колебаний разнесены, а сопротивления двух вариаторов отличаются на несколько процентов, то имеет место «перекос» ускоряющего напряжения вдоль кромки дуанта. При этом имеет место увеличение напряжения на одном из вариаторов. В случае если входные сопротивления дуанта на частотах продольных и поперечных колебаний близки или равны, то небольшая асимметрия вариаторов может привести к весьма значительному перераспределению напряжения в системе и даже к «перескоку» частоты.

Величина ВЧ-мощности ускоряющей системы значительно возрастает при переходе к большим энергиям (при одном и том же ускоряющем напряжении). Это объясняется тем, что с ростом энергии ускорителя неизбежно падает волновое сопротивление дуанта из-за увеличения его поперечных размеров и уменьшения зазора дуант – камера. Последнее связано с вынужденным увеличением конструктивной высоты дуанта для сохранения его механической жесткости при большей площади. Поэтому при одном и том же ускоряющем напряжении увеличиваются ток и вели-

чина рассеиваемой в дуанте и вариаторе ВЧ-мощности. Потери в вариаторе составляют бóльшую часть суммарных потерь в ускоряющей системе и достигают сотни кВт в ускорителе на высокие энергии.

Ось ротора вариатора должна быть расположена перпендикулярно продольной оси системы, что обеспечивает значительное снижение потерь из-за токов Фуко в роторе (~ 13 кВт при 2 500 об./мин) и позволяет за счет приближения вариатора к краю полюса (вариатор расположен между катушками магнита) сократить длину дуанта.

В синхроциклотроне на сверхвысокие энергии частоты ряда паразитных колебаний лежат внутри рабочего диапазона, причем частота некоторых типов колебаний меняется с изменением емкости вариатора. Это поперечные колебания дуанта и вариатора, объемные колебания камеры, высшая гармоника продольных колебаний дуанта. При проектировании дуантной системы были приняты меры по исключению совпадения частот рабочих и паразитных колебаний. В частности, частоты рабочих и поперечных колебаний могут быть разнесены выбором формы дуанта, ширины и места подключения вариатора к дуанту.

Отметим, что при выборе параметров ускоряющей системы мы стремились к осуществлению варианта с минимально возможными величинами коэффициента перекрытия по емкости вариатора $K_C = C_{\max} / C_{\min}$ и коэффициента перенапряжения в вариаторе $K_U = U_B / U_0$, где U_B – напряжение в емкостном зазоре вариатора; U_0 – ускоряющее напряжение. Основным критерием выбора того или иного вариатора было требование минимального значения произведения $K_C K_U$.

5.3. Дуантная система синхроциклотрона ПИЯФ

Геометрия дуанта и его конструкция

При проектировании ВЧ ускоряющей системы для синхроциклотрона ПИЯФ рассматривались различные формы дуантов. Расчет параметров дуанта проводился несколькими способами. При анализе дуант рассматривали в виде одномерной неоднородной линии или двумерной мембраны. После изготовления макета дуанта его параметры измерялись экспериментально. В результате была выбрана геометрия дуанта, изображенная на рис. 5.8.

Конструкция дуанта синхроциклотрона ПИЯФ показана на рис. 5.9, а его продольный разрез – на рис. 5.10.

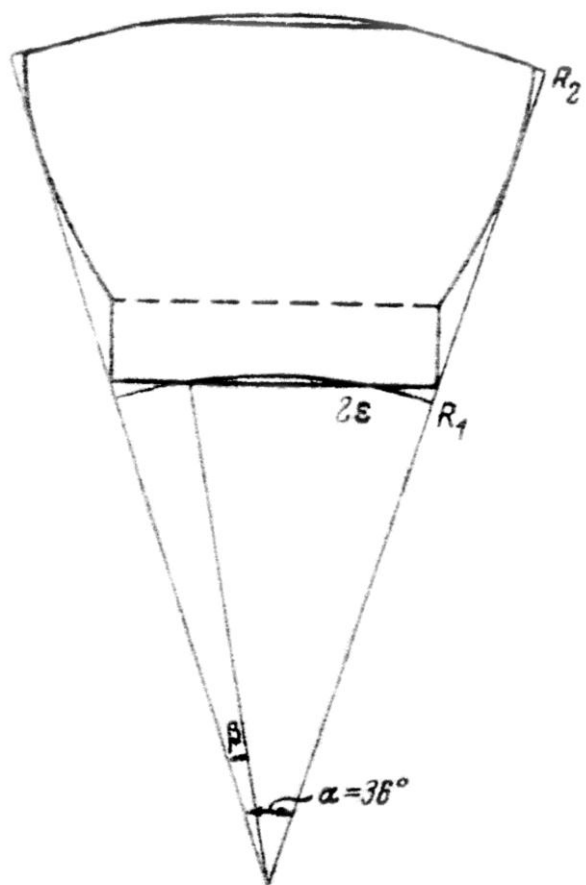


Рис. 5.8. Геометрия дуанта



Рис. 5.9. Ремонтные работы на дуанте, выдвинутом из камеры синхроциклотрона ПИЯФ

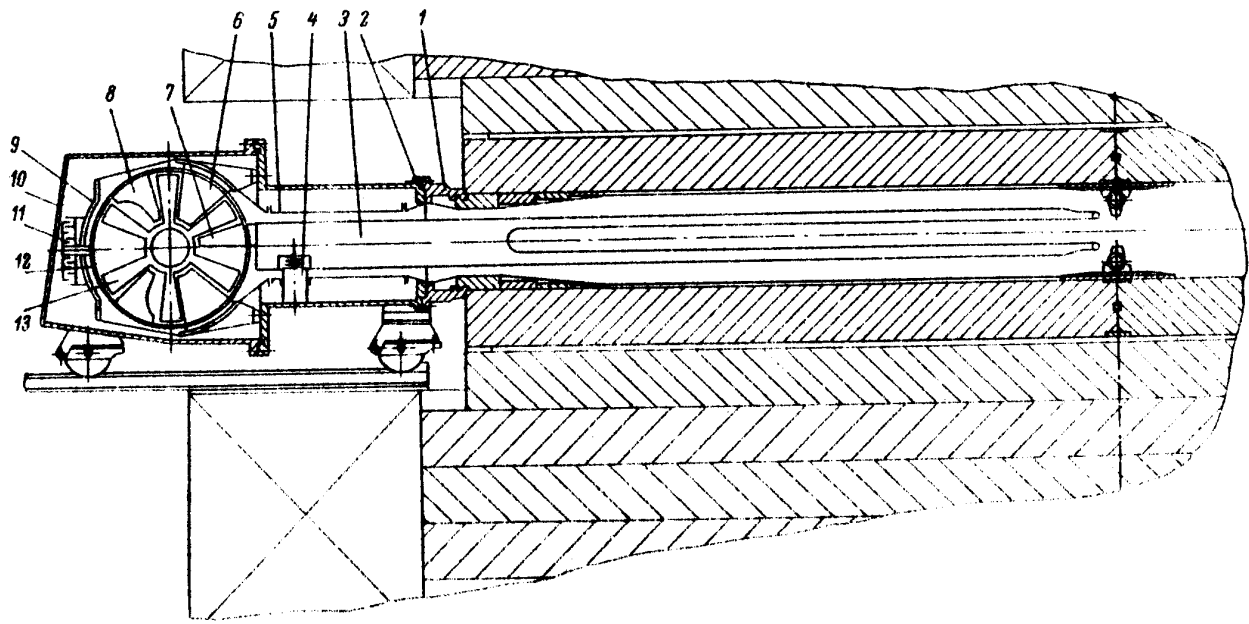


Рис. 5.10. Продольный разрез дуанта в камере ускорителя

Дуант имеет форму, которая довольно хорошо вписывается в систему полярных координат с центральным углом $\alpha = 36^\circ$. Длина дуанта от ускоряющей кромки до места подключения вариаторов частоты равна 4 470 мм (т. е. $\ell \approx R_2 - R_1 = 4,5$ м). Зазор между дуантом и камерой равен ~ 95 мм. Однородность зазора между дуантом и камерой изменяется в районе больших радиусов, где шиммы магнитного поля имеют значительную толщину (рис. 5.10).

Дуант выполнен в виде С-образного каркаса из немагнитной стали, плакированного медными охлаждаемыми листами. Центральная часть дуантной плакировки поддерживается и в небольших пределах регулируется по высоте шарнирно закрепленными в задней части каркаса балками. Высота дуанта – 270 мм, апертура дуанта меняется от 130 мм в центре до 100 мм на конечном радиусе. Опорами дуанта служат два полых стеатитовых изолятора, обдуваемых для охлаждения сжатым воздухом. Место их установки выбрано из условия минимальности рассеиваемой в них ВЧ-мощности, усредненной по циклу модуляции частоты. Задняя часть дуанта поддерживается металлической опорой, выполненной для увеличения индуктивности в виде спиральной пружины. Собственная частота контура, образованного этой опорой, лежит выше 45 МГц, поэтому ее влиянием на характеристики резонансной системы можно пренебречь. Подвод охлаждающей воды к дуанту и связанным с ним элементам вариаторов осуществляется через навитые из медных трубок дроссели, собственная частота которых находится вне рабочего диапазона.

Конструкцией, несущей дуант и вариаторы частоты, является откатной отсек вакуумной камеры, присоединенный непосредственно к уско-

рительной камере (рис. 5.7). Внутренние поверхности отсека и при-
мыкающей к нему половины ускорительной камеры плакированы
охлаждаемой медной оболочкой. Верхняя и нижняя плакировки отсека
и расположенные против них участки плакировки дуанта (длиной 1 м)
выполнены в виде подвижных панелей, позволяющих менять зазор
дуант – камера без нарушения вакуума. Подвижные панели используются
для построения диапазона рабочих частот. С их помощью производится
также симметрирование ВЧ-системы в вертикальном направлении для
устранения возможности возбуждения объемных колебаний камеры, ча-
стота которых лежит в рабочем диапазоне частот.

Измерение радиочастотных параметров системы дуант – камера

В марте 1967 года на системе дуант – камера синхроциклотрона (без
вариаторов и основного генератора) проводилась серия радиочастотных
измерений. Целью измерений было определение собственных резонанс-
ных частот системы входного реактивного сопротивления дуанта x_d со
стороны подключения вариаторов в диапазоне рабочих частот коэффици-
ента передачи напряжения n_d , определяемого как отношение напряжений
в ускоряющей щели к напряжению в месте подключения вариаторов,
а также выяснение наличия паразитных резонансов системы дуант –
камера [1]. Измерения проводились методом возбуждения дуанта мало-
мощным генератором с перестраиваемой частотой, а также методом
измерения напряжений в различных точках дуанта при помощи датчиков
ВЧ-напряжения. Информация с датчиков подавалась через коммутатор
к цифровому вольтметру и в автоматическом режиме выводилась на пе-
чать. Подробно методика измерений описана в [2].

Перестройка резонансной частоты системы производилась путем
подключения к дуанту конденсаторов определенной величины. Конден-
саторы были изготовлены в виде двух пластин размером $500 \times 100 \text{ мм}^2$
с диэлектриком из полиэтилена или плексигласа разной толщины и под-
соединялись к дуанту по всей ширине подключения каждого из вариа-
торов.

На рис. 5.11 приведена зависимость изменения резонансных частот
системы дуант – камера от величины емкости, подключаемой к дуанту
(кривая I). Расстояние между дуантом и задней регулируемой плакиров-
кой было сделано максимально возможным ($h = 160 \text{ мм}$).

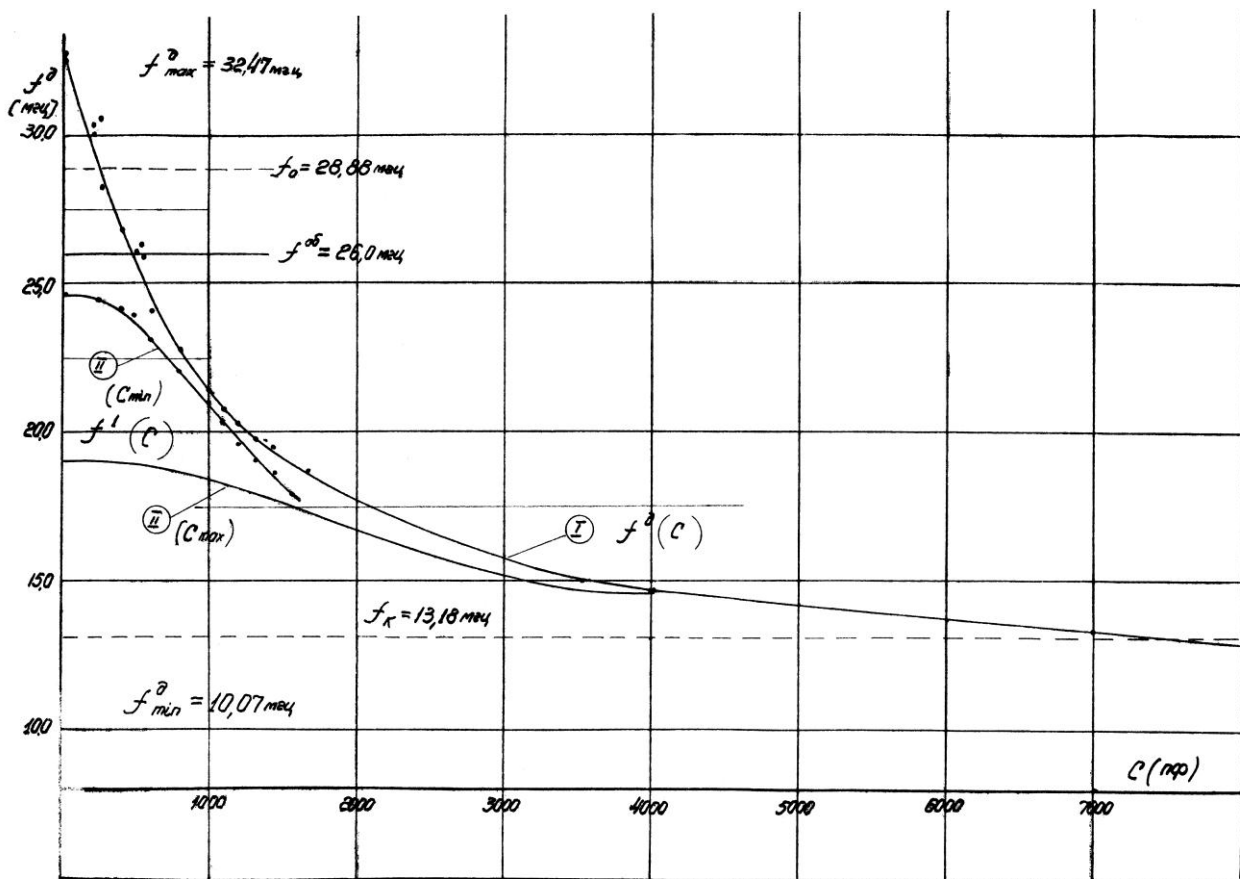


Рис. 5.11. Зависимость резонансных частот системы дуант – камера от величины емкости, подключаемой к дуанту

Из рис. 5.11 видно, что граничные частоты при полностью разомкнутом и замкнутом на конце дуанте соответственно равны

$$f_{\max} = 32,47 \text{ МГц}; f_{\min} = 10,07 \text{ МГц},$$

что перекрывает значения f_0 и f_k для граничных частот, необходимых для ускорения протонов до энергии 1 ГэВ. При этом коэффициент перекрытия системы дуант – камера

$$K_f = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = 3,04.$$

Граничные частоты при минимально возможном расстоянии между дуантом и задней плакировкой $h = 60$ мм соответственно равны

$$f_{\max} = 30,37 \text{ МГц}; f_{\min} = 12,0 \text{ МГц},$$

$$K_f = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = 2,53.$$

Величины входного реактивного сопротивления дуанта $x_d(f)$ и коэффициента передачи напряжения $n_d(f)$ в зависимости от частоты приведены на рис. 5.12 и 5.13 (кривые I). Значения x_d рассчитывались из кривой $f(C)$, а величины n_d измерялись экспериментально.

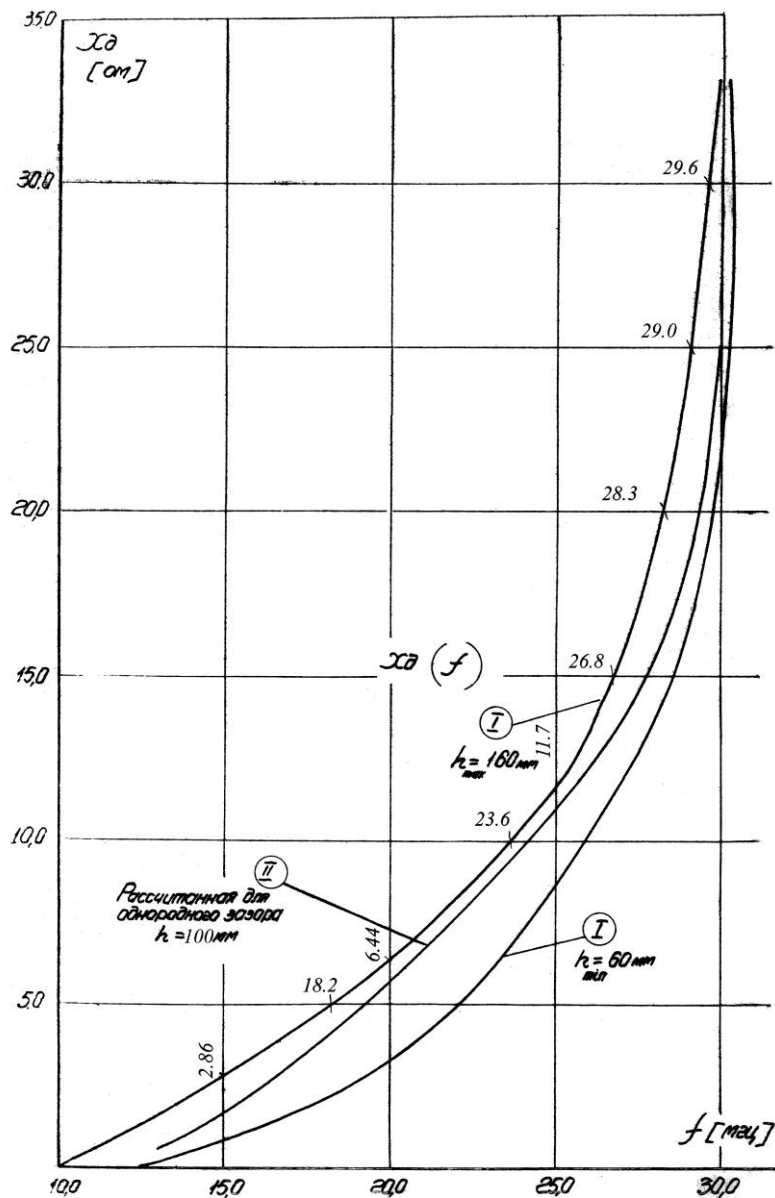


Рис. 5.12. Зависимость реактивного сопротивления дуанта от частоты

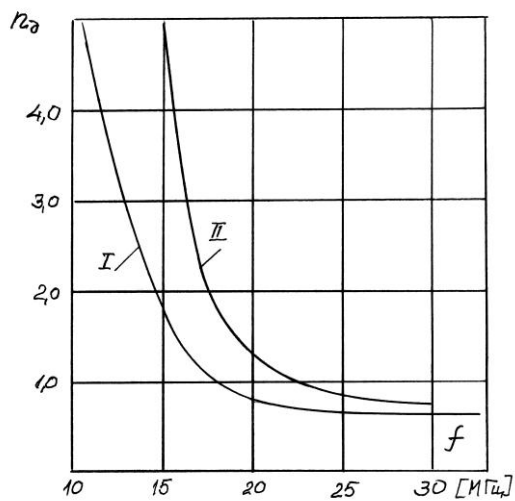


Рис. 5.13. Зависимость коэффициента передачи напряжения дуанта от частоты

При измерении n_d запитка системы производилась от внешнего генератора, подключенного в месте подсоединения вариаторов. При определении напряжения в ускоряющей щели производилось усреднение по показаниям всех шести датчиков, расположенных вдоль щели сверху и снизу кромок дуанта.

На этих рисунках приведены расчетно-теоретические кривые для дуанта в виде усеченного сектора для однородного зазора по всей длине дуанта (кривые II взяты из работы Б. И. Полякова¹). Совпадение кривых достаточно хорошее. При анализе кривых необходимо учитывать, что паразитная индуктивность подсоединения емкостей к концу дуанта несколько занижает значения резонансных частот $f = f(C)$.

Добротность системы дуант – камера измерялась методом расстройки резонансной частоты при запитке ее от внешнего генератора. Величина добротности системы, измеренная на частоте $f_{\max} = 32,47$ МГц, при нулевой емкости на конце дуанта $Q = 3 \cdot 10^3$. Измерение добротности на других частотах дает величины Q , заниженные на порядок, что объясняется потерями в диэлектрике конденсаторов, подключаемых к дуанту.

Входное сопротивление дуанта

Входное сопротивление дуанта x_d , измеренное экспериментально при максимальном и минимальном расстояниях между дуантом и регулируемой плакировкой (160 и 60 мм), приведено на рис. 5.12, а реактивные параметры дуанта в зависимости от частоты, измеренные на расстоянии 160 мм, представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Реактивные параметры дуанта в зависимости от частоты

f , МГц	x_d , Ом	B_d , Ом ⁻¹ · 10 ⁻²	$C_{\text{экв.}}$, пФ
10,07	0	$-\infty$	∞
15,0	5,72	-17,5	1 850
18,2	10,0	-10,0	875
20,0	12,88	-7,76	620
23,6	20,0	-5,0	338
25,0	23,4	-4,27	272
26,8	30,0	-3,33	198
28,3	40,0	-2,5	141
30,0	61,7	-1,62	86
32,47	∞	0	0

¹ Поляков Б. И. Высокочастотная система фазотрона. Дис. ... д. ф.-м. н. 1956. 175 с.

В табл. 5.2 представлены экспериментальные данные по величине коэффициента трансформации напряжения вдоль дуанта от его ускоряющей кромки к месту подсоединения вариаторов частоты $n_d = \frac{U_{\text{вар.}}}{U_{\text{уск.}}}$.

Таблица 5.2
**Коэффициент трансформации дуанта
в зависимости от частоты**

f , МГц	n_d
10,55	0,2
11,48	0,25
12,8	0,33
14,7	0,5
18,0	1,0
20,0	1,23
25,0	1,56
30,0	1,61
35,0	1,61

Представленные экспериментальные зависимости могут быть аппроксимированы формулами:

$$B_d = \begin{cases} -\frac{2,014}{(52,47 - f) \operatorname{tg}[0,0701(f - 10,07)]} & (\text{при } f > 21,8) \\ -\frac{8,859}{(156,7 - f) \operatorname{tg}[0,0701(f - 10,07)]} & (\text{при } f < 21,8) \end{cases},$$

$$C_{\text{экв.}} = \begin{cases} \frac{3,2055 \cdot 10^5}{f(52,47 - f) \operatorname{tg}[0,0701(f - 10,07)]} & (\text{при } f > 21,8) \\ \frac{1,410 \cdot 10^6}{f(156,7 - f) \operatorname{tg}[0,0701(f - 10,07)]} & (\text{при } f < 21,8) \end{cases},$$

$$n_d = \begin{cases} 7,013 \cdot 10^{-3}(f - 10,07)^2 + 6,819 \cdot 10^{-2}(f - 10,07) & (\text{при } f < 16,0) \\ -5,655 \cdot 10^{-3}(f - 32,47)^2 + 3,491 \cdot 10^{-2}(32,47 - f) + 1,61 & (\text{при } f > 16,0) \end{cases}.$$

В формулах частота f измеряется в мегагерцах, B_d – в Ом^{-1} , а $C_{\text{экв.}}$ – в пикофарадах. Формулы справедливы при $10,07 \leq f \leq 32,47$. При $f = 32,47$ МГц величины B_d и $C_{\text{экв.}}$ обращаются в нуль, а при $f = 10,07$ МГц – в бесконечность.

Паразитные колебания в системе дуант – камера

В ВЧ ускоряющей системе синхроциклотрона наряду с электромагнитными колебаниями рабочего типа, используемыми для ускорения частиц, могут возникать паразитные колебания, которые нарушают нормальный процесс ускорения.

Известно, что в действующих моделях синхроциклотронов имели место следующие виды паразитных колебаний:

- объемные;
- поперечные;
- колебания паразитных контуров, образованных вспомогательными конструктивными элементами системы;
- высшие моды продольных колебаний;
- паразитные колебания в вариаторе;
- паразитные колебания элементов генератора и фидеров связи.

Значения частот паразитных резонансов определяются параметрами ускоряющей системы. Частота многих из них изменяется с изменением емкости вариатора.

Ниже рассмотрены паразитные колебания, наблюдавшиеся в системе дуант – камера синхроциклотрона ПИЯФ.

Объемные колебания

Резонансные частоты объемных колебаний камеры зависят от размеров и формы ее полости. Полость камеры синхроциклотрона ПИЯФ представляет собой неправильную призму, основания которой не являются плоскостями из-за наличия магнитных шиммов. Высота внутренней полости камеры уменьшается по мере увеличения радиуса полюса магнита.

При проведении измерений на системе дуант – камера наблюдалось возбуждение объемных колебаний в полости камеры на частоте 27 МГц, по виду напоминающих мод E_{010} для цилиндрической полости (рис. 5.14). Частота определялась по максимуму амплитуды ВЧ-напряжения, получаемого с датчика, подключенного к верхней и нижней крышкам камеры вблизи ее центра. Мод колебаний определялся микроамперметром с ВЧ-термопреобразователем, имеющим наружную ориентируемую в пространстве рамку.

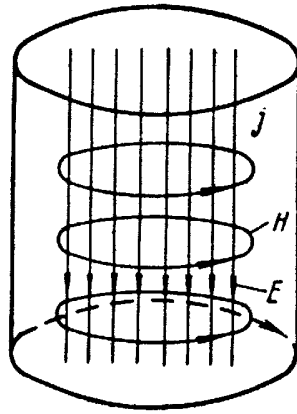


Рис. 5.14. Схема возбуждения объемных колебаний в цилиндрическом резонаторе

Как известно, резонансная частота мода для цилиндрической полости радиуса R определяется выражением

$$f_{(\text{МГц})} = \frac{115}{R(\text{м})}.$$

Резонансную частоту камеры синхроциклотрона ПИЯФ можно оценить как среднюю между резонансными частотами двух цилиндров, один из которых является вписанным в объем камеры, а другой описанным вокруг нее:

$$f_{(\text{МГц})}^{\text{об.}} = \frac{230}{R^{\text{вп.}}(\text{м}) + R^{\text{оп.}}(\text{м})}.$$

Для камеры синхроциклотрона ПИЯФ $R^{\text{вп.}} \approx 3,7$ м, $R^{\text{оп.}} \approx 4,3$ м, отсюда $f^{\text{об.}} = 28,8$ МГц.

Рассчитанное таким способом значение резонансной частоты камеры примерно на 2 МГц выше измеренной. Это можно объяснить тем, что при расчете не учитывалось влияние дуанта, который увеличивает собственную емкость камеры и понижает ее резонансную частоту. Было выяснено, что с помощью регулировочных приспособлений, находящихся в камере (центральные симметрирующие пластины и задняя регулируемая плакировка), не удастся сдвинуть резонансную частоту объемных колебаний более чем на $\pm 0,5$ МГц. Таким образом, резонансная частота объемных колебаний камеры, приблизительно равная 27 МГц, находится внутри рабочего диапазона ускоряющей системы.

Возбуждение объемных колебаний камеры при нормальной работе ускорителя может происходить в случае несимметричного расположения дуанта относительно средней плоскости, проходящей между основаниями камеры, за счет появления вертикальной составляющей электрического поля. При совпадении частоты рабочей программы с частотой объем-

ных колебаний из-за возникновения связи между основными и объемными колебаниями часть энергии генератора будет расходоваться на поддержание объемных колебаний и при достаточно сильной связи между ними будет приводить к разрыву частоты основной программы.

Впоследствии было проверено, что резонансную систему дуант – камера возможно отсимметризовать с помощью центральных регулируемых пластин сверху и снизу камеры, а также независимо с помощью задней регулируемой плакировки у вариаторов так, чтобы объемные колебания не возбуждались.

Поперечные колебания

Резонансные частоты поперечных колебаний дуанта определяются не только его формой, размерами и положением относительно поверхностей камеры, но и величиной подключенной к нему емкости, т. е. зависят от угла поворота вариаторов.

При возбуждении в системе основного мода поперечных колебаний узел напряжений располагается на продольной оси симметрии дуанта, амплитуда ВЧ-напряжения растет слева и справа от продольной оси, достигая максимума по боковой периферии дуанта, и имеет противоположные фазы. Для возбуждения поперечных колебаний достаточно, чтобы в автоколебательной системе существовала асимметрия относительно вертикальной плоскости, проходящей вдоль оси дуанта.

В системе дуант – камера синхроциклотрона ПИЯФ наблюдалось возбуждение основного мода поперечных колебаний, лежащих в диапазоне частот 25–15 МГц. На рис. 5.11 (кривые II) приведены зависимости частоты поперечных колебаний от величины емкости, подключаемой к дуанту, при двух крайних положениях боковых регулировочных конденсаторов, предназначенных по проекту НИИЭФА для симметрирования системы относительно продольной оси и для изменения резонансных частот поперечных колебаний. Величины емкости каждого из них в крайних положениях равны $C_{\max} \approx 400$ пФ, $C_{\min} \approx 50$ пФ.

Таким образом, резонансные частоты основного мода поперечных колебаний лежат внутри рабочего диапазона частот ускоряющей системы и довольно близко подходят к основной рабочей частоте системы.

Колебания паразитных контуров в системе дуант – камера

При измерениях, проводимых на системе дуант – камера, был обнаружен паразитный резонанс на частоте 24 МГц, который обуславливался резонансом дросселей водяного охлаждения. Дроссели по 17 витков диаметром 270 мм были выполнены из 8 медных трубок в параллель диаметром по 18 мм каждая. Чтобы вывести паразитную резонансную частоту

дросселей за диапазон рабочих частот, пришлось уменьшить общую длину трубок, образующих дроссель. При длине трубок ~ 5 м полуволновой резонанс сместился на частоту 32 МГц.

Таким образом, выполнив радиочастотные измерения на системе дуант – камера (без вариаторов и основного генератора), можно сделать следующие выводы:

1) диапазон частот системы дуант – камера $f_{\max} = 32,47$ МГц, $f_{\min} = 10,07$ МГц и коэффициент перекрытия $K_f = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = 3,04$ превышают

необходимые значения f_0 и f_k для протонного и дейтонного диапазонов;

2) паразитная частота объемных колебаний камеры лежит внутри частот рабочего диапазона, что может приводить к его разрыву;

3) паразитные резонансные частоты основного мода поперечных колебаний $f^1 \approx 25-15$ МГц также лежат в пределах частот рабочего диапазона, что может приводить к перескоку генератора дуанта с частоты рабочей программы на частоту поперечных колебаний.

5.4. Вариаторы частоты синхроциклотрона ПИЯФ

Принцип работы и схема вариаторов

Как отмечалось, перестройка резонансной частоты ускоряющей системы синхроциклотрона производится с помощью переменной емкости, выполненной в виде двух вращающихся конденсаторов (вариаторов частоты), подключенных к хвостовой части дуанта. Оба вариатора выполнены идентично, и принципиальная схема одного из них представлена на рис. 5.15.

Вариатор имеет ротор с шестью группами лопастей и за один оборот обеспечивает шесть полных периодических циклов изменения резонансной частоты ускоряющей системы. Один период изменения частоты соответствует повороту ротора на угол 60° , причем от 0 до 39° происходит увеличение эффективной емкости вариатора (рабочий ход изменения частоты программы), а от 39 до 60° – уменьшение эффективной емкости вариатора (нерабочий, обратный, ход изменения частотной программы).

При вращении вариатора пластины ротора (9), угловая протяженность которых 21° , входят в статорные пластины, которые разбиты по угловой протяженности и месту их расположения на два отдельных пакета: дуантный пакет (8) и два индуктивных пакета (1).

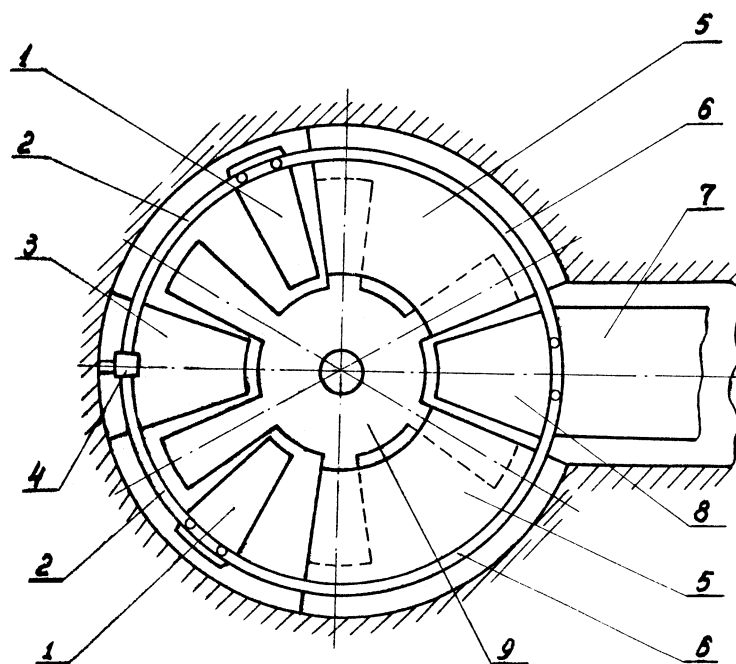


Рис. 5.15. Схема вариатора частоты (ротор показан в положении $\alpha = 0^\circ$): 1 – верхние и нижние индуктивные пакеты; 2 – задние части индуктивных колец; 3 – задний «земляной» пакет; 4 – задняя заземляющая дужка; 5 – верхний и нижний «земляные» пакеты; 6 – передняя часть индуктивных колец; 7 – дуант; 8 – дуантный пакет; 9 – вал ротора вариатора

На рис. 5.16 показаны графики изменения геометрической емкости при вращении ротора для каждого из пакетов: C_1 – дуантного, C_2 – индуктивного.

Заметим, что дуантные и индуктивные пластины имеют потенциал, близкий к потенциалу дуанта, т. е. $\sim 10\text{--}20$ кВ, роторные пластины должны иметь нулевой потенциал по высокой частоте. Такое заземление роторных пластин осуществляется при помощи трех «земляных» пакетов (рис. 5.15): заднего «земляного» пакета и верхнего и нижнего «земляных» пакетов. Дополнительно ротор вариатора заземлен полицилиндрическими конденсаторами, служащими одновременно и для защиты его подшипников от протекания по ним ВЧ-токов.

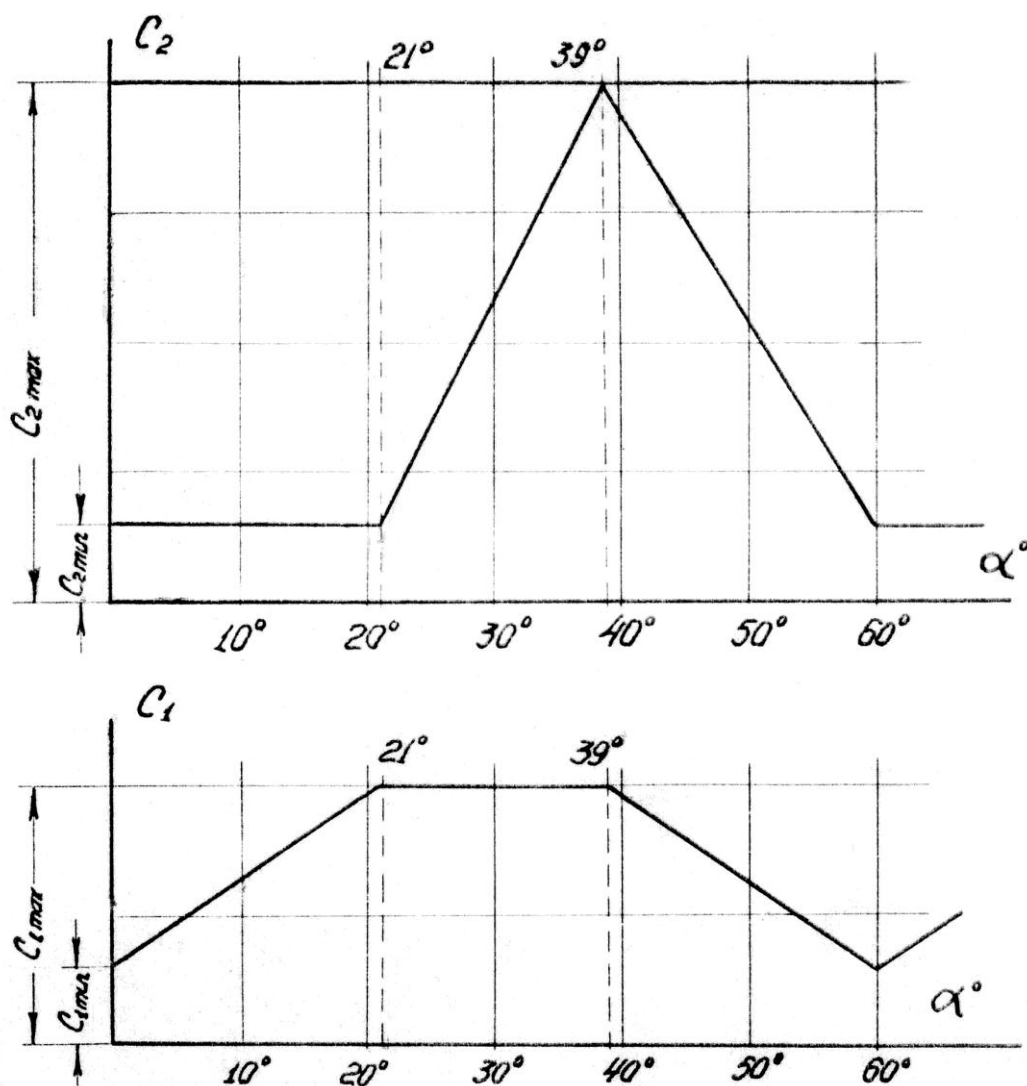


Рис. 5.16. Графики изменения геометрической емкости пакетов при вращении ротора вариатора

Эквивалентная схема вариатора частоты

Как было показано выше, для того чтобы осуществить для дуантной системы перекрытие по частоте от 30 до 13,2 МГц, необходимо изменять величину емкости на конце дуанта от $C_{\min} = 200$ пФ до $C_{\max} = 7\,500$ пФ. То есть вариатор должен обеспечивать изменение емкости с коэффициентом перекрытия по емкости $K_C = C_{\max} / C_{\min} = 37,5$ (см. рис. 5.11). Можно показать, что при помощи вариатора в виде пластинчатого конденсатора невозможно достичь такого большого коэффициента. Поэтому вариатор имеет сложную схему с добавлением индуктивностей и использованием резонансных свойств LC -контуров. При этом эффективная емкость вариатора может быть сделана больше ее геометрической емкости, а $K_C \approx 40$. Для этого между дуантом и индуктивным пакетом была

добавлена индуктивность в виде индуктивных дуг (колец) L_1 , а параллельно индуктивным пакетам C_2 добавлена шунтирующая индуктивность L_2 .

Размеры основных конструктивных элементов вариатора по порядку величины соизмеримы с длиной волны ускоряющего напряжения, поэтому вариатор следует рассматривать как систему с распределенными параметрами, расчет которой из-за сложной геометрической формы элементов крайне затруднен. Поэтому для оценки параметров вариатора мы использовали приближение, в котором вариатор представляет собой систему с сосредоточенными параметрами.

Упрощенная эквивалентная схема для двух вариаторов приведена на рис. 5.17а, а полная схема каждого из вариаторов – на рис. 5.17б.

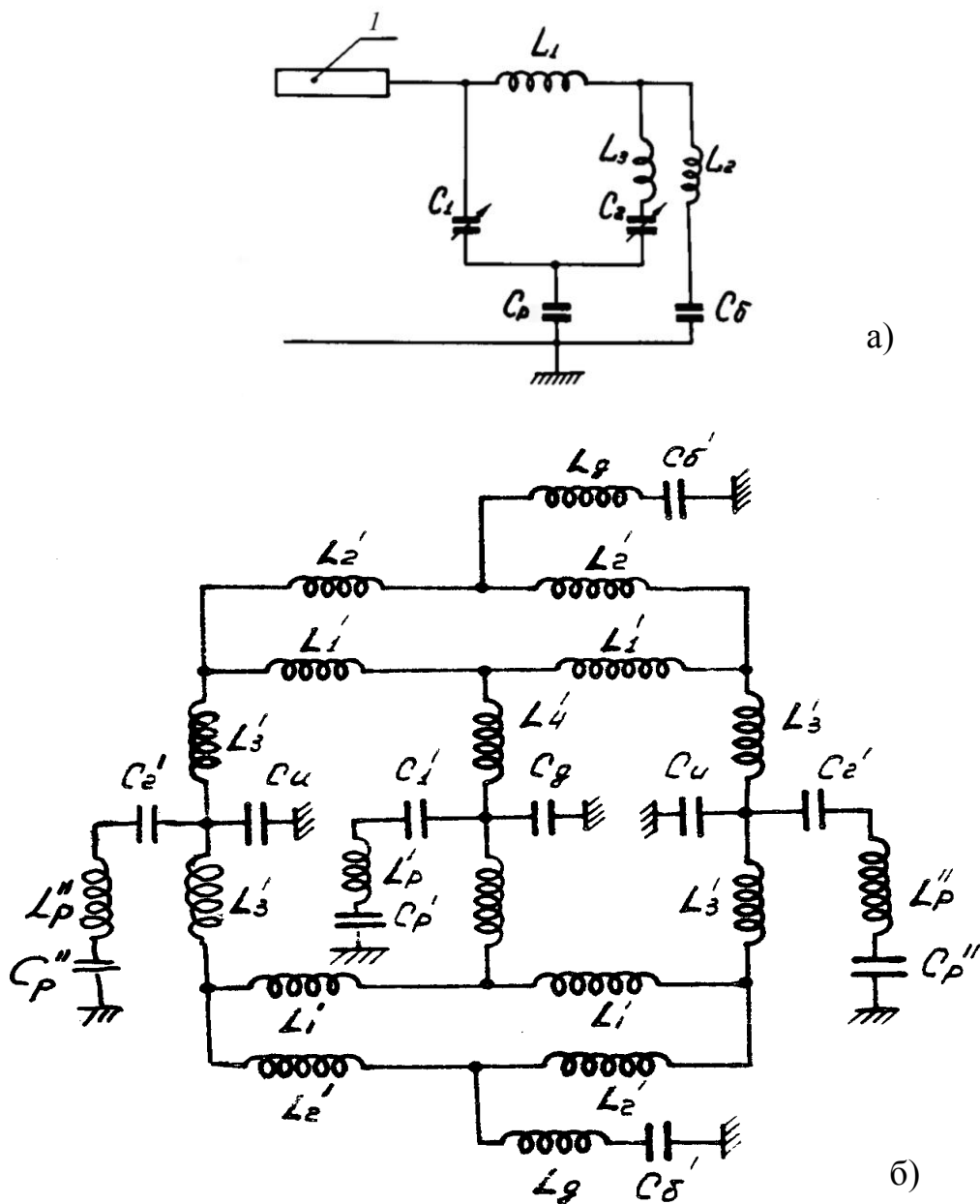


Рис. 5.17. Схемы вариаторов:

- а) упрощенная эквивалентная схема для двух вариаторов;
- б) эквивалентная схема каждого из вариаторов

На рис. 5.17а введены обозначения: l – дуант; $C_1 = 2C'_1$ и $C_2 = 4C'_2$ – переменные емкости дуантного и индуктивного пакетов вариаторов на ротор; $L_1 = L'_1/8$ и $L_2 = L'_2/8 + L_d/4$ – индуктивности дуг индуктивных колец; $L_3 = L'_3/8$ – индуктивность конструкции подсоединения индуктивных пакетов к индуктивным кольцам; C_p – емкость ротора вариаторов на землю, образованная «земляными» пакетами и полицилиндрическими конденсаторами; C_6 – емкость задних блокировочных конденсаторов, заземляющих индуктивные кольца вариаторов по ВЧ.

На рис. 5.17б: L'_1 – индуктивность части дуги от дуантного до индуктивного пакета; L'_2 – индуктивность части дуги от индуктивного пакета до заземляющей дужки; L_d – индуктивность заземляющей дужки; L'_3 – индуктивность подсоединения дуантного пакета к дугам; L'_4 – индуктивность подсоединения индуктивного пакета к дугам; L'_p, L''_p – индуктивности ротора; C'_1 – емкость дуантного пакета на ротор; C'_2 – емкость индуктивного пакета на ротор; C'_p, C''_p – емкости ротора на землю; C'_6 – емкость блокировочного конденсатора; $C''_и$ – емкость индуктивного пакета на землю; $C'_д$ – емкость дуантного пакета на землю.

Сложение последовательных и параллельных индуктивностей и емкостей в схеме на рис. 5.17б приводит к схеме, представленной на рис. 5.18а, б.

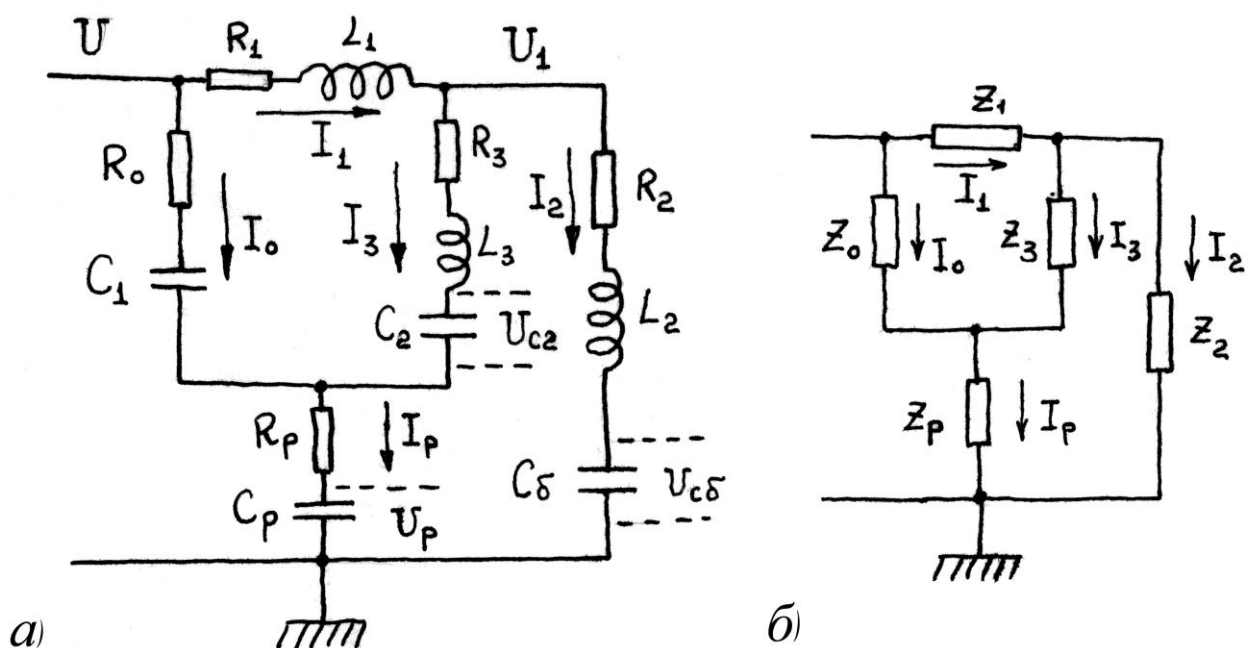


Рис. 5.18. Сложение последовательных (а) и параллельных (б) индуктивностей и емкостей

На рис. 5.18 введены обозначения: C_1 – емкость дуантного пакета на ротор; C_2 – емкость двух индуктивных пакетов на ротор; C_p – емкость ротора на землю; C_6 – емкость заднего блокировочного конденсатора; L_1 – индуктивность передней части дуг от дуантного пакета до индуктивного; L_2 – суммарная индуктивность задней части дуг и шунтов; L_3 – индуктивность подсоединения индуктивных пакетов к дугам; R_0, R_1, R_2, R_3 и R_p – соответствующие сопротивления потерь элементов вариатора; U – амплитуда напряжения в месте подключения вариатора к дуанту:

$$U = \frac{U_{\text{уск.}}}{n_d},$$

где $U_{\text{уск.}}$ – амплитуда ускоряющего напряжения на дуанте, а n_d – коэффициент трансформации напряжения от ускоряющей щели к месту подключения вариатора.

Параметрами вариатора, определяющими его характеристики в случае вариатора без потерь, являются три значения индуктивности L_1, L_2 и L_3 , два значения емкости C_p и C_6 и две функции $C_1(\alpha)$ и $C_2(\alpha)$, определяющие зависимость емкостей C_1 и C_2 от угла поворота вариатора.

Если известны начальная f_0 и конечная f_k частоты системы вариатор – дуант, то могут быть написаны два условия, из которых можно определить какие-либо два параметра вариатора, например L_2 и L_3 , при заданных остальных параметрах. Если, кроме того, задана необходимая частотная программа $f(\alpha)$, то дополнительно может быть определена одна функция от угла, например $C_2(\alpha)$.

Ниже мы найдем формулы для выражения этих параметров.

Упрощенная схема вариатора частоты

Для облегчения анализа процессов, происходящих в вариаторе, схема вариатора без потерь может быть упрощена. Поскольку величины емкостей C_p и C_6 велики по сравнению с C_1 и C_2 (рис. 5.18а), их можно положить равными бесконечности. В этом случае схема вариатора приобретает вид, представленный на рис. 5.19.

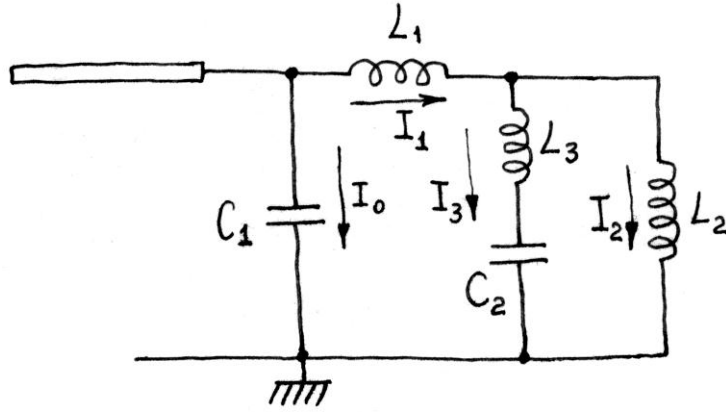


Рис. 5.19. Упрощенная схема вариатора

Полагая входное сопротивление вариатора $Z_p = 0$, получим его входную проводимость $y_{\text{вх.}} = \frac{1}{z_0} + \frac{z_2 + z_3}{z_1 z_2 + z_1 z_3 + z_2 z_3}$. Заменяя величины z их выражениями через L_1, L_2, L_3, C_1, C_2 и ω , найдем

$$y_{\text{вх.}} = j\omega C_1 - j \frac{1}{\omega(L_1 + L_2)} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2},$$

где $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{C_2(L_3 + \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2})}}$; $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{C_2(L_2 + L_3)}}$.

Представляя входную проводимость вариатора в виде $y_{\text{вх.}} = j\omega C_{\text{экв.}}$, получим выражение для эквивалентной емкости вариатора

$$C_{\text{экв.}} = C_1 - \frac{1}{\omega^2(L_1 + L_2)} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2}.$$

Введем обозначения: $\omega_3 = \frac{1}{\sqrt{C_2 L_3}}$; $\omega_4 = \frac{1}{\sqrt{C_1(L_1 + L_2)}}$;

$$\omega_{p1, p2} = \frac{\omega_1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_4}{\omega_2}\right)^2 \pm \sqrt{\left[1 + \left(\frac{\omega_4}{\omega_2}\right)^2\right]^2 - 4 \left(\frac{\omega_4}{\omega_1}\right)^2}}.$$

Легко видеть, что имеет место соотношение $\omega_2 < \omega_1 < \omega_3$. Используя эти обозначения, входную проводимость вариатора можно представить в виде

$$y_{\text{вх.}} = j\omega C_1 \frac{\left[1 - \left(\frac{\omega_{p1}}{\omega}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega_{p2}}{\omega}\right)^2\right]}{1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2}.$$

Соответственно, входное сопротивление вариатора будет

$$Z_{\text{вх.}} = -j \frac{1}{\omega C_1} \frac{1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega_{p1}}{\omega}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega_{p2}}{\omega}\right)^2\right]}.$$

Частоты ω_{p1} и ω_{p2} являются частотами параллельных резонансов вариатора, а частота ω_1 – частотой последовательного резонанса. Из общей теории цепей следует, что при любых значениях параметров вариатора имеет место соотношение

$$\omega_{p1} < \omega_1 < \omega_{p2}.$$

В соответствии с этим входное сопротивление вариатора без потерь имеет вид, представленный на рис. 5.20.

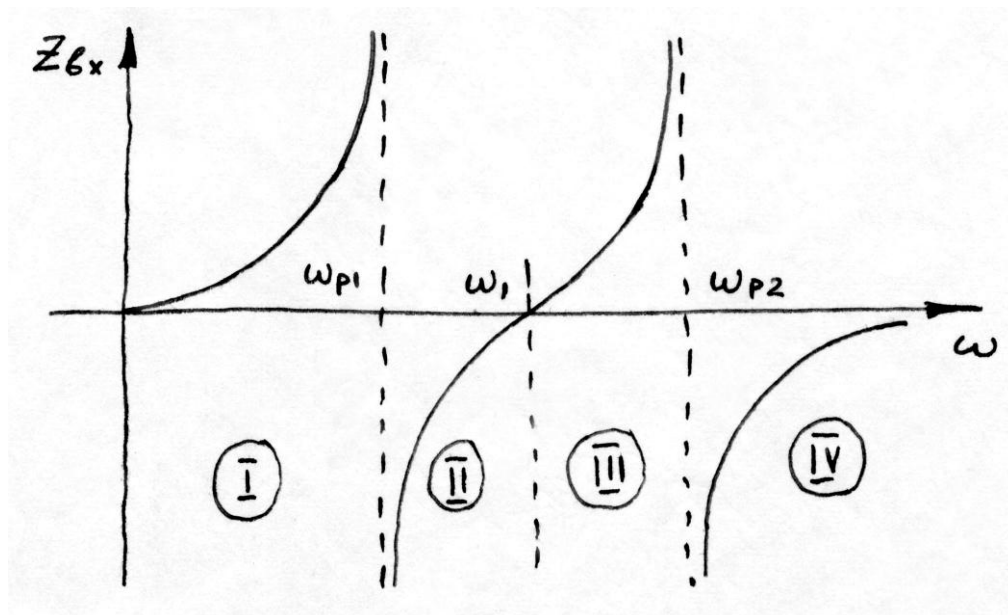


Рис. 5.20. Входное сопротивление вариатора в зависимости от частоты

В областях I и III входное сопротивление вариатора носит индуктивный характер, в областях II и IV – емкостный. Рабочей областью вариатора является область II, в которой цепочка, составленная из L_3 и C_2 , работает как емкость.

Выражения для токов в различных цепях вариатора имеют вид (направления токов приняты исходя из рис. 5.19)

$$I_1 = \frac{U}{Z_4} = -j \frac{U}{\omega(L_1 + L_2)} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2};$$

$$I_2 = -j \frac{U}{\omega(L_1 + L_2)} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_3}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2};$$

$$I_3 = I_1 - I_2 = j \frac{U L_2}{L_1 + L_2} \frac{\omega C_2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2};$$

$$I_0 = j \omega C_1 U.$$

Выражения для амплитуд напряжений U_1 и U_{C2} имеют вид

$$U_1 = I_2 j \omega L_2 = \frac{U L_2}{L_1 + L_2} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_3}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2};$$

$$U_{C2} = \frac{I_3}{j \omega C_2} = \frac{U L_2}{L_1 + L_2} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2};$$

$$U_{C2} = \frac{U_1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_3}\right)^2}.$$

Эпюры распределения амплитуд напряжения по элементам вариатора представлены на рис. 5.21.

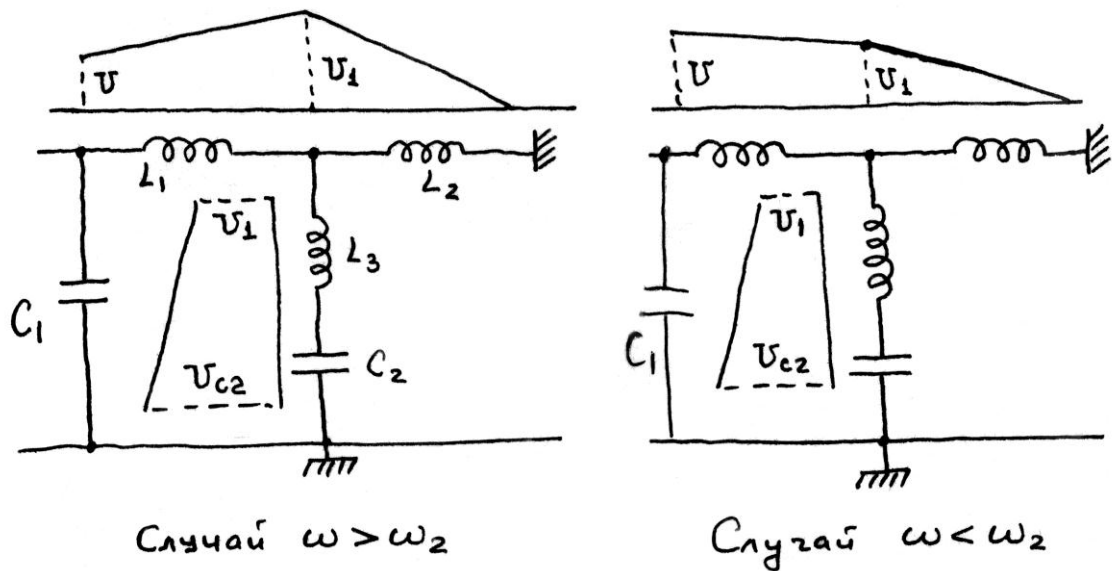


Рис. 5.21. Эпюры распределения амплитуд напряжения по элементам вариатора

При $\omega = \omega_2$ величина $U_1 = U$. Выражения для токов I_2 и I_3 можно представить в виде

$$I_2 = I_1 \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_3}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}; \quad I_3 = -I_1 \frac{\omega^2 L_2 C_2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}.$$

Общий ток вариатора

$$I = I_0 + I_1 = jU \left(\omega C_1 - \frac{1}{\omega(L_1 + L_2)} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2} \right)$$

или

$$I = U y_{\text{вх.}} = jU \omega C_1 \frac{\left[1 - \left(\frac{\omega_{p1}}{\omega}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega_{p2}}{\omega}\right)^2\right]}{1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2}.$$

На рис. 5.22 представлены зависимости токов I_1 , I_2 и I_3 от частоты при фиксированном угле поворота вариатора. Отрицательные значения токов соответствуют индуктивному току, положительные – емкостному. Рабочей области II на рис. 5.20 соответствует область изменения ω , лежащая левее ω_1 .

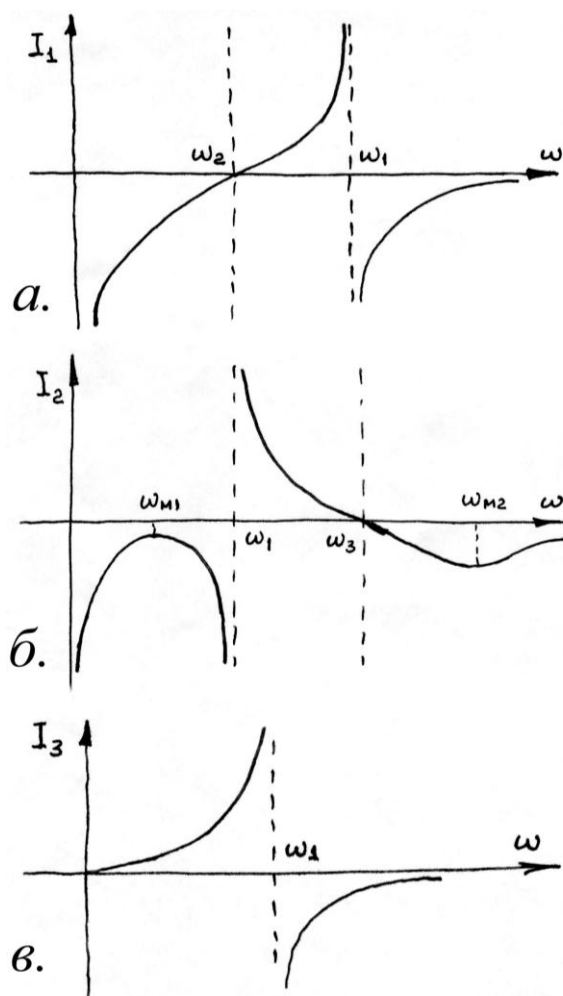


Рис. 5.22. Зависимости токов I_1 , I_2 и I_3 от частоты при фиксированном угле поворота вариатора

Полученные выше формулы позволяют рассчитать основные параметры вариатора, если будут известны величины емкостей и индуктивностей, входящих в их конструкцию. Эти параметры оценивались по формулам, приведенным в главе 4, а уточнение полученных величин проводилось экспериментально на реальном вариаторе, размещенном на стенде.

Прежде чем перейти к методике измерения параметров вариатора, остановимся на кратком описании его конструкции.

Конструкция вариатора частоты

Конструкция одного из вариаторов (левого) приведена на рис. 5.23. На валу ротора находится шесть лопастей, каждая из которых при вращении ротора последовательно входит в емкостное зацепление с пластинами, прикрепленными к дуанту непосредственно (дуантный пакет) или через индуктивные дуги (индуктивные пакеты). Заземление ротора по высокой частоте производится через емкостные «земляные» пакеты. (Более подробное описание конструкции вариатора приведено в главе 6.)

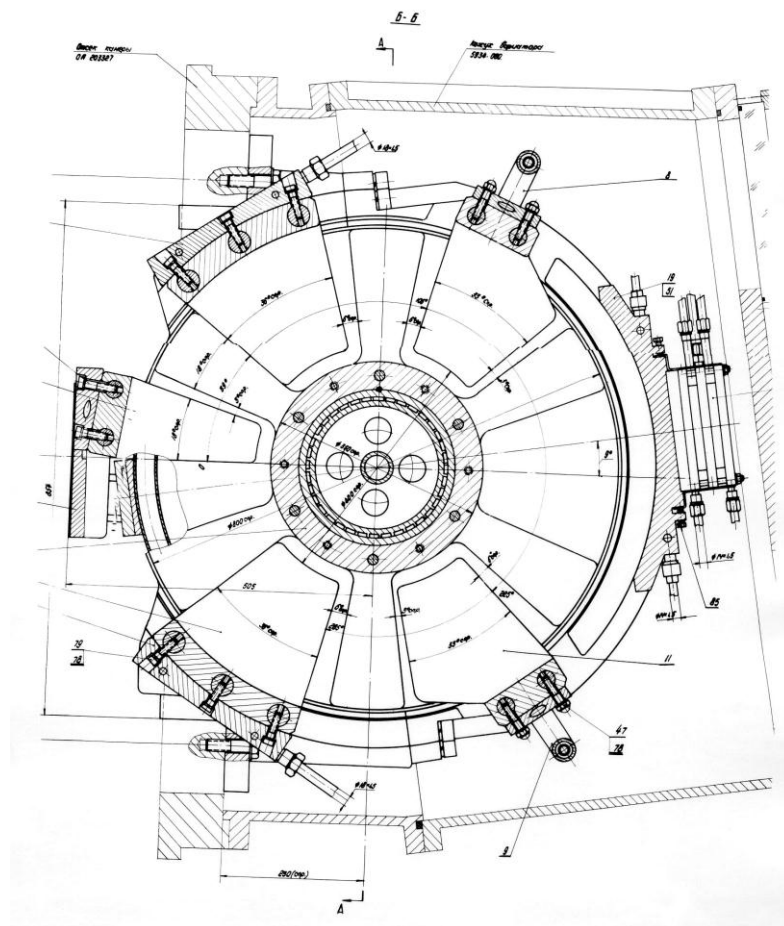
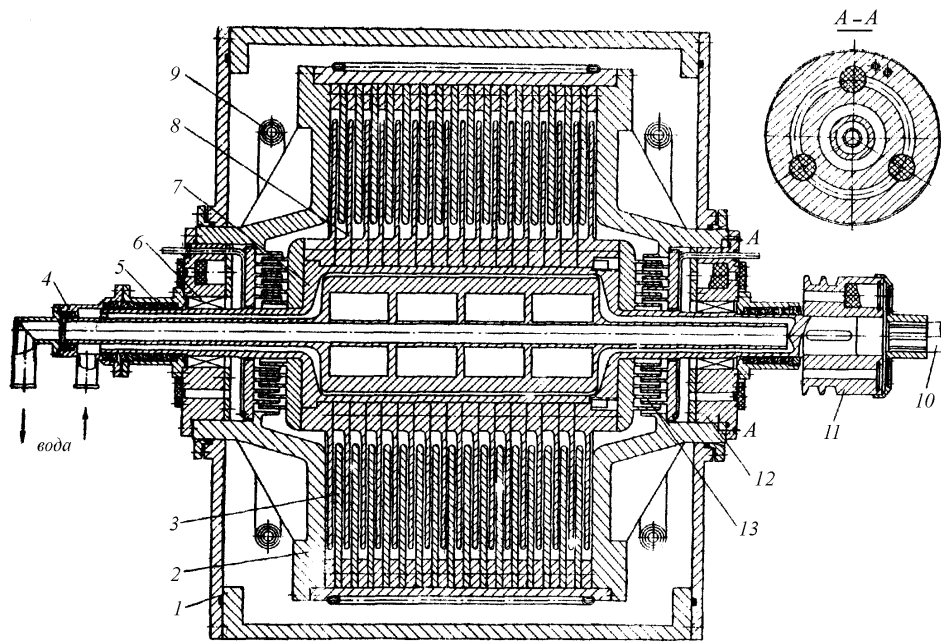


Рис. 5.23. Вариатор частоты (левый):

1 – кожух вакуумный; 2 – несущий корпус; 3 – «земляной» пакет (в разрезе условно); 4 – муфта водораспределительная; 5 – вакуумное уплотнение вала; 6 – узел подшипника с маслоуплотнением; 7 – вал ротора; 8 – диски ротора; 9 – индуктивное кольцо; 10 – соединительный вал; 11 – приводной шкив; 12 – несущая изоляционная обойма; 13 – полицилиндрический конденсатор

Измерение радиочастотных параметров вариатора частоты

С февраля по май 1967 года на изолированном от ускоряющей системы вариаторе проводились радиочастотные измерения с целью определения его параметров¹. Были измерены параметры отдельных элементов вариатора, определены значения резонансных частот f_{p1} , f_1 и f_{p2} , измерены величины его эффективных емкостей $C_{\text{эфф.}}^{\min}$ и $C_{\text{эфф.}}^{\max}$, и выявлены паразитные резонансы, обусловленные конструктивными особенностями вариатора [3].

Необходимо отметить, что вариатор представляет собой систему с распределенными параметрами, поэтому проведение измерений представляет известные трудности, а полученные в результате измерений его параметры необходимо считать ориентировочными.

Измерение максимальных величин емкостей дуантных и индуктивных пакетов

Из-за конструктивных особенностей вариатора независимое измерение величин C_1 и C_2 представляет известные трудности. Поэтому оценка величин C_1 и C_2 производилась следующим образом: при разомкнутой индуктивности L_2 (рис. 5.19) была измерена величина суммарной емкости $C = C_1 + C_2$ при различных углах поворота ротора α . Измерения производились универсальным мостом типа УМ-3 по методу двух вольтметров и эталонной емкости на частоте ~ 10 кГц. Полученные этими двумя способами величины C отличались не более чем на 5 % друг от друга, и их средние значения в зависимости от угла α приведены на рис. 5.24.

Величина их разности хорошо согласуется с суммарной геометрической величиной емкостей C_1 и C_2 при $\alpha = 39^\circ$, рассчитанной только исходя из величины площадей роторных лопаток без учета краевых эффектов:

$$C_{\max} - C_{\min} = 4\,700 \text{ пФ}; [C_1(39^\circ) + C_2(39^\circ)] \text{ геом.} = 4\,400 \text{ пФ.}$$

Так как при $\alpha = 39^\circ$ емкость C_{\max} образована двумя группами лопаток ротора, полностью находящимися в дуантных пакетах, и четырьмя группами лопаток ротора, находящимися в индуктивных пакетах, то можно считать, что

$$C_{1\max} = 2\,000 \text{ пФ} = 1\,800 \text{ см}; C_{2\max} = 4\,000 \text{ пФ} = 3\,600 \text{ см.}$$

¹ Измерения проводились на одном вариаторе, и все величины, соответственно, пересчитывались на два вариатора.

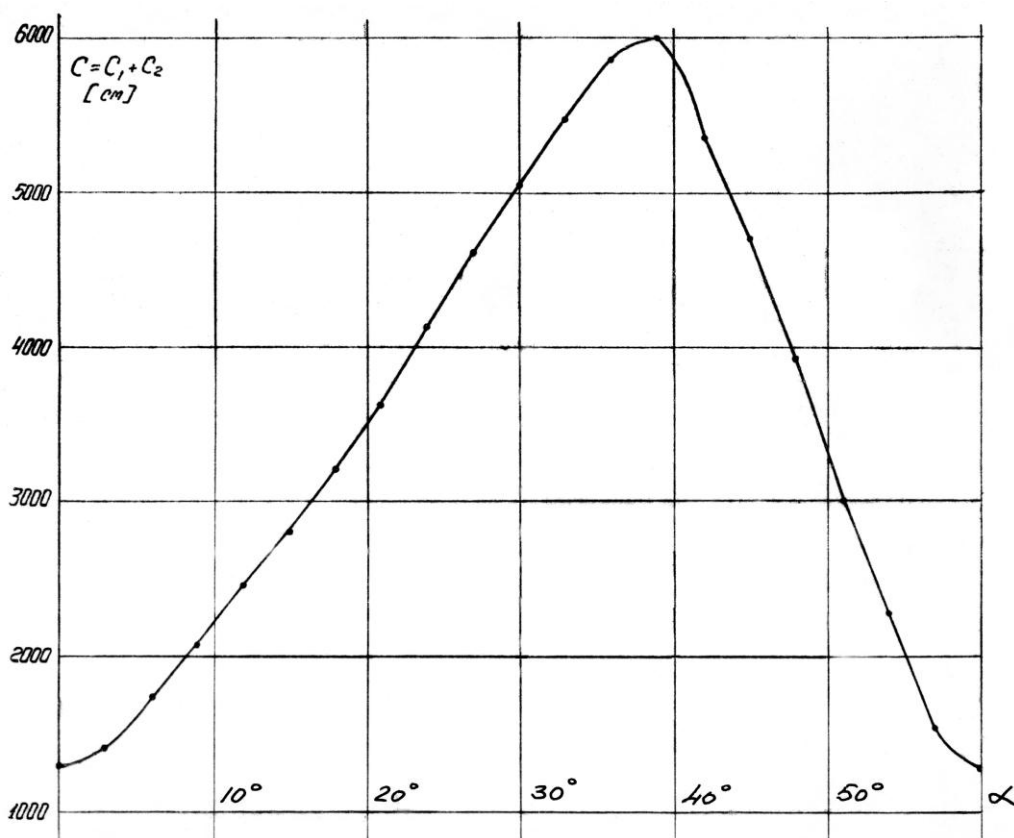


Рис. 5.24. Зависимость емкости C вариатора от угла поворота α ротора вариатора. Крайние значения C при $\alpha = 0^\circ$ и 39° равны: $C_{\min} = 1\,300$ пФ = $1\,170$ см, $C_{\max} = 6\,000$ пФ = $5\,400$ см

Измерение индуктивностей L_1 и L_2

Величины L_1 и L_2 были получены из значений резонансных частот контуров, образованных отдельными элементами вариатора, а также независимо при полностью изолированном от вариатора индуктивном кольце (рис. 6.6). Полученные этими двумя методами величины индуктивностей L_1 и L_2 практически совпадают. Для дальнейших расчетов принимаем $L_1 = 34$ см, $L_2 = 40$ см.

Измерение минимальных величин емкостей дуантных и индуктивных пакетов

Определение минимальных величин емкостей $C_{1\min}$ и $C_{2\min}$ производилось следующим образом: при закороченной дуантной емкости C_1 и разомкнутой индуктивности L_2 резонанс параллельного контура $L_1 C_2$ ($L_3 \ll L_1$) при $\alpha = 0^\circ$ наблюдался на частоте $f = 33$ МГц, что позволяет найти по формуле $f = 1/\sqrt{LC}$ $C_{2\min} = 690$ пФ = 620 см. Аналогично, при закороченной C_2 , найдем $C_{1\min} = 610$ пФ = 550 см.

Все измеренные параметры вариатора приведены в табл. 5.3, там же приведены значения параметров вариатора по проекту НИИЭФА.

Таблица 5.3

Параметры элементов вариатора

	Измеренные, см	По проекту НИИЭФА, см
C_{1min}	550	300
C_{2min}	620	400
C_{1max}	1 800	1 800
C_{2max}	3 600	3 600
L_1	34	—
L_2	40	—

Необходимо отметить значительное расхождение в величинах для минимальных значений C_{1min} и C_{2min} . Измеренные значения оказались значительно больше ожидаемых по проекту НИИЭФА.

Измерение эффективной емкости вариатора частоты

Измерение $C_{эфф.}$ вариатора проводилось по методу двух вольтметров и эталонного резистора R .

Измеренные величины $C_{эфф.}(0^\circ)$ в диапазоне частот 25–33 МГц и $C_{эфф.}(39^\circ)$ в диапазоне 12–16 МГц приведены на рис. 5.25.

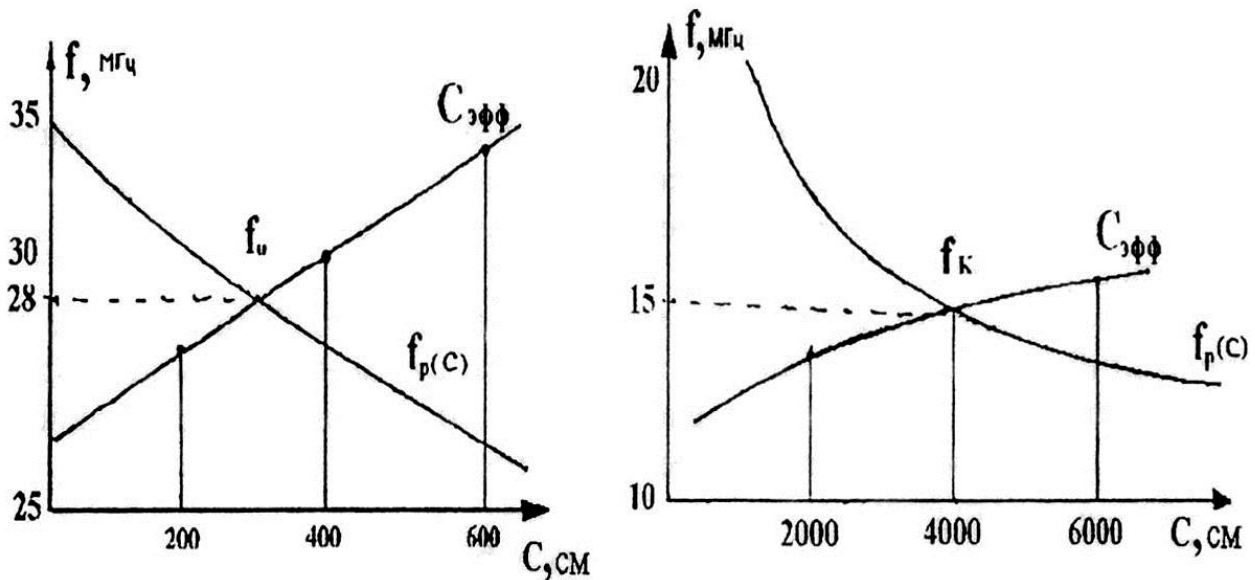


Рис. 5.25. Определение начальной f_0 и конечной f_k резонансных частот системы дуант – вариатор

Здесь же нанесена зависимость резонансной частоты дуанта от величины емкости, подключаемой к его концу, $f_d(C)$. Пересечение этих кривых дает значение граничных частот f_0 и f_k всей системы в целом и вели-

чины эффективных суммарных емкостей вариаторов на этих частотах:
 $C_{\min}^{\text{эфф.}} = 300 \text{ пФ}$; $C_{\max}^{\text{эфф.}} = 3\,800 \text{ пФ}$.

В дальнейшем было выяснено, что измеренные величины f_0 и f_k хорошо согласуются со значениями граничных частот, полученных на полностью собранной ускоряющей системе.

Паразитные колебания вариатора частоты

При измерениях, проводимых на вариаторе, были обнаружены два паразитных колебания, обусловленных особенностями конструкции вариатора, значения частот которых попадали в рабочий диапазон.

Продольное колебание

Один из паразитных резонансов вариатора f_1^B , обнаруженный на частоте 25,5 МГц, был обусловлен полуволновым продольным возбуждением ротора вариатора с максимумом амплитуды в середине оси ротора (рис. 5.26а).

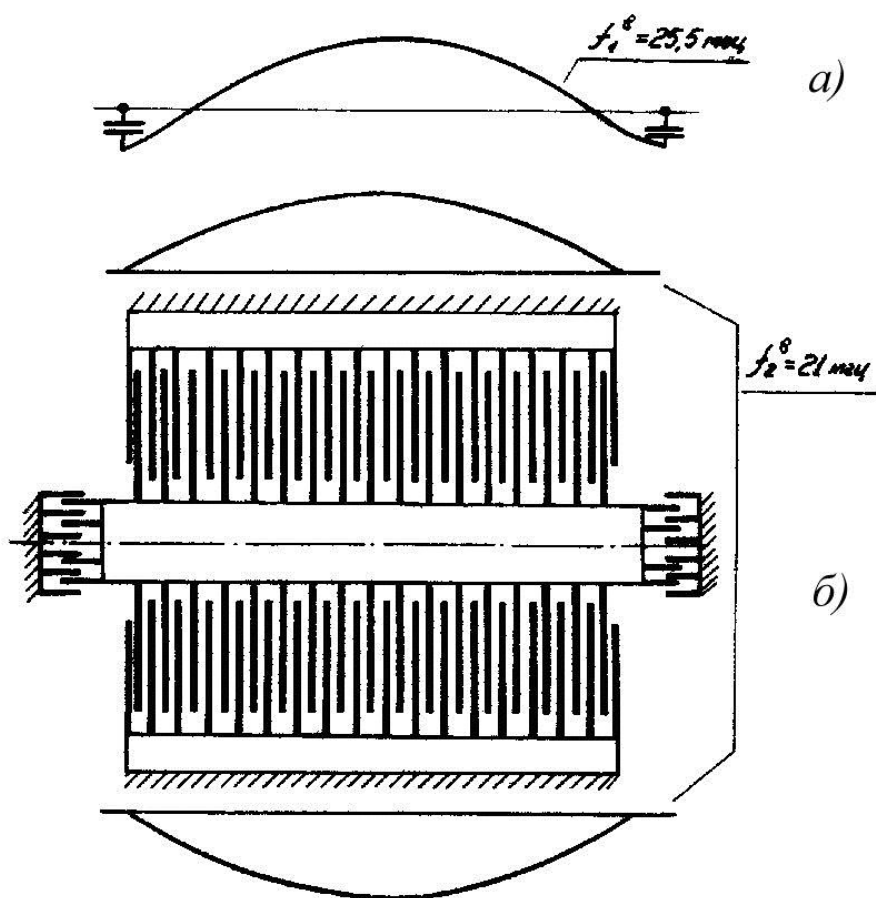


Рис. 5.26. Схема распределения амплитуд паразитных колебаний вариатора:
а) продольное колебание; б) кольцевое колебание

Распределение амплитуды определялось прибором типа Swob Н-3 фирмы Rohe und Schwarz, Мюнхен (измеритель частотных характеристик), при запитке между осью ротора и любым из «земляных» пакетов. Величина f_1^B слабо зависела ($\pm 0,5$ МГц) от положения лопаток ротора относительно «земляных» пакетов.

Было выяснено, что в продольном направлении оси ротора его лопатки совместно с «земляными» пакетами образуют резонансную линию, а полицилиндрические конденсаторы, находящиеся на концах оси ротора, играют роль сосредоточенных емкостей, подключенных к концам этой резонансной линии. С увеличением величины емкостей, подключаемых параллельно полицилиндрическим конденсаторам, значение f_1^B уменьшалось, и, наоборот, чтобы увести этот паразитный резонанс за границу рабочего диапазона, была снята часть внутренних колец полицилиндрических конденсаторов. При этом паразитный резонанс f_1^B переместился вверх, на частоту 33 МГц, т. е. за границу рабочего диапазона.

Кольцевое колебание

При подключении выхода измерителя частотных характеристик между ротором и «земляными» пакетами одновременно с продольным резонансом ротора f_1^B наблюдался еще один резонанс f_2^B на частоте 21 МГц. Величина f_2^B также не зависела от угла, и распределение амплитуды имело максимум в середине оси ротора. В отличие от f_1^B величина f_2^B не зависела и от величины емкости полицилиндрических конденсаторов. В дальнейшем было выяснено, что верхние и нижние «земляные» пакеты совместно с лопатками ротора образуют кольцевую резонансную линию. Примерное распределение амплитуды вдоль «земляных» пакетов показано на рис. 5.26б. Фазы напряжения на верхних и нижних «земляных» пакетах, измеренные фазометром, описанным в [2], были сдвинуты на 180° . При снятии верхнего или нижнего «земляного» пакета паразитный резонанс вариатора f_2^B не наблюдался.

Таким образом, в результате радиочастотных измерений, проведенных на вариаторе, были сделаны следующие выводы:

1) требуется разработать необходимые конструктивные изменения элементов вариатора, т. к. получившийся диапазон граничных частот $f_0 = 28,0$ МГц, $f_k = 15,0$ МГц значительно меньше необходимого для достижения энергии ускоренных протонов 1 ГэВ:

$$f_0 = 28,88 \text{ МГц}; f_k = 13,18 \text{ МГц};$$

2) необходимо исследовать поведение паразитных резонансов вариатора

$$f_1^B = 25,5 \text{ МГц}; \quad f_2^B = 21 \text{ МГц},$$

попадающих в диапазон рабочих частот на полностью собранной системе, т. к. при прохождении основной частоты программы через значения этих паразитных резонансов возможны разрывы частоты основной программы.

Экспериментально измеренные радиочастотные параметры дуанта и вариатора позволили перейти к измерению параметров системы дуант – вариатор.

Измерение радиочастотных параметров системы дуант – вариатор

В мае 1967 года оба вариатора частоты были полностью смонтированы на дуанте системы синхроциклотрона. С мая 1967 по ноябрь 1968 года производились экспериментальные измерения радиочастотных параметров и наладка всей резонансной системы в целом, а также работы, связанные с запуском ускорителя и получением пучка ускоренных протонов на внутренней мишени [4].

Основные этапы наладки резонансной системы дуант – вариатор (без основного генератора) включали в себя получение необходимого рабочего протонного диапазона, устранение разрывов в частотной программе из-за паразитных резонансов, симметрирование системы, а также частичное исправление формы частотной кривой.

Возбуждение резонансной системы производилось как от внешних задающих генераторов, так и от генератора самой системы. Измерения напряжений и фаз в различных точках резонансной системы проводились по методике, приведенной в работе [2].

На рис. 5.27 приведены зависимости всех резонансных частот системы дуант – вариатор от угла поворота ротора вариаторов, полученные на полностью смонтированной системе без вакуума. Возбуждение системы производилось от внешнего задающего генератора через фидер прямой связи, и амплитуда электрического напряжения в ускоряющей щели дуанта составляла величину несколько В.

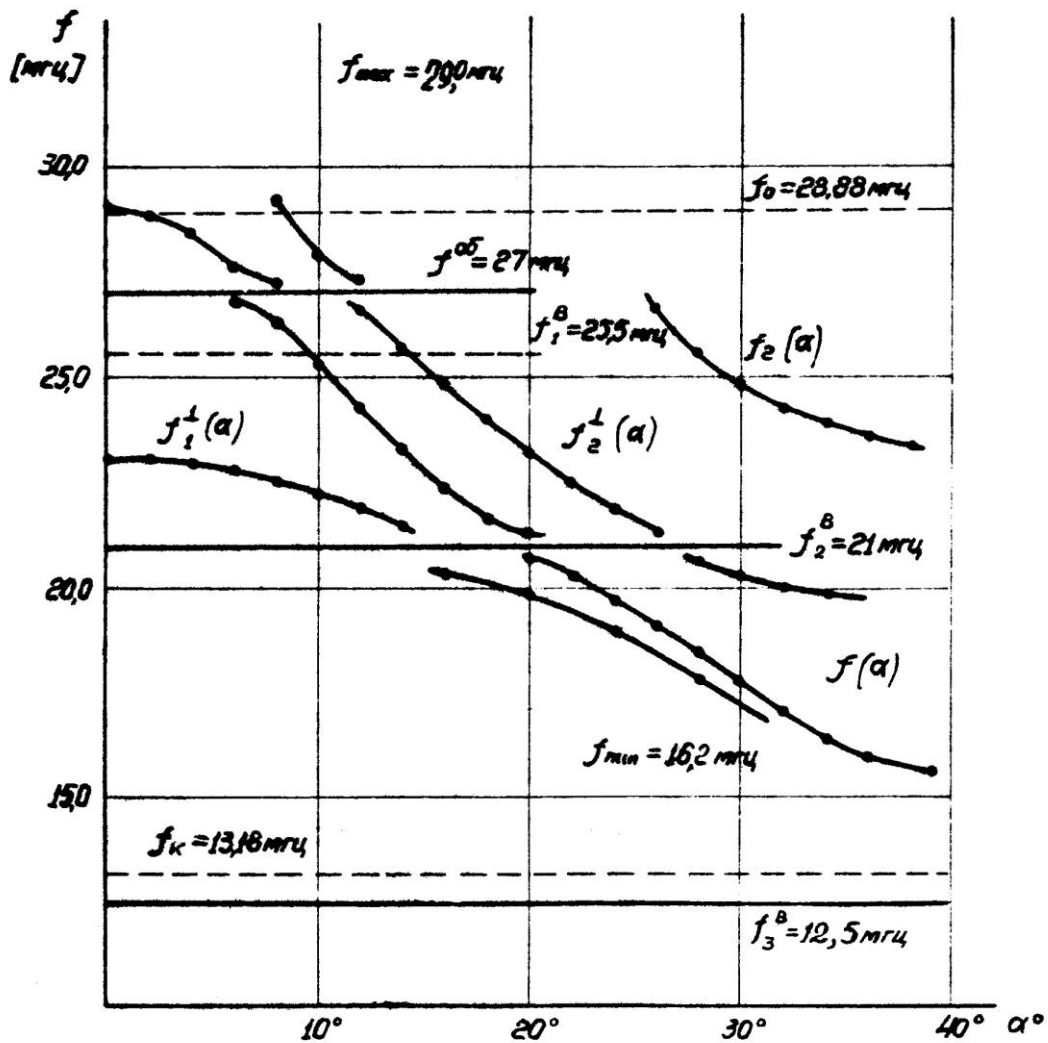


Рис. 5.27. Резонансные частоты системы дуант – вариатор.

$f(\alpha)$ – рабочая частота системы, соответствующая основному продольному模у колебаний; $f_2(\alpha)$ – вторая частота системы, также соответствующая основному模у колебаний, обусловленная вторым емкостным диапазоном $Z_{вх.}$ вариаторов при $\omega > \omega_{p2}$ (см. рис. 5.20); $f_1^\perp(\alpha)$ и $f_2^\perp(\alpha)$ – частоты поперечных колебаний системы; $f^{об.}$ – паразитная частота объемных колебаний камеры; f_1^B, f_2^B, f_3^B – паразитные частоты возбуждения вариатора

Из рис. 5.27 следует, что получившийся рабочий диапазон для резонансной системы $f_{max} = 29,0$ МГц, $f_{min} = 15,5$ МГц меньше необходимого для ускорения протонов до энергии 1 ГэВ и хорошо согласуется с величинами, полученными независимо при измерениях на дуанте (см. рис. 5.25). Все паразитные резонансы: $f^{об.}$, f_1^B и f_2^B , обнаруженные ранее, приводят к разрывам рабочей частотной программы. Нерабочие частотные программы $f_2(\alpha)$, $f_1^\perp(\alpha)$ и $f_2^\perp(\alpha)$ также претерпевают разрывы

в местах совпадения с частотами паразитных резонансов. Отсутствие разрывов в районе 25,5 МГц объясняется тем, что при снятии кривых (рис. 5.27) паразитный резонанс вариаторов $f_1^B = 25,5$ МГц был предварительно уведен вверх, за пределы рабочего диапазона, за счет снятия части полицилиндрических конденсаторов с осей роторов вариаторов.

На основе вышеприведенных измерений можно сделать следующие выводы:

1) конструкция ВЧ-системы не позволяет получить необходимый для ускорения диапазон частот 30–13,18 МГц;

2) все паразитные резонансы будут мешать процессу ускорения, и их необходимо устранить.

5.5. Настройка высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ

Получение рабочего диапазона частот, необходимого для ускорения протонов до энергии 1 ГэВ

Для ускорения на синхроциклотроне протонов до энергии 1 ГэВ необходимо иметь рабочий диапазон частот $f_{\max} \approx 30$ МГц, $f_{\min} \approx 13,18$ МГц (запас на ~ 1 МГц в величине f_{\max} диктуется необходимостью получения достаточной величины $df/d\alpha$ в области частоты захвата $f_0 = 28,88$ МГц).

Таким образом, полученный диапазон частот $f_{\max} = 29,0$ МГц, $f_{\min} = 15,5$ МГц необходимо было расширить на 1 МГц в область верхних частот и на 2,3 МГц в область нижних частот.

По проекту НИИЭФА вариатор не имел регулируемых элементов, позволявших менять его параметры, поэтому расширение диапазона могло быть получено лишь путем конструктивной переделки отдельных элементов вариатора.

Проанализируем полученное выше выражение для эквивалентной емкости вариатора:

$$C_{\text{экв.}}(\alpha) = C_1(\alpha) \frac{\left(1 - \frac{f_{p1}^2(\alpha)}{f^2(\alpha)}\right) \left(1 - \frac{f_{p2}^2(\alpha)}{f^2(\alpha)}\right)}{1 - \frac{f_1^2(\alpha)}{f^2(\alpha)}}$$

где $f_1(\alpha) = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_2(\alpha) \left(L_3 + \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}\right)}}$; $f_2(\alpha) = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_2(\alpha) (L_2 + L_3)}}$;

$$f_3(\alpha) = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1(\alpha)(L_1 + L_2)}};$$

$$f_{p1}(\alpha), f_{p2}(\alpha) = \frac{f_1(\alpha)}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{f_3^2(\alpha)}{f_2^2(\alpha)} \pm \sqrt{\left(1 + \frac{f_3^2(\alpha)}{f_2^2(\alpha)}\right) - 4 \frac{f_3^2(\alpha)}{f_1^2(\alpha)}}}.$$

Из выражения для $C_{\text{экв}}$ следует, что для уменьшения начальной емкости вариатора необходимо так выбрать входящие в него индуктивности, чтобы на верхнем конце диапазона частота параллельного резонанса f_{p1} была близка к начальной частоте ускоряющего напряжения. В этом случае эквивалентная емкость будет пропорциональна расстройке $\Delta f = f - f_{p1}$ и при достаточно малой величине расстройки будет значительно меньше геометрической емкости дуантного и индуктивных пакетов. В нижней части диапазона для увеличения конечной емкости вариатора необходимо, чтобы частота последовательного резонанса была близка к конечной частоте ускоряющего напряжения. В этом случае эквивалентная емкость вариатора будет обратно пропорциональна расстройке $\Delta f = f_1 - f$ и при достаточно малой расстройке будет значительно больше геометрической емкости дуантного и индуктивных пакетов.

Анализ выражения для $C_{\text{экв}}$ показал, что для уменьшения начальной емкости вариатора необходимо увеличить частоту f_{p1} , а для увеличения конечной емкости уменьшить частоту f_1 .

Из эквивалентной схемы вариатора следует, что для расширения диапазона в область нижних частот необходимо уменьшить значение

$$f_1(39^\circ) = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_2(39^\circ) \left[\frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} + L_3 \right]}},$$

а чтобы расширить в область высших частот, необходимо увеличить $f_{p1}(0^\circ)$. Изменение значений резонансных частот $f_1(39^\circ)$ и $f_{p1}(0^\circ)$ может быть произведено как за счет изменения величин емкостей $C_2(39^\circ)$, $C_1(0^\circ)$ и $C_2(0^\circ)$, так и за счет изменения величин индуктивностей L_1 , L_2 и L_3 .

Изменение величин C_1 и C_2 требует значительных конструктивных переделок дуантных и индуктивных пакетов, т. к. увеличение $C_2(39^\circ)$ возможно лишь путем уменьшения зазоров между роторными лопатками и пластинами индуктивных пакетов, а уменьшение $C_1(0^\circ)$ и $C_2(0^\circ)$ (минимальные емкости дуантных и индуктивных пакетов) возможно, по-видимому, лишь путем уменьшения угловой протяженности этих пакетов.

Изменение величин индуктивностей вариатора L_1 и L_3 также представляет известные конструктивные трудности. Величину L_2 в небольшом диапазоне (относительно просто) можно менять за счет изменения индуктивностей заземляющих дужек L_d . На первом этапе было решено расширить диапазон за счет конструктивного изменения величин индуктивностей L_2 и L_3 .

Увеличение индуктивности L_3 приводит к уменьшению $f_1(39^\circ)$ и расширению рабочего диапазона в область нижних частот. Уменьшение L_2 приводит как к увеличению $f_{p1}(0^\circ)$, так и к нежелательному увеличению $f_1(39^\circ)$. Однако можно показать, что относительный выигрыш в изменении частотной программы приводит к расширению диапазона в область верхних частот, т. к. за счет изменения величины индуктивности значение резонанса $f_{p1}(0^\circ)$ изменяется больше, чем значение $f_1(39^\circ)$.

Экспериментальная проверка влияния величины индуктивности L_2 на изменение граничных частот резонансной системы f_{\max} и f_{\min} показала, что при изменении L_2 на величину ΔL_2 величина $\frac{\Delta f_{\max}}{\Delta f_{\min}} \approx 3$. Исходя из

этого, для расширения диапазона рабочих частот величина индуктивности L_2 была уменьшена за счет новой конструкции задних заземляющих дужек L_d , а величина L_3 увеличена за счет полной переделки конструкции крепления индуктивных пакетов. Если в конструкции вариатора по первоначальному проекту НИИЭФА L_3 – это паразитная индуктивность подсоединения пакетов, то в новой конструкции индуктивность L_3 была образована с помощью П-образных стоек крепления индуктивных пакетов к кольцевым дугам. Скользящие закоротки позволяли легко менять величину индуктивности L_3 (см. рис. 6.7). Варьируя величины L_2 и L_3 , можно независимо регулировать верхнюю и нижнюю границы рабочего диапазона.

Проведенные изменения в конструкции вариатора позволили получить необходимый диапазон частот:

$$f_{\max} = 30,3 \text{ МГц}; f_{\min} = 13,23 \text{ МГц}.$$

Устранение разрывов рабочей частотной программы

Устранение разрыва программы, обусловленного объемным колебанием камеры

Отмечалось, что паразитный резонанс объемных колебаний камеры $f^{\text{об.}} = 27 \text{ МГц}$ не удастся сместить за пределы рабочего диапазона. Поэтому в районе пересечения основной частоты с частотой паразитных объемных колебаний камеры происходит разрыв рабочей программы. Величина этого разрыва зависела от положения центральных пластин

и задних регулируемых плакировок и могла достигать 1 МГц. С помощью пластин и плакировок можно было независимо отсимметрировать систему так, чтобы на рабочем ходе изменения частоты программы объемные колебания не возбуждались и, как было выяснено в дальнейшем, при переходе частоты через 27 МГц не наблюдалось потери частиц ускоренных протонов.

Устранение разрывов программы, обусловленных паразитными колебаниями вариаторов

Как отмечалось выше, паразитные резонансы вариатора, попадающие в рабочий диапазон, приводят к разрывам программы в районе частот $f_1^B = 25,5$ МГц и $f_2^B = 21$ МГц. Величина разрывов достигла нескольких МГц. При асимметрии вариаторов, например по углу α , можно было наблюдать по два разрыва, отстоящих друг от друга примерно на 0,5–1 МГц. В области разрывов величина $R_{\text{оз}}$, определяемая как резонансное сопротивление всей системы в целом, приведенное к аноду генератора, падала почти до нуля. Если паразитный резонанс вала ротора f_1^B удавалось сместить за границу рабочего диапазона путем уменьшения величины емкости полицилиндрических конденсаторов, то для ликвидации разрывов из-за паразитного кольцевого резонанса вариатора f_2^B не удалось найти никакого другого способа, кроме полной переделки конструкции «земляных» пакетов. При этом необходимо было учитывать, что уменьшение емкости ротора вариатора на землю C'_p как за счет полицилиндрических конденсаторов, так и за счет «земляных» пакетов будет приводить к возрастанию напряжения на валу ротора вариатора, величина которого по проекту не должна превышать 4,5–5 кВ. Так как максимальное напряжение в ускоряющей щели составляет ~ 15 кВ, то коэффициент перенапряжения на валу вариаторов $K = \frac{U_{\text{вала}}}{U_{\text{щели}}}$ не должен превышать 0,3–0,4.

Новые «земляные» пакеты были сконструированы так, чтобы величина емкости ротора вариатора на землю увеличивалась с увеличением угла α (с уменьшением частоты) и достигала бы своего максимального значения в конце рабочей программы. Так как величина емкости «земляных» пакетов определяет величины паразитных резонансов f_1^B и f_2^B , то при новой конструкции пакетов значения этих резонансов становятся зависящими от угла α . Новые верхние и нижние «земляные» пакеты имели 36-градусную ширину (вместо 78-градусных старых) и были расположе-

ны по окружности (по углу α) так, чтобы значения $f_1^B(\alpha)$ и $f_2^B(\alpha)$ лежали выше частоты $f(\alpha)$ во всем рабочем диапазоне. При этом вхождение лопаток ротора в «земляные» пакеты начиналось при $\alpha = 3^\circ$.

Симметрирование ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ

При наладке ускоряющей системы синхроциклотрона особое внимание было уделено ее симметрированию. Как известно, к симметрированию предъявляются следующие требования:

- с точки зрения получения постоянного напряжения вдоль ускоряющей щели, а также сверху и снизу от кромки дуанта система должна быть электрически симметрична по отношению как к медианной, так и к вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось системы. Такая симметрия должна соблюдаться во всем диапазоне рабочих частот;
- с точки зрения устранения влияния паразитных колебаний на основную программу (объемные колебания камеры, поперечные колебания системы и др.) вся система в целом или отдельные ее элементы должны быть отсимметрированы таким образом, чтобы эти паразитные колебания не возбуждались.

В принципе, эти требования не совпадают и требуют компромиссного решения.

Симметрирование ускоряющей системы для получения постоянного напряжения вдоль ускоряющей щели

Симметрирование системы с целью получения постоянного напряжения вдоль ускоряющей щели, а также сверху и снизу от кромки дуанта производилось путем тщательной сборки ее элементов. Особое внимание было уделено положению дуанта относительно крышек камеры и симметрированию вариаторов.

Дуант был выставлен с точностью до нескольких миллиметров симметрично относительно верхней и нижней крышек камеры, и его положение можно визуальнo контролировать с помощью системы реперных точек.

Вариаторы симметрировались как по отдельным элементам конструкции каждого из вариаторов, так и между собой. Отсутствие симметрии между отдельными элементами каждого из вариаторов приводило к неравномерному распределению напряжений между их верхними и нижними пакетами, правыми и левыми полицилиндрами, дугами и т. п., а также к уменьшению R_{09} всей системы, измеряемого на аноде генера-

тора. П-образные регулируемые стойки крепления индуктивных пакетов позволяли частично выравнивать напряжения на отдельных элементах вариаторов.

Требования к симметрии вариаторов оказались жесткими. Так, например, при развороте одного из вариаторов по углу α относительно другого на величину $\Delta\alpha \approx 1^\circ$ перекося в напряжении вдоль ускоряющей щели достигал величины 20–30 %. Асимметрия между вариаторами по углу α сильно сказывалась и на R_{09} системы, которое уменьшалось на 20–30 % при сдвиге между вариаторами $\Delta\alpha = 20'–30'$.

Было выяснено, что с точки зрения получения оптимальных R_{09} системы при любом угле α_1 одного из вариаторов требуется вполне определенный сдвиг $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ для второго вариатора. Поэтому практически симметрирование вариаторов по углу производилось только в середине программы на частоте 20 МГц. Такое симметрирование системы позволило получить почти постоянное с 10%-ной точностью распределение напряжений по щели дуанта.

Симметрирование ускоряющей системы для устранения влияния паразитных объемных колебаний камеры на рабочую программу

Как отмечалось выше, для устранения возбуждения объемных колебаний камеры (рис. 5.14, 5.27) производилось симметрирование системы относительно медианной плоскости на частоте $f^{об.} = 27$ МГц с помощью либо задних регулируемых плакировок, либо центральных пластин. При этом, если симметрирование производилось на частоте $f^{об.} = 27$ МГц рабочего хода изменения частоты, то на обратном ходе наблюдался разрыв частотной программы $\sim 0,3$ МГц, и наоборот. Отсимметрировать систему одновременно на рабочем и обратном ходе изменения частоты с помощью регулировок, находящихся только в камере, невозможно, т. к. вариаторы несимметричны относительно медианной плоскости при любых углах поворота ротора вариаторов α .

Из-за пересечения кривой рабочих частот $f(\alpha)$ с частотой паразитных объемных колебаний камеры требования к симметрированию системы на частоте $f^{об.} = 27$ МГц достаточно критичны. Так, например, если система была отсимметрирована до включения магнитного поля ускорителя и паразитный резонанс $f^{об.} = 27$ МГц не возбуждался, то после его включения из-за сближения крышек камеры система оказывалась настолько рассимметрированной на частоте $f^{об.} = 27$ МГц, что из-за возбуждения объемных колебаний камеры разрыв частоты основной программы достигал величины 0,3 МГц. Смещение задних плакировок на несколько миллиметров также приводит к полному разрыву частоты рабочей программы.

Так как доступ к центральным регулируемым пластинам затруднен и конструкция привода их перемещением достаточно сложна, то в дальнейшем центральные пластины были удалены полностью. Для задних плакировок была сделана дистанционная регулировка их положения с пульта управления синхроциклотрона. Симметрирование системы производилось на частоте $f^{об.} = 27$ МГц по форме огибающей амплитуды ВЧ-напряжения, получаемого с емкостного делителя, расположенного около ускоряющей щели.

Такой способ симметрирования системы позволил полностью избавиться от возбуждения паразитных объемных колебаний и их влияния на основную программу.

Симметрирование ускоряющей системы для устранения влияния паразитных поперечных колебаний камеры на рабочую программу

В связи с тем что из-за высокой энергии ускоряемых протонов поперечные размеры дуанта оказались соизмеримыми с его продольными размерами, в резонансной системе синхроциклотрона наряду с продольными модами колебаний возникают полуволновые поперечные моды колебаний, частота которых попадает в рабочий диапазон. Попытки подавления поперечных колебаний дуанта путем тщательного симметрирования системы результата не дали. Был рассмотрен вариант подавления поперечных колебаний путем введения по оси симметрии дуанта, где имеет место пучность тока, продольного разреза плакировки дуанта, как это было сделано в ЦЕРН¹. Однако при разработке системы связи ВЧ-генератора с резонансной системой был найден другой эффективный способ подавления поперечных колебаний.

Влияние поперечных колебаний на основную программу сказывается двояким образом: во-первых, при близости частоты поперечных колебаний к частоте основной программы может происходить перекося в распределении напряжений в системе из-за наложения поперечного мода колебаний на основной; во-вторых, если $R_{0\omega}$ системы на частоте поперечных колебаний соизмеримо с $R_{0\omega}$ системы для основного мода колебаний, то при возникновении положительной обратной связи для поперечных колебаний может происходить перескок частоты основного генератора с основной программы на частоту поперечных колебаний. Из кривых рис. 5.27 видно, что частота поперечных колебаний в области углов $\alpha = 20-30^\circ$ близко подходит к частоте основной программы $f(\alpha)$. Было выяснено, что боковые регулируемые конденсаторы дуанта сдвигают ча-

¹ Beger H., Fiebig A. // Conf. on High-Energy Cycl. Improv. Williamsburg, Feb. 6-8, 1964. P. 3.

стоты поперечных колебаний и при минимальной величине их емкостей поперечные колебания имеют наибольшие частоты. Однако максимальное сближение кривых $f(\alpha)$ и $f_1^\perp(\alpha)$ при любой величине этих емкостей оставалось в пределах 0,3–0,5 МГц. В дальнейшем боковые конденсаторы были полностью удалены, и зависимость $f_1^\perp(\alpha)$ имела вид, показанный на рис. 5.27. Максимальное сближение частот поперечного и основного мода колебаний происходило в области $\alpha \approx 30^\circ$ и достигало величины 0,5 МГц.

Так как добротность системы на частоте основных и поперечных колебаний $Q \approx 500$, то их резонансные кривые не перекрывались и наложения поперечного мода колебаний на основной мод не происходило, поэтому никакого дополнительного симметрирования системы на частотах поперечного возбуждения не производилось.

Заметим, что в окончательном варианте устройство связи резонансной системы с блоком генераторных ламп было сделано симметричным относительно продольной оси системы. Симметричная конструкция обратной связи позволила значительно понизить R_{03} системы на частотах поперечных колебаний по сравнению с R_{03} системы на частотах основного мода, и появилась возможность симметрировать систему путем изменения напряжений, подводимых к резонансной системе через левый и правый фидеры прямой связи. При симметричной прямой и обратной связи R_{03} системы на частотах $f_1^\perp(\alpha)$ и $f_2^\perp(\alpha)$ было на порядок меньше R_{03} для основной частоты.

Симметрирование ускоряющей системы для устранения влияния паразитного колебания вариаторов f_3^B

На полностью собранной резонансной системе был обнаружен еще один паразитный резонанс вариаторов, который при измерениях, проводимых на изолированных от системы вариаторах, остался незамеченным. Частота этого паразитного резонанса ($f_3^B = 12,5$ МГц для левого вариатора и $f_3^B = 12,8$ МГц для правого) не зависела от угла α и уменьшалась с увеличением емкости полицилиндрических конденсаторов. Амплитуды напряжений на концах осей роторов каждого из вариаторов имеют противоположные фазы. Так и не выяснено, какими элементами вариаторов обусловлен этот паразитный резонанс. Так как полуширина этого резонанса ~ 1 МГц, то в низкочастотной части диапазона при приближении частоты основной программы к частоте f_3^B из-за перекрытия их резонансных кривых происходил значительный перекося напряжений по валу

ротора каждого из вариаторов. Напряжения на внутренних блоках полицилиндрических конденсаторов (со стороны промежуточного вала) были в 8–10 раз больше напряжений на наружных блоках. Чтобы резонанс f_3^B не возбуждался от основной программы, этот паразитный контур был отсимметрирован с помощью изменения величин емкостей полицилиндрических конденсаторов на наружных и внутренних блоках. С наружных блоков было снято по одному кольцу, что позволило выровнять напряжение на концах валов каждого из вариаторов в низкочастотной части диапазона.

Таким образом, в результате настройки ВЧ ускоряющей системы синхротрона и конструктивных изменений некоторых узлов вариатора были получены следующие результаты:

1) получен диапазон рабочих частот ускоряющей системы $f_{\max} = 30,3$ МГц, $f_{\min} = 13,23$ МГц путем уменьшения величины индуктивности L_2 и введения индуктивности L_3 ;

2) устранен разрыв в частотной программе на частоте объемных колебаний камеры $f^{\text{об.}} = 27$ МГц путем тщательного симметрирования системы относительно средней плоскости с помощью задних регулируемых плакировок;

3) устранены разрывы программы на частотах возбуждения вариатора $f_1^B = 25,5$ МГц и $f_2^B = 21$ МГц путем изготовления новых 36-градусных верхних и нижних «земляных» пакетов;

4) выяснено поведение поперечных типов колебаний, и устранено их влияние на рабочую программу путем симметричной связи резонансной системы с блоком генераторных ламп через два фидера прямой и обратной связи;

5) выяснено влияние асимметрии вариаторов на R_{03} всей системы;

6) проведено симметрирование паразитного контура вариатора на частоте $f_3^B = 12,5$ МГц за счет снятия одного кольца с наружных блоков полицилиндрических конденсаторов, и выяснен способ понижения резонансной частоты этого паразитного контура.

Таким образом, конструкция системы дуант – вариатор как эквивалентный LC резонансный контур обладала необходимой частотной характеристикой и частотным диапазоном, в котором при возбуждении ее от генератора возможно получение ускоряющего напряжения, необходимого для ускорения протонов до энергии 1 ГэВ.

5.6. Высокочастотный генератор синхроциклотрона ПИЯФ. Разработка системы связи генератора с ускоряющей системой

Одним из требований, предъявляемых к схеме генератора, является поддержание постоянства ускоряющего напряжения в диапазоне рабочих частот. Задача осложняется тем, что в дуантном контуре синхроциклотрона в любых точках, пригодных для подключения генератора, напряжение значительно изменяется по диапазону. Связь ВЧ-генератора с дуантным контуром, обеспечивающая примерное постоянство ускоряющего напряжения в рабочем диапазоне частот, трудно осуществить без применения узлов с переменными во времени параметрами.

В первоначальном проекте ВЧ-системы связь генератора с резонансной системой предполагалось осуществить с помощью вращающегося переменного конденсатора обратной связи, вращение которого было механически синхронизировано с вращением вариаторов частоты. Однако в связи со сложностью этой конструкции от нее пришлось отказаться.

Были предприняты попытки реализации нескольких вариантов связи с постоянными параметрами, не перестраиваемыми по частотному диапазону [5].

Схема высокочастотного генератора

Принципиальная схема ВЧ-генератора представлена на рис. 5.28. К аноду генератора через разделительный конденсатор $C_{рк} = 3\ 000$ пФ подсоединен фидер прямой связи. Земляное подсоединение фидера выполнено по всей ширине заземления сеток ламп. В разделительном конденсаторе в качестве диэлектрика использован полиэтилен толщиной 5 мм. Согласующая емкость анод – земля $C_1 = 2\ 000$ пФ – воздушный конденсатор с зазором 15 мм. К катоду (к восьми выводам ламп) через разделительные конденсаторы $C_{рк} = 2\ 000$ пФ подсоединен фидер обратной связи. Согласующая емкость катод – земля $C_2 = 2\ 000$ пФ. В качестве диэлектрика в конденсаторах $C_{рк}$ и C_2 применена фторопластовая пленка. Конденсаторы $C_{рк}$ и C_2 объединены в два блока. Такой блок уменьшил индуктивности подсоединения и позволил избавиться от ряда паразитных контуров, которые образовывались при применении типовых керамических и вакуумных конденсаторов.

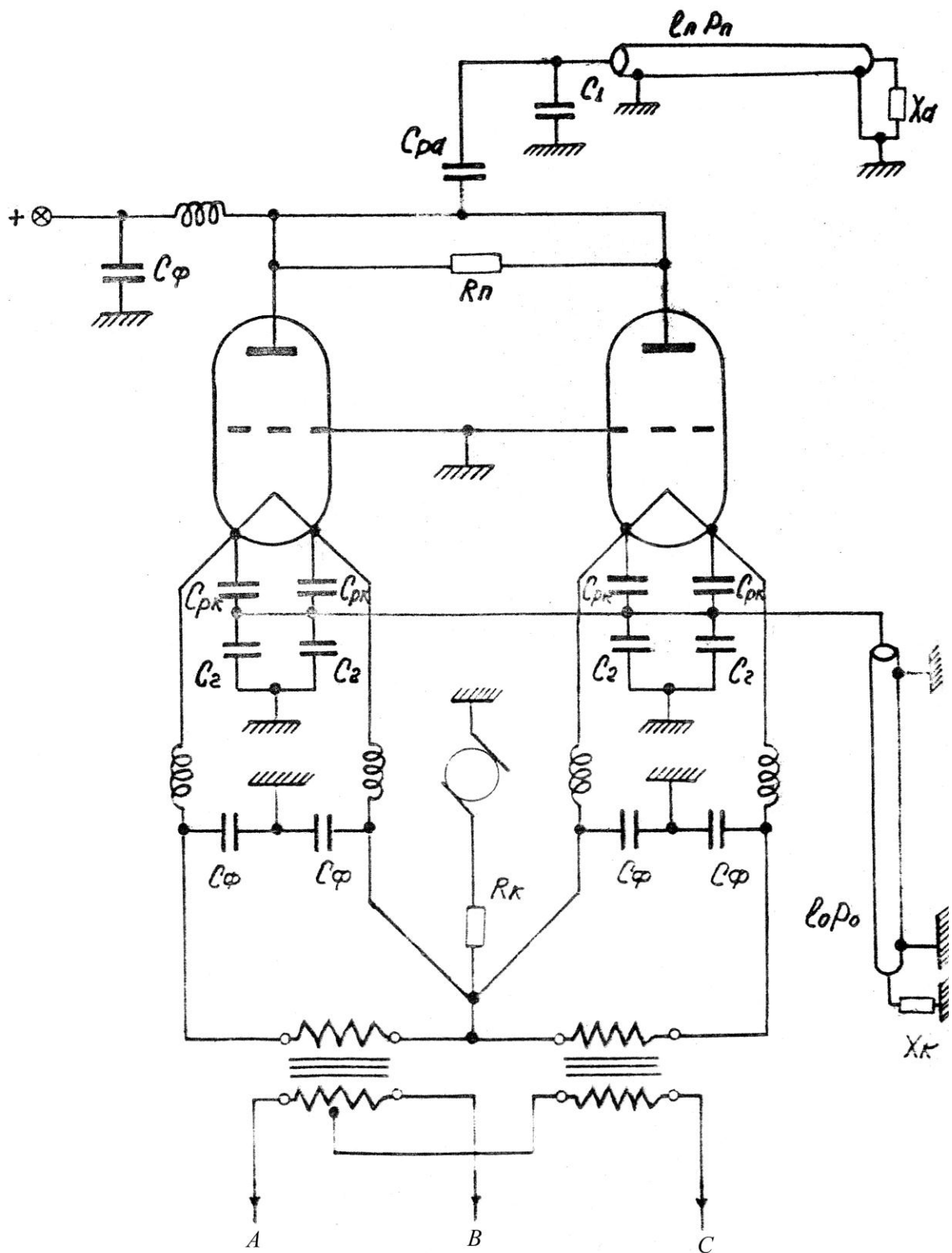


Рис. 5.28. ВЧ-генератор ускоряющей системы синхроциклотрона

Катодные и анодные части генератора разделены экранирующим листом, к которому подсоединены непосредственно сетки ламп и «земля» фидеров прямой и обратной связи. Для подавления пушпульных паразитных колебаний в ламповом блоке аноды ламп разделены силовыми сопротивлениями. Сеточное смещение на лампах образуется катодным

сопротивлением $R_k = 5 \text{ Ом}$, а для регулирования рабочей точки в катод генератора включена машина постоянного тока.

Для уменьшения 100 Гц модуляции ВЧ-напряжения за счет магнетронного эффекта накал запитан по схеме Скотта со сдвигом накальных напряжений ламп на 90° . Ламповый блок заключен в магнитный экран, т. к. работает в полях $\sim 300 \text{ Э}$. Генератор работает при анодном напряжении около 10 кВ и анодном токе порядка 20 А в каждой лампе.

Основные требования к генератору и системе его связи с ускоряющей системой синхроциклотрона

Мощность генератора должна быть достаточной для возбуждения необходимой величины ускоряющего напряжения. Если задать амплитуду ускоряющего напряжения $U_d = 15 \text{ кВ}$, то при $R_{эд} \approx 200 \text{ Ом}$ ($R_{эд}$ – эквивалентное сопротивление системы дуант – вариатор при резонансе, измеренное со стороны щели дуанта) необходим ламповый блок с отдаваемой мощностью

$$P_{\sim} = \frac{U_d^2}{2R_{эд}} \approx 500 \text{ кВт}.$$

Система связи должна обеспечить необходимый коэффициент трансформации ВЧ-напряжения от анодов генераторных ламп к ускоряющей щели, который для постоянства ускоряющего напряжения в течение цикла ускорения должен быть постоянным во всем рабочем диапазоне частот, т. е. $n = U_d / U_a = n_0 = \text{const}$. В связи с этим коэффициент трансформации напряжения n_{ϕ} по фидеру прямой связи от анодов ламп к месту подсоединения вариатора частоты должен удовлетворять соотношению

$$n_{\phi} = \frac{U_v}{U_a} = \frac{n_0}{n_d},$$

где $n_d = \frac{U_d}{U_v}$ – коэффициент трансформации и напряжения от места подсоединения вариатора к ускоряющей щели.

Для оптимального режима работы генераторных ламп необходимо, чтобы:

- величина эквивалентного активного сопротивления системы при резонансе $R_{эа}$ в месте ее подсоединения к анодам генераторных ламп равнялась паспортной величине оптимальной анодной нагрузки выбранных генераторных ламп;
- величина коэффициента обратной связи k от анодов генераторных ламп к катодам (при схеме с заземленной сеткой) была величиной

постоянной во всем рабочем диапазоне частот и соответствовала паспортным данным выбранных генераторных ламп:

$$K = n_{\phi} n_{\text{вос.}} n_{\text{ос.}},$$

где $n_{\text{вос.}}$ – коэффициент трансформации напряжения от места подключения вариатора к месту подключения фидера обратной связи, а $n_{\text{ос.}}$ – коэффициент трансформации напряжения вдоль фидера обратной связи от места его подсоединения к катодам генераторных ламп;

- сдвиг фаз напряжения между анодами и катодами генераторных ламп $\Delta\varphi$ во всем рабочем диапазоне частот был достаточно мал, чтобы не влиять на устойчивую работу генераторных лампового блока:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\phi} + \Delta\varphi_{\text{вос.}} + \Delta\varphi_{\text{ос.}},$$

где $\Delta\varphi_{\phi}$ – сдвиг фаз напряжения по фидеру прямой связи; $\Delta\varphi_{\text{вос.}}$ – сдвиг фаз напряжения между местом подсоединения вариатора и фидера обратной связи; $\Delta\varphi_{\text{ос.}}$ – сдвиг фаз напряжения по фидеру обратной связи. В связи с высокой добротностью системы можно считать, что $\Delta\varphi_{\text{вос.}} = 0$.

Необходимо отметить, что удовлетворить всем этим требованиям одновременно не представляется возможным, т. к. имеет место соотношение

$$n_0^2 = \frac{R_{\text{эд}}}{R_{\text{за}}},$$

которое при заданной величине активных потерь в системе $R_{\text{эд}}$ однозначно связывает величины $R_{\text{за}}$ и n_0 . Таким образом, величина n_0 в конечном итоге определяется паспортными данными генераторных ламп. Кроме того, из приведенного соотношения видно, что, т. к. величина активных потерь в системе $R_{\text{эд}}$ зависит от частоты, требование постоянства n_0 и $R_{\text{за}}$ во всем рабочем диапазоне частот также не может быть выполнено, и здесь следует искать компромиссное решение.

Кроме указанных выше основных требований система связи должна обеспечить возбуждение только основного типа продольных колебаний резонансной системы и исключить возможность возбуждения резонансной системы на поперечных, объемных или других типах паразитных колебаний. Конструкция ВЧ-генератора также должна исключить возможность возникновения паразитных колебаний на паразитных контурах самого блока.

В процессе наладки системы связи ускоряющей системы были испытаны несколько вариантов схемных решений.

Асимметричная система возбуждения высокочастотных колебаний с индуктивной обратной связью

Принципиальная схема этой системы приведена на рис. 5.29. Эта система связи подобна системе, примененной на синхроциклотроне в Беркли¹. Такая система связи обеспечивает возможность подавления поперечных колебаний, т. к. положительная обратная связь имеет место лишь для продольных типов колебаний дуанта, а для поперечных обратная связь является отрицательной.

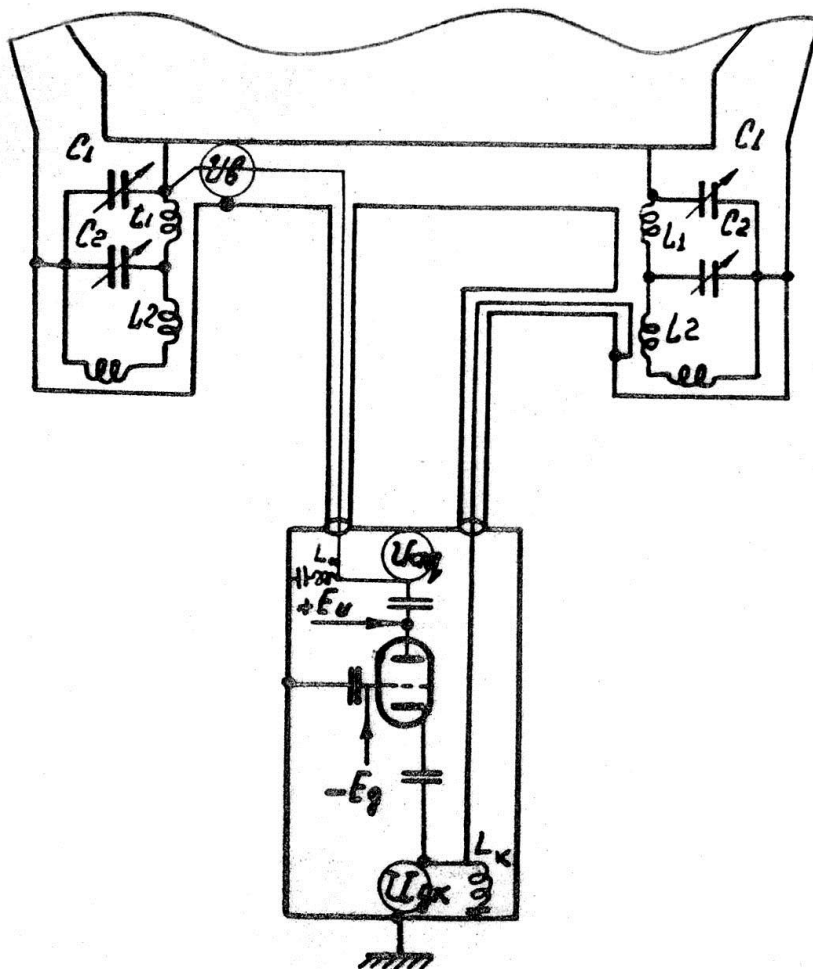


Рис. 5.29. Принципиальная схема асимметричной системы возбуждения ВЧ-колебаний с индуктивной обратной связью

После изменений в схеме связи колебания рабочего типа были возбуждены только на частотах 29–18,5 МГц. Срыв колебаний на низких частотах происходил из-за увеличения сдвига фаз между анодом и катодом. Сдвиг фаз обусловлен активной составляющей сопротивления участка сетка – катод ламп. В конструкции фидера обратной связи не удалось добиться увеличения коэффициента обратной связи без суще-

¹ Smith B. H. et al. Preprint UCRL 3779. 1957. 23 p.

ственных переделок. Конструктивно оказалось проще изготовить новый фидер с емкостным делителем.

Асимметричная система возбуждения высокочастотных колебаний с емкостным делителем в обратной связи

Принципиальная схема системы связи с емкостным делителем в обратной связи представлена на рис. 5.30.

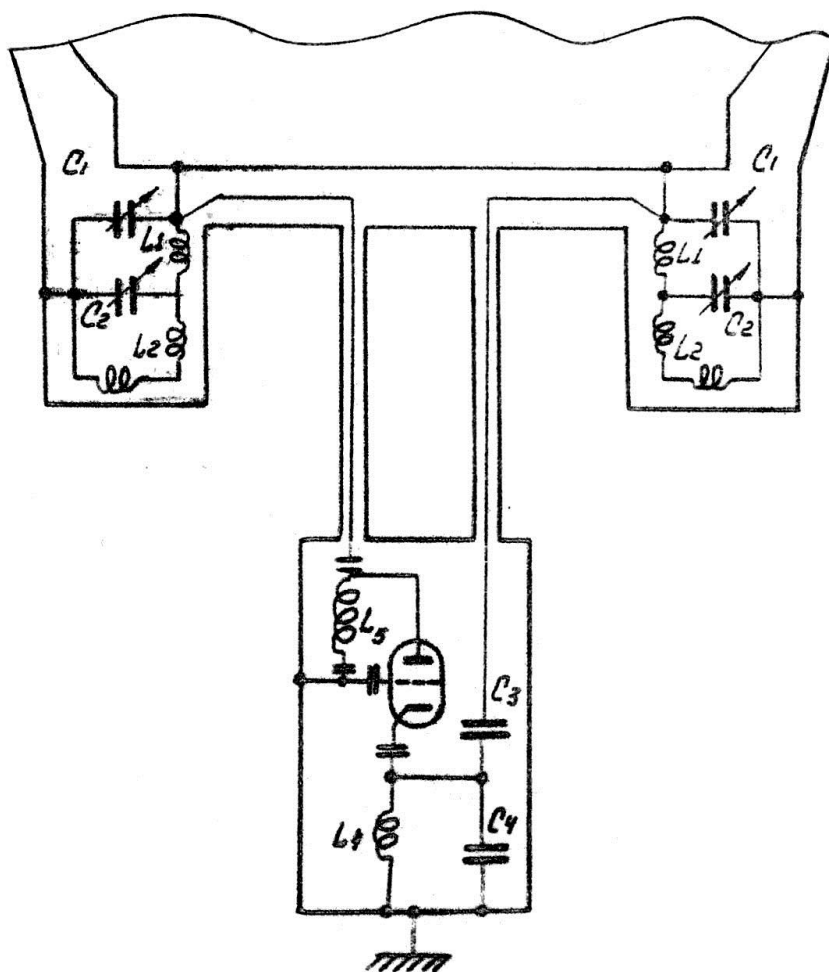


Рис. 5.30. Принципиальная схема асимметричной системы возбуждения ВЧ-колебаний с емкостным делителем в обратной связи

При включении ВЧ-генератора в режиме самовозбуждения удалось возбудить систему во всем диапазоне частот. Однако система оказалась чрезвычайно критичной к симметрированию вариаторов. Система, настроенная во всем диапазоне частот на атмосфере, при откачке камеры на низших частотах генерировала поперечный мод колебаний. Фазовый сдвиг между анодом и катодом зависел от симметрии вариаторов, и при некоторой асимметрии на низких частотах происходил перескок на поперечный тип колебаний.

Рассмотрение возможности использования внутренней обратной связи

При использовании симметричной прямой связи оказалось разумным рассмотреть возможность применения внутренней обратной связи, выполненной в виде емкостного делителя по схеме Колпитца (подобной той, что применялась на синхроциклотроне в ЦЕРН¹). Емкость анод – катод равнялась 200 пФ, емкость катод – земля – 1 500 пФ. Как и ожидалось, при такой схеме не наблюдалось перескоков на поперечный тип колебаний, были возбуждены колебания рабочего типа в диапазоне 30–14,5 МГц, после чего происходил срыв генерации на частоту 12,5 МГц. Было выяснено, что эта паразитная генерация обусловлена 1/4-волновым резонансом фидеров прямой связи. $R_{\text{за}}^{\Phi}$ этого типа колебаний очень высокое, порядка нескольких тысяч. Самовозбуждение происходит на частотах резонансной системы или на частоте фидерного резонанса в зависимости от условий самовозбуждения.

Таким образом, при использовании внутренней обратной связи обязательно встает вопрос о создании полосовых фильтров, перестраиваемых по частоте во всем рабочем диапазоне, что представляет известные трудности.

5.7. Получение протонного пучка с энергией 750 МэВ

2 ноября 1967 года при возбуждении ВЧ ускоряющей системы по схеме обратной связи с емкостным делителем (рис. 5.30) был получен пучок протонов с энергией 750 МэВ, т. к. частотный диапазон системы был 30–14,5 МГц.

Это событие стало важным этапом в работе Ускорительного отдела по запуску самого большого в мире синхроциклотрона. Руководитель работ профессор Д. Г. Алхазов в ночь с 1 на 2 ноября разбудил директора ФТИ академика В. М. Тучкевича и сообщил ему об успехе. Академик якобы ответил: «Ящик коньяка с меня» – и тут же уведомил о запуске синхроциклотрона руководство Академии наук. Несмотря на то что проектная энергия 1 ГэВ не была достигнута, наш успех широко отмечался в научном и общественном мире.

О запуске синхроциклотрона сообщили практически все газеты, в том числе и центральный печатный орган ЦК КПСС газета «Правда». На первой странице, под рубрикой «К Юбилею Великого Октября», была помещена статья о нашем синхроциклотроне с фотографиями руководителей запуска, профессора Д. Г. Алхазова и Н. К. Абросимова. Нелепые

¹ Krienen F. // NIM 5. 1959. No. 5. P. 280–299.

газетные заголовки сочинялись в редакциях и звучали так: «Снаряды атомной артиллерии – подарок к Великому Октябрю»¹, «Штурмующим атом (крупнейший синхроциклотрон – Октябрьский подарок ленинградским физикам)»², «Есть пучок»³, «Ленинградский синхроциклотрон»⁴ и др.

Нас поздравили ведущие коллективы и физики всей страны, в том числе президент АН СССР М. В. Келдыш. Вот как выглядела правительственная телеграмма в те далекие, некомпьютерные времена.

 ПРАВИТЕЛЬСТВЕННАЯ ТЕЛЕГРАММА			
МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ СССР			
ДЛЯ ЗАМЕТОК АДРЕСАТА:			
ПРИЕМ: 5 01 го ч. м. Бланк № 385 Принял:	ПЕРЕДАЧА: го ч. м. № связи Передал:	=ПРАВИТЕЛЬСТВЕННАЯ Адрес: ЛЕНИНГРАД К-21 ФТИ ПРОФЕССОРУ В М ТУЧКЕВИЧУ Г А ГУКАСОВУ Г Е КОГАРОВУ=	
Из МОСКВЫ 71/001 51 5 1945: сл. го ч. м.			
=ПРЕЗИДИУМ АКАДЕМИИ НАУК СССР ПОЗДРАВЛЯЕТ КОЛЛЕКТИВ ЛЕНИНГРАДСКОГО ФИЗИКО ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА С БОЛЬШИМ НАУЧНЫМ ДОСТИЖЕНИЕМ ФИЗИЧЕСКИМ ПУСКОМ СИНХРОЦИКЛОТРОНА ЖЕЛАЕМ НОВЫХ УСПЕХОВ РАБОТЕ=ПРЕЗИДЕНТ АКАДЕМИИ НАУК СССР АКАДЕМИК КЕЛДЫШ ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ПРЕЗИДИУМА АКАДЕМИИ НАУК СССР АКАДЕМИК ПЕЙВЕ 4291-			

Любопытно отметить, что при первоначальном запуске синхроциклотрона инженеры Ускорительного отдела определяли направление вектора магнитного поля в электромагните ускорителя при помощи школьного компаса и ошиблись.

После получения первого протонного пучка Николай Константинович сказал: «Если бы мы вспомнили, что на Северном полюсе Земли находится Южный магнитный полюс, мы получили бы протоны на несколько часов раньше».

¹ Советская Россия. 1967. 5 ноября.

² Вечерний Ленинград. 1967. 3 ноября.

³ Правда. 1967. 12 ноября.

⁴ Ленинградская правда. 1967. 3 ноября.

5.8. Получение протонного пучка с энергией 1 ГэВ

Выше было отмечено, что при запуске синхроциклотрона и получении протонного пучка не была достигнута проектная энергия протонов 1 ГэВ.

Проведенные исследования показали: несмотря на то что параметры и частотный диапазон ВЧ ускоряющей системы соответствуют энергии 1 ГэВ, не удается получить устойчивую автогенерацию во всем диапазоне частот, что ограничивает энергию ускоренных протонов в 750 МэВ. Напомним, что основная проблема была обусловлена очень большим диапазоном и необходимым коэффициентом перестройки системы дуант – вариатор, при которой трудно осуществить связь ускоряющей системы с генератором без перестройки элементов связи.

Наличие больших потерь в дуантной системе и сеточной цепи генераторной лампы вызывает появление значительного фазового сдвига коэффициента обратной связи, для уменьшения которого волновое сопротивление трансформирующих линий должно быть выбрано малым; одновременно должны быть увеличены емкости анод – сетка и анод – катод.

Эти трудности были преодолены путем разработки симметричной системы связи генератора с дуантной системой.

Симметричная система возбуждения высокочастотных колебаний

Симметричная система прямой связи

Для получения постоянного по диапазону напряжения на ускоряющей щели была рассчитана и изготовлена новая симметричная прямая связь. Связь ВЧ-генератора с ускоряющей системой осуществлялась через два фидера, подключенных симметрично к правому и левому вариаторам в местах их подключения к дуанту (рис. 5.31). Симметричное относительно продольной оси подключение связи позволило уменьшить эквивалентное сопротивление для поперечного типа колебаний $R_{эа}^{\perp} = 0$ (при полной симметрии $R_{эа}^{\perp} = 0$) по сравнению с эквивалентным сопротивлением рабочего типа колебаний. Фидеры на генераторном конце нагружены на согласующую емкость C_a .

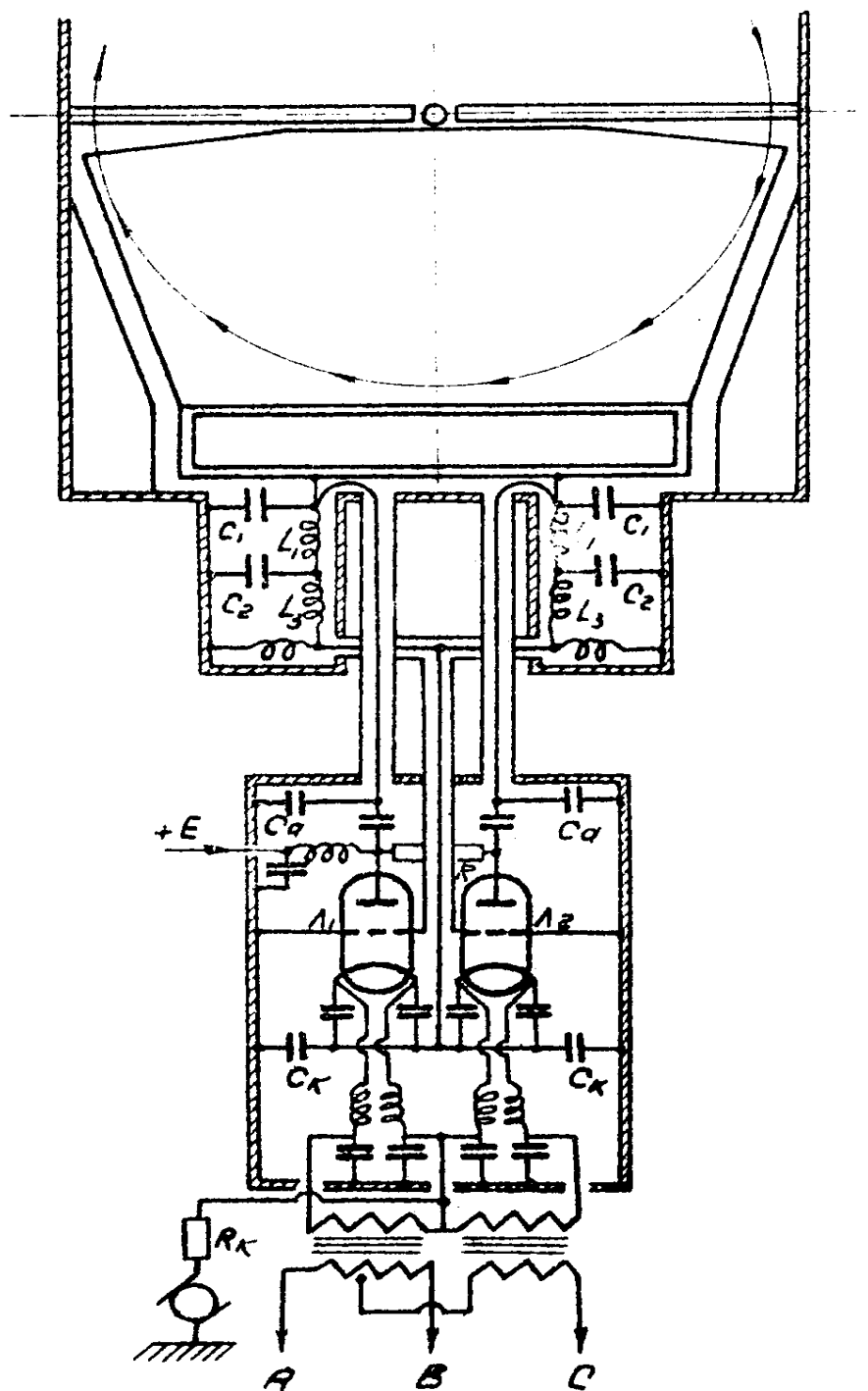


Рис. 5.31. Схема симметричной прямой и обратной связи ВЧ-генератора с резонансной системой ускорителя

Параметры фидеров – длина и волновое сопротивление, а также места их подсоединения к резонансной системе – были подобраны экспериментально после модельных измерений.

Выполнение прямой связи в виде двух фидеров с $\rho \sim 50$ Ом каждый позволило уменьшить фазовые сдвиги на прямой связи, и максимальный фазовый сдвиг на фидере прямой связи не превышает 10 % (при 13 МГц).

Симметричная система обратной связи

Симметричное подключение фидеров обратной связи исключает возможность генерирования ВЧ ускоряющей системы на частотах поперечного мода колебаний (рис. 5.31).

Для исключения возможности генерирования системы на «второй частотной программе» (рис. 5.27) были экспериментально выбраны точки подсоединения фидеров обратной связи к элементам вариаторов, где «вторая частотная программа» слабо выражена и при подключении обратной связи к этим точкам не возбуждалась.

Конструктивно обратная связь была выполнена в виде Т-образного фидера, подключенного к части индуктивности L_3 , а ее генераторный конец, подключенный к катодам ламп, согласован емкостью C_K .

Фидер имел длину ~ 3 м и волновое сопротивление $\rho = 35$ Ом. Фазовый сдвиг по фидеру, обусловленный активными потерями в цепи сетки генераторных ламп, не превышал $12\text{--}15^\circ$.

Предложенная система симметричной прямой и обратной связи не имела аналогов, и на ее конструкцию было получено авторское свидетельство на изобретение [6].

При симметричной конструкции прямой и обратной связи по схеме рис. 5.31 удалось получить необходимый рабочий диапазон частот с мало изменяющимся по частоте напряжением на ускоряющей щели. На такой системе в сентябре 1968 года был получен пучок протонов с проектной энергией 1 ГэВ и током $\sim 0,3$ мкА.

В 1970 году, после монтажа и наладки выводной системы пучка [7–10], синхроциклотрон был сдан в постоянную эксплуатацию для проведения программы физических экспериментов на его пучках.

В 1973 году Николай Николаевич Чернов, который вложил много сил в создание синхроциклотрона, доложил на Международной конференции в Сан-Франциско о запуске ускорителя¹. А ведь еще в 1965 году, после инспекционного осведомления о состоянии работ по запуску синхроциклотрона, В. П. Джелепов сказал: «Эта груда железа никогда не сможет работать», а Г. Н. Флеров добавил: «Давайте, пока не поздно, переделаем его в циклотрон». Выслушав высказывания академиков, Николай Константинович заметил: «Физики, как известно, шутят». И мы, все же стараясь выполнить пожелания Флерова, переделали в циклотрон Ц-80 не сам синхроциклотрон, а его модель СП-70.

¹ Chernov N. The Status Report of LNPI 1 GeV Synchrocyclotron // Particle Accelerator Conf. San-Francisco, USA. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1973. V. NS-20. P. 263–265.

Публикации

1. Алхазов Д. Г., Абросимов Н. К., Громадюк Б. А., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Чернов Н. Н., Середенко Е. В., Хальчицкий Е. П. Измерение радиочастотных параметров дуанта – камеры высокочастотной системы синхроциклотрона ФТИ АН СССР // Отчет ФТИ. № 47. Л., 1969. 14 с.
2. Громадюк Б. А., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Лавров В. В., Михеев Г. Ф. Методика измерения параметров высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ФТИ на 1 ГэВ // Отчет ФТИ. № 48. Л., 1969. 20 с.
3. Алхазов Д. Г., Абросимов Н. К., Громадюк Б. А., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Чернов Н. Н. Измерение радиочастотных параметров вариаторов частоты синхроциклотрона на 1 ГэВ // Отчет ФТИ. № 49. Л., 1969. 44 с.
4. Алхазов Д. Г., Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Чернов Н. Н., Середенко Е. В. Настройка резонансной ускоряющей системы синхроциклотрона ФТИ на 1 ГэВ // Отчет ФТИ. № 50. Л., 1969. 42 с.
5. Алхазов Д. Г., Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Чернов Н. Н., Середенко Е. В. Возбуждение высокочастотных колебаний в резонансной системе синхроциклотрона на 1 ГэВ // Отчет ФТИ. № 51. Л., 1969. 40 с.
6. Устройство связи генераторной лампы с резонансной системой синхроциклотрона: а. с. № 270131 с приоритетом от 28.04.1969 / Н. К. Абросимов, С. П. Дмитриев, Г. Ф. Михеев, А. Ф. Куликов, Е. В. Середенко, Н. Н. Чернов. Бюл. № 16, 1970.
7. Абросимов Н. К., Волченков В. А., Елисеев В. А., Рябов Г. А., Чернов Н. Н. Эффективный вывод протонного пучка синхроциклотрона на 1 ГэВ ФТИ СССР // ЖТФ. 1970. Т. 40. С. 2593–2596.
8. Абросимов Н. К., Волченков В. А., Елисеев В. А., Рябов Г. А., Чернов Н. Н. Вывод протонного пучка синхроциклотрона ФТИ им. А. Ф. Иоффе на энергию протонов 1 ГэВ // Тр. II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1972. Т. 2. С. 182–184.
9. Абросимов Н. К., Рябов Г. А. Эффективность регенеративного вывода пучка из синхроциклотрона // Тр. IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1975. Т. 1. С. 250–253.
10. Abrossimov N. K., Eliseev V. A., Volchenkov V. A., Riabov G. A., Chernov N. N. A 30 % Beam Extraction on the 1 GeV Synchrocyclotron at Gatchina // NIM. 1975. V. 126. P. 221–230.

Глава 6

Модернизация высокочастотной ускоряющей системы и других радиотехнических систем синхроциклотрона ПИЯФ

Покажите вы русскому школьнику карту звездного неба,
о которой он до тех пор не имел никакого понятия,
и он завтра же возвратит вам эту карту исправленную.

*Ф. М. Достоевский. Братья Карамазовы.
(Любимый афоризм Н. К. Абросимова)*

6.1. Цели и задачи модернизации

Как уже отмечалось, запуск синхроциклотрона происходил в сжатые сроки, поэтому многие элементы ускоряющей системы были сделаны в наладочном варианте и не могли обеспечить достаточной надежности при постоянной эксплуатации синхроциклотрона. Возникали новые конструктивные решения.

После запуска ускорителя и одновременно с выполнением обширной физической программы исследований на пучках синхроциклотрона ~ 6 000 часов в год проводилась поэтапная модернизация ВЧ-системы синхроциклотрона, направленная на повышение интенсивности ускоряемого пучка, а также на повышение надежности и стабильности работы ускорителя.

В результате такой модернизации были переконструированы практически все составные части ВЧ ускоряющей системы, заново спроектирован и изготовлен в ПИЯФ ряд новых узлов ускоряющей системы, разработаны и введены в эксплуатацию принципиально новые устройства и блоки. Оригинальность некоторых из этих нововведений подтверждена авторскими свидетельствами на изобретения.

Отметим, что после запуска ускорителя модернизация ВЧ ускоряющей системы и ввод в работу новых устройств проводились без остано-

ки ускорителя на физический эксперимент. Все необходимые работы проводились в периоды профилактического обслуживания ускорителя.

Конструирование и ввод в эксплуатацию новых разработок проводились сотрудниками Ускорительного отдела, главным образом инженерами и механиками Радиотехнической службы отдела.

Остановимся подробнее на программе модернизации ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона.

6.2. Конструктивные изменения, внесенные в систему дуант – камера

Перечислим основные изменения, внесенные в конструкцию дуантной системы в процессе ее наладки и запуска синхроциклотрона.

- Ликвидирована антидуантная рамка, в результате чего ВЧ ускоряющее поле простирается от щели дуанта на значительное расстояние ($\sim 0,5$ м) и набор энергии при ускорении протонов отличается от «щелевого». (Причина демонтажа антидуантной рамки не ясна.)
- Демонтированы подвижные панели «земляной» плакировки камеры в ее центральной части. Симметрирование системы для ликвидации ее возбуждения на частоте объемных колебаний осуществляется только подвижными панелями, находящимися в хвостовой части дуанта.
- Полностью изменена конструкция и принцип работы ионного источника. В связи с этим демонтированы трубы-штоки, внутри которых проходили магистрали электрического и газового питания к ионному источнику. Эти две трубы-штоки располагались параллельно сверху и снизу щели дуанта и крепились к полюсам электромагнита. Трубы нарушали продольную симметрию дуантной системы из-за разной дополнительной емкостной нагрузки дуанта справа и слева от его продольной оси. Подвод напряжения питания ионного источника осуществлен по гибким кабелям типа РК, прикрепленным к полюсам магнита вдоль его продольной оси (подробнее см. в главе 7, п. 7.2).
- На радиусе $\sim 1,2$ м смонтирована подвижная мишень («флажок»), ограничивающая апертуру камеры для вертикальных Z-колебаний ускоряемых протонов.
- Ликвидированы боковые регулировочные конденсаторы, расположенные справа и слева от дуанта и предназначенные для симметрирования системы относительно ее продольной оси. Такая дополнительная емкостная нагрузка дуанта затрудняла получение необходимого частотного диапазона ускоряющей системы, поэтому вместо регулировочных конденсаторов были смонтированы

ВЧ-датчики для контроля симметрии ускоряющего напряжения вдоль щели дуанта. Сигналы с этих датчиков в виде огибающей ВЧ ускоряющего напряжения «лево – право» для контроля выведены на пульт синхроциклотрона.

- Введены емкостные триммерные конденсаторы в хвостовой части дуанта для регулировки максимальной частоты ВЧ ускоряющей системы и изменения производной $dt/d\alpha$ в диапазоне захвата протонов в режим ускорения (подробнее см. в главе 7, п. 7.3).
- Изменены номиналы блокировочных емкостей и число витков в индуктивных дросселях защиты опоры, водяных трубках и т. п. для исключения их паразитного возбуждения на частотах рабочего диапазона ВЧ ускоряющей системы.
- В вакуумной камере на радиусе ~ 3 м смонтирован С-электрод для системы растяжки и однооборотного сброса протонного пучка на мишень ГНЕЙС (подробнее см. в главе 7, п. 7.1).
- Перед С-электродом смонтированы две подвижные мишени для спектрометра ГНЕЙС: ниже медианной плоскости находится свинцовая нейтронообразующая мишень, а выше – полиэтиленовая мишень для преобразования энергетического спектра нейтронов. К вакуумной камере примыкают четыре нейтроноводные трубы, отделенные от вакуумного объема камеры тонкой фольгой (подробнее см. в главе 2, п. 2.3).
- Отметим также, что внутри камеры смонтирована выводная система, состоящая из нескольких подвижных регулируемых частей достаточно сложной конструкции [1–4], и демонтирована система крепления подвижных мезонных мишеней внутри камеры в связи с переходом на наружную мезонообразующую мишень.

6.3. Новая конструкция вариаторов частоты

В процессе доводки вариаторов выяснилось, что некоторые из их параметров не оптимальны, а конструктивные элементы, изготовленные в наладочном варианте, не могут обеспечить их надежной эксплуатации. Поэтому с учетом выявленных недостатков и с целью улучшения эксплуатационных характеристик были сконструированы и изготовлены в мастерских ПИЯФ новые модернизированные вариаторы частоты [5].

Цели модернизации:

- увеличение надежности эксплуатации;
- повышение пробивного напряжения;
- улучшение теплового режима;
- улучшение защиты узла подшипников;
- исправление частотной программы.

Конструктивные особенности вариаторов частоты

Собственно вариаторы частоты ускоряющей системы синхроциклотрона состоят из двух идентичных конструкций, соединенных между собой соединительным валом для совместной работы. Каждая из этих конструкций (в дальнейшем – вариатор) подключена к хвостовой части дуанта, при этом ширина подключения составляет $1/8$ часть ширины хвостовой части дуанта и равна 150 см. Расстояние между вариаторами – 160 см.

Общий вид одного из вариаторов представлен на рис. 6.1. (Ротор вариатора демонтирован, выдвинут из зазоров статорных пакетов и размещен на козлах перед кожухом вариатора.)

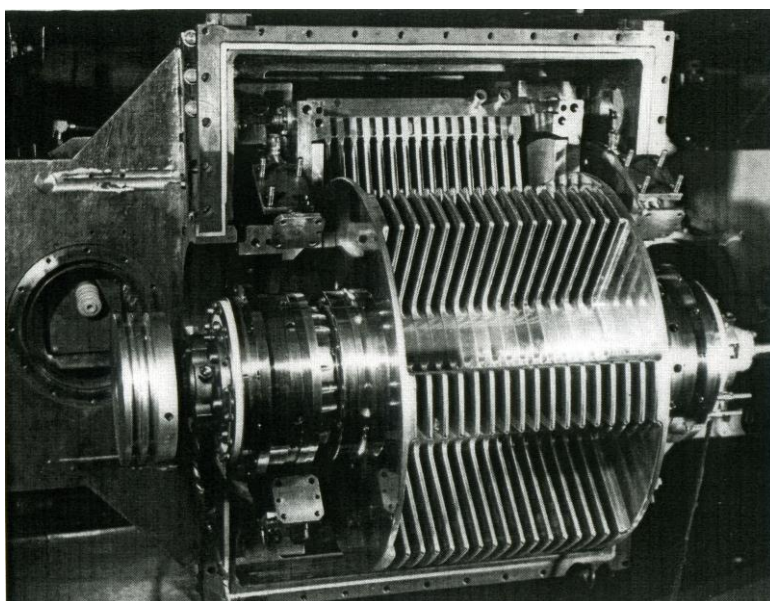


Рис. 6.1. Вариатор частоты (правый)

На рис. 6.2 приведена конструкция нового вариатора.

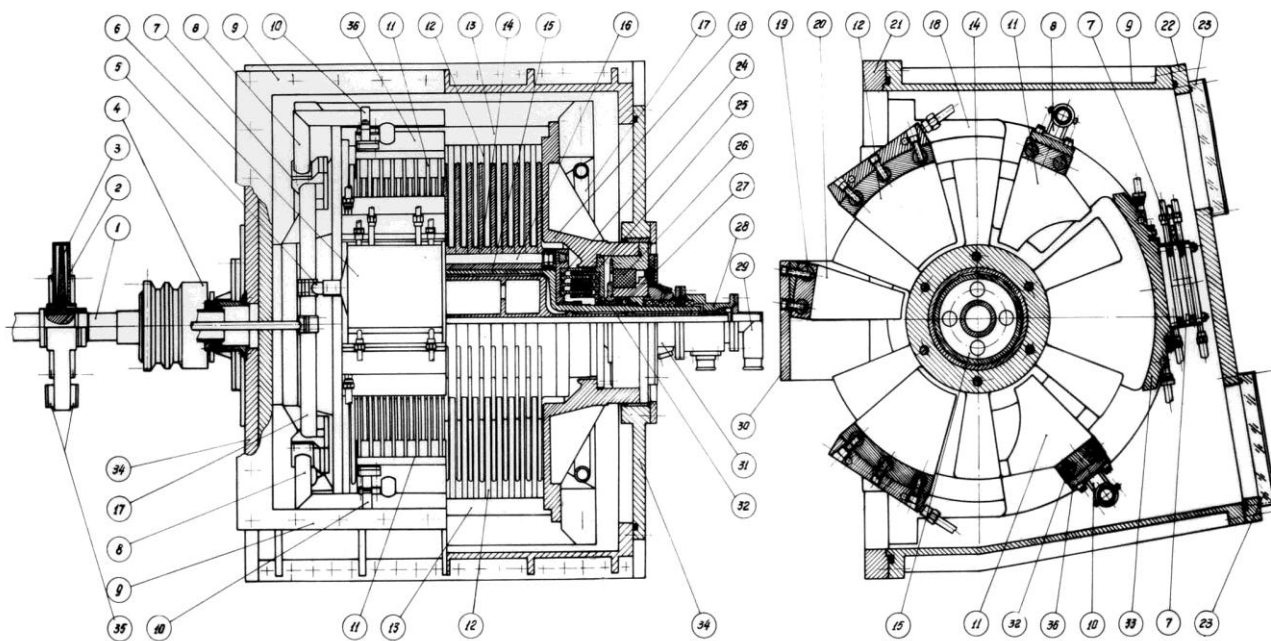


Рис. 6.2. Конструкция нового вариатора частоты синхроциклотрона ПИЯФ:

1 – соединительный вал между правым и левым вариаторами; 2 – кожух диска для угловых датчиков; 3 – диск датчиков углового поворота ротора вариатора; 4 – шкив для ременного привода вращения вариаторов электромотором; 5 – крепление блокировочных конденсаторов к индуктивным дугам; 6 – блокировочный конденсатор (емкость C_6 по схеме рис. 5.18); 7 – крепление индуктивных пакетов к индуктивным дугам; 8 – П-образные стойки крепления индуктивных пакетов (индуктивность L_3 по схеме рис. 5.19); 9 – кожух вариатора; 10 – подвижные хомуты крепления индуктивных пакетов к П-образным стойкам (обеспечивают регулировку индуктивности L_3 – по схеме рис. 5.19); 11 – верхний и нижний индуктивные пакеты (емкость C_2 по схеме рис. 5.19); 12 – пластины верхнего и нижнего «земляных» (статорных) пакетов; 13 – основания для крепления пластин верхнего и нижнего «земляных» пакетов; 14 – пластины ротора вариатора; 15 – вал ротора вариатора; 16 – стяжка роторных пластин; 17 – индуктивные кольца (индуктивности L_1 и L_2 по схеме рис. 5.19); 18 – несущий корпус вариатора; 19 – основания для крепления пластин дуантного пакета; 20 – дуантный пакет (емкость C_1 по схеме рис. 5.19); 21 – стенка окна вакуумной камеры для сочленения с кожухом вариатора; 22 – съемная стенка кожуха вариатора; 23 – крышка окна в стенке кожуха; 24 – роторная часть полицилиндрических конденсаторов; 25 – статорная часть полицилиндрических конденсаторов; 26 – вакуумное уплотнение; 27 – маслоуплотнение; 28 – вакуумное уплотнение вала; 29 – муфта водораспределения; 30 – задняя стенка дуанта; 31 – узел подшипника с вакуумным уплотнением; 32 – статорные кольца полицилиндрических конденсаторов; 33 – основание заднего «земляного» пакета; 34 – боковая стенка кожуха вариатора; 35 – фотодатчики угла поворота ротора

Ротор вариатора частоты

Ротор вариатора (14, рис. 6.2) представляет собой пакет из семнадцати 6-лопастных дисков, напрессованных на вал. Угловая ширина лопаток – 18° , толщина – 10 мм. Максимальный радиус лопаток – 400 мм. Охлаждение лопаток происходит только через тепловой контакт между лопатками и валом.

Вал ротора представляет собой сварной пустотелый цилиндр диаметром ~ 500 мм с осью, опирающийся на подшипники. Система полостей внутри вала, которая видна на рис. 6.2, предназначена для циркуляции по ней дистиллированной воды, обеспечивая съём тепловых потерь мощности с вариатора, которая достигает в эксплуатационном режиме ускорителя величины ~ 150 кВт. Вход и выход воды находятся с наружных сторон вариатора.

Подшипниковый узел вариатора частоты

Чертеж подшипникового узла приведен на рис. 6.3. Подшипниковый узел вариатора представляет собой сложную конструкцию, защищенную авторским свидетельством на изобретение. Сложность конструкции обусловлена функциональными особенностями подшипникового узла.

Подшипниковый узел обеспечивает вращение ротора, его изоляцию от «земли», защищает шарикоподшипники от электрокоррозии, т. к. по ним протекают значительные ВЧ-токи, обеспечивает вакуумное уплотнение. Узел имеет возможность осевой юстировки ротора относительно статора, смазка подшипников не должна влиять на ухудшение вакуума внутри вариатора.

Ротор вращается в двух подшипниках (31, рис. 6.2), расположенных на его концах. Подшипник, находящийся со стороны ввода воды, является опорным и обеспечивает осевое положение ротора относительно статорных (12) и дуантного (20) пакетов. Подшипник, находящийся со стороны шкива (4), – скользящий, что обеспечивает осевое смещение ротора при его нагреве. Оба подшипника находятся в вакуумном объеме и смазываются маслом с низкой упругостью паров. Для предотвращения попадания масла в полицилиндрический конденсатор каждый подшипник отделен от вакуумного объема сальниковыми узлами, состоящими из двух армированных манжет. Подшипники и сальниковые узлы закрепляются в опорах, изготовленных из конструктивной стали. Каждая опора разделена с помощью фарфоровых изоляторов на две части для отделения ротора от «земли». С наружной стороны опор находятся манжетные узлы (31) с вакуумным уплотнением по валу ротора, отделяющие атмосферу от вакуумного объема вариатора. В каждом из манжетных узлов установлено по четыре резиновых манжета, разделенных на две пары.

Корпус манжетного узла изготовлен из латуни и хромирован; для заливки масла в подшипник в его верхней части имеется отверстие, непосредственно соединяющееся с вакуумным объемом подшипника. После заливки масла это отверстие вакуумно уплотняется. Опоры подшипника и манжетного узла крепятся в «посадочные места» корпуса вариатора (18).

Для балансировки ротора имеются специальные балансировочные грузики, расположенные в пазах основания роторных полицилиндрических конденсаторов (24).

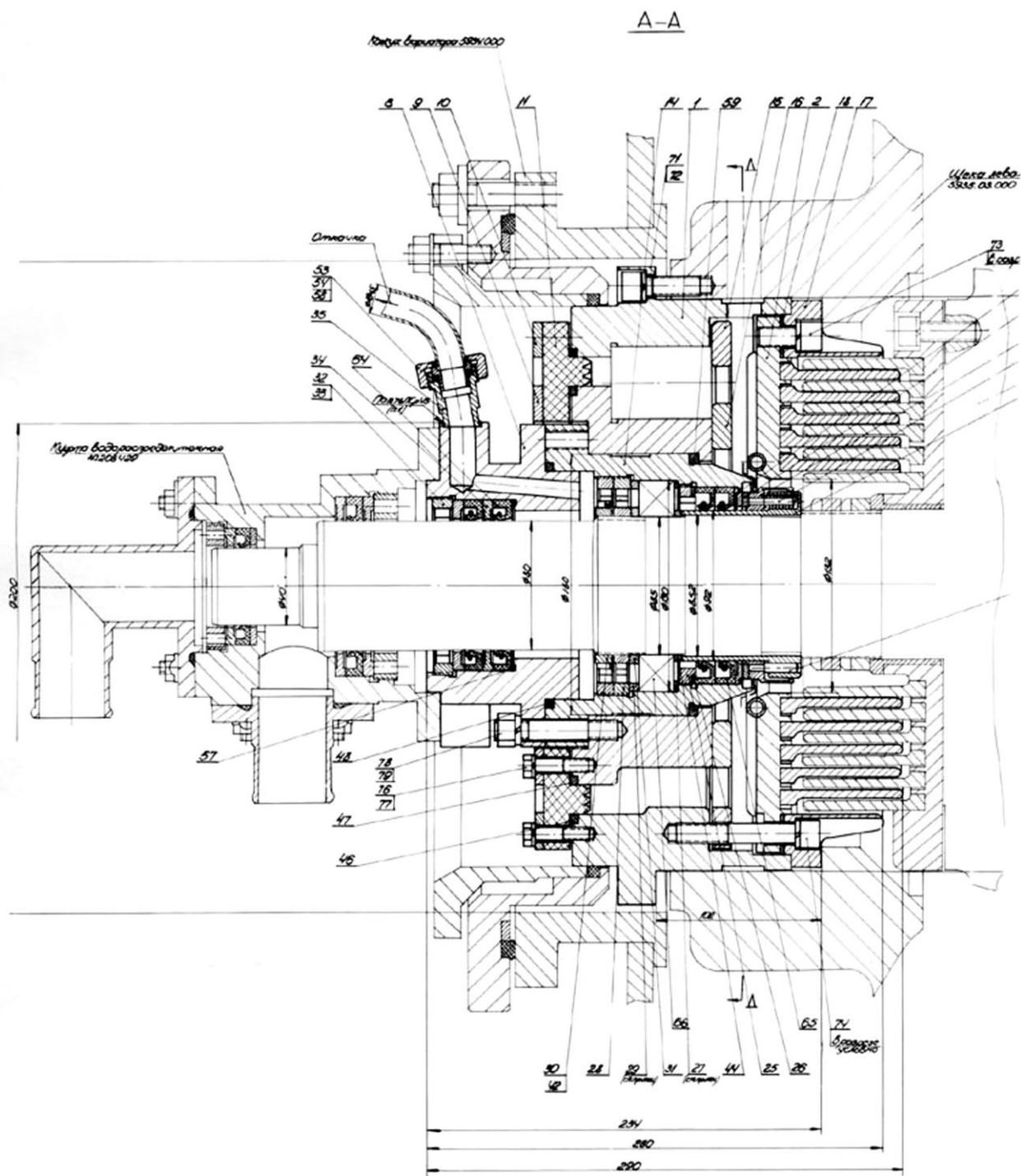


Рис. 6.3. Подшипниковый узел наружного конца левого вариатора

Соединительный вал вариаторов частоты

На внутреннем конце вала ротора каждого из вариаторов насажен шкив (4, рис. 6.2) привода вариатора, изготовленный из немагнитной стали. Шкив состоит из двух частей, разделенных при помощи фарфоровых изоляторов. На наружной части шкива имеются две клиновидные канавки для ремней, передающих вращение от двигателя. Оба вала соединены друг с другом при помощи промежуточного вала (1) со специальной диафрагмой. Эта диафрагма позволяет компенсировать несоосность между вариаторами и изменять их положение относительно друг друга по углу.

В средней части соединительного вала находится задающий диск датчика импульсов начала и конца модуляционного цикла (3). Диск закрыт кожухом (2) с прикрепленными к нему двумя медными коробками, в которых расположены фотодатчики угла поворота ротора вариатора (35). Кожух закреплен на отсеке вакуумной камеры.

Дуантный пакет вариатора частоты

Пластины ротора входят в зазоры статорных пакетов, образуя систему переменных емкостных конденсаторов. Непосредственно к дуанту прикреплен дуантный пакет, чертеж и фотография которого приведены на рис. 6.4а, б.

Дуантный пакет (20, рис. 6.2) вариатора набран из шестнадцати штук 18-градусных пластин толщиной 6 мм, стянутых двумя стальными шпильками через медные прокладки. Основание дуантного пакета (19) через регулировочные прокладки крепится к дуантной доске. Отходящие от дуантного пакета сверху и снизу медные плакировки осуществляют электрический контакт между пакетом и дуантом. Зазор между дуантными пластинами и пластинами ротора вариатора составляют величину $7 (\pm 0,1)$ мм.

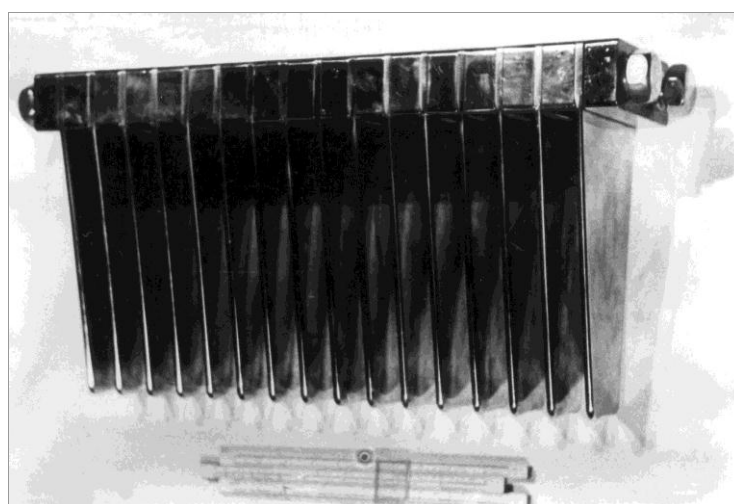
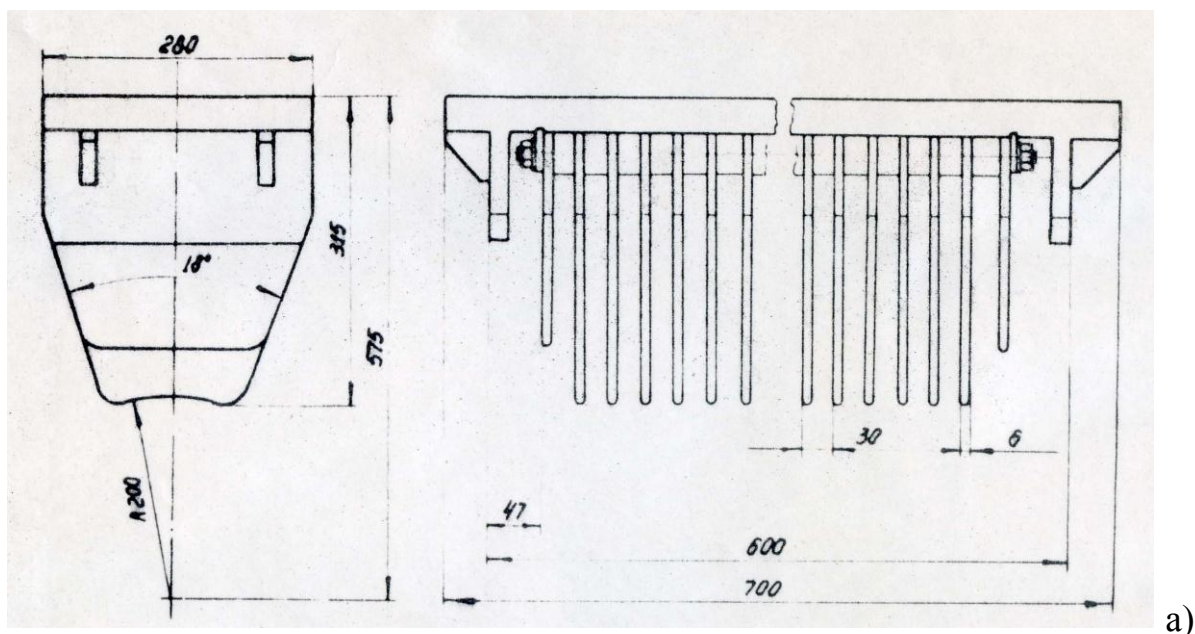


Рис. 6.4. Конструкция дуантного пакета:
 а) чертеж до модернизации вариатора;
 б) фотография после модернизации вариатора

Индуктивные пакеты вариатора частоты

Как было показано выше, согласно принципиальной схеме вариатора (рис. 5.15) индуктивные пакеты (11, рис. 6.2) расположены по углу на расстоянии $\sim 110^\circ$ от дуантного пакета. У каждого из вариаторов имеется по два индуктивных пакета – верхний и нижний. Общий вид и геометрия индуктивных пакетов приведены на рис. 6.5.

Каждый из индуктивных пакетов набран из шестнадцати 36-градусных пластин определенного профиля толщиной 6 мм, стянутых двумя шпильками через медные прокладки. Основания индуктивных пакетов имеют каналы для охлаждающей воды.

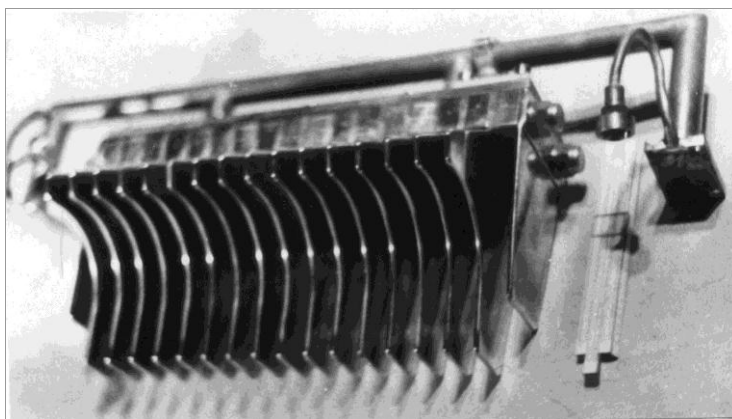


Рис. 6.5. Индуктивные пакеты (после модернизации вариатора)

Индуктивные кольца вариатора частоты

Индуктивные пакеты крепятся к дуанту при помощи колец (17, рис. 6.2), функциональное назначение которых образовывать индуктивное сопротивление между емкостными элементами вариатора (индуктивности L_1 , L_2 по схеме рис. 5.19). В каждом из вариаторов находится по два таких кольца. Фотография одного из них приведена на рис. 6.6.

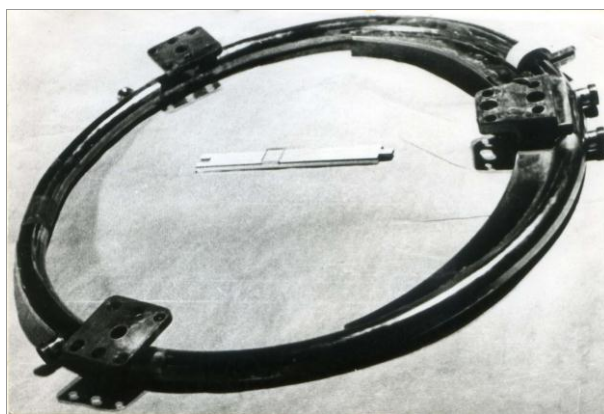


Рис. 6.6. Одно из четырех индуктивных колец

Индуктивные кольца имеют диаметр 800 мм и выполнены из нержавеющей трубы диаметром 40 мм. С одной стороны кольца крепятся к основанию дуантного пакета (19), а с противоположной стороны заземлены через специальные крепления (5) и блокировочный конденсатор (6) по высокой частоте. Со стороны крепления к основанию дуантного пакета для обеспечения жесткости кольца имеются вваренные сегменты, которые хорошо видны на рис. 6.6. К кольцам, на 50 мм ниже крепления к основанию дуантного пакета, при помощи хомутов крепятся фидеры прямой связи, а со стороны крепления шунтов блокировочных конденсаторов – фидеры обратной связи.

П-образные индуктивные стойки для крепления индуктивных пакетов вариатора частоты

Индуктивные кольца имеют площадки для крепления П-образных стоек индуктивных пакетов, играющих роль индуктивности L_3 (рис. 5.19). П-образные стойки имеют регулировочные элементы (10, рис. 6.2),двигающиеся по основанию индуктивного пакета влево и вправо, тем самым изменяя величину индуктивности L_3 . Конструкция П-образных стоек для крепления индуктивных пакетов вариатора приведена на рис. 6.7.

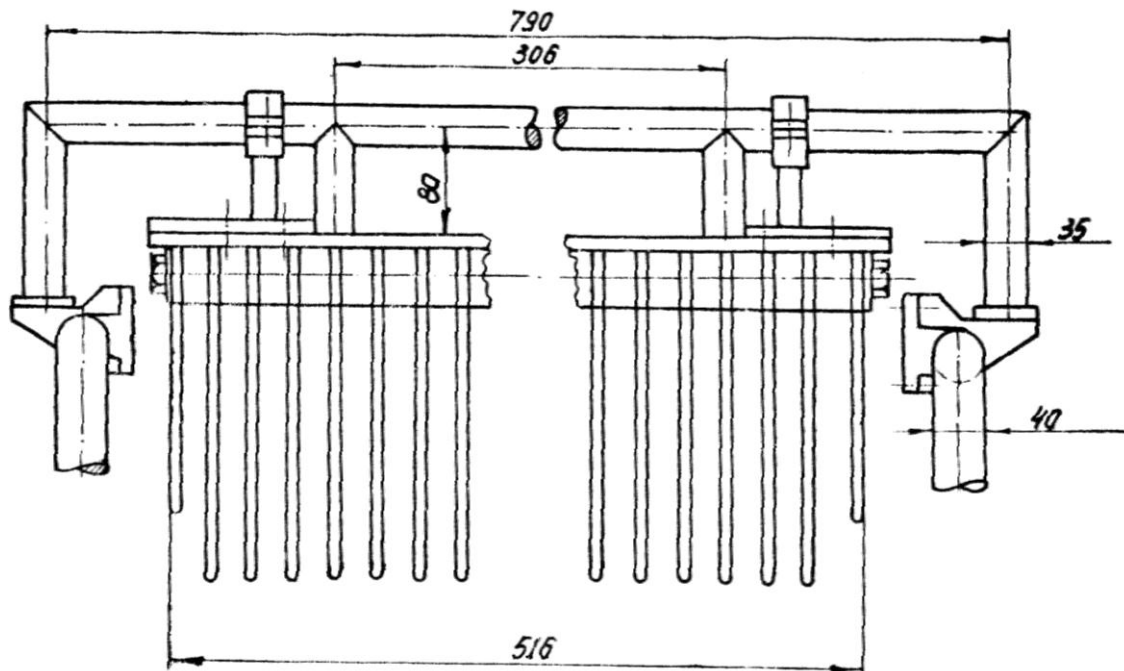


Рис. 6.7. Конструкция крепления индуктивных пакетов вариатора

«Земляные» пакеты вариатора частоты

Заземление ротора по высокой частоте производится тремя блоками «земляных» пакетов: задним (33, рис. 6.2) верхним и нижним (12). Конструкция и фотография «земляных» пакетов приведены на рис. 6.8а, б.

«Земляные» пакеты вариатора (12) набраны из шестнадцати штук 36-градусных пластин толщиной 17 мм, стянутых тремя шпильками из немагнитной стали через алюминиевые прокладки. Каждый из «земляных» пакетов под определенным углом крепится к «щекам» вариатора при помощи полого латунного основания (13), охлаждаемого водой. Основание «земляных» пакетов при помощи медных плакировок соединено с плакировкой отсека камеры. С помощью специальных прокладок «земляные» пакеты можно сдвинуть в ту или иную сторону, тем самым выставляя зазор между «земляными» пластинами и пластинами ротора. Этот зазор составляет величину, равную $1,5 (\pm 0,1)$ мм.

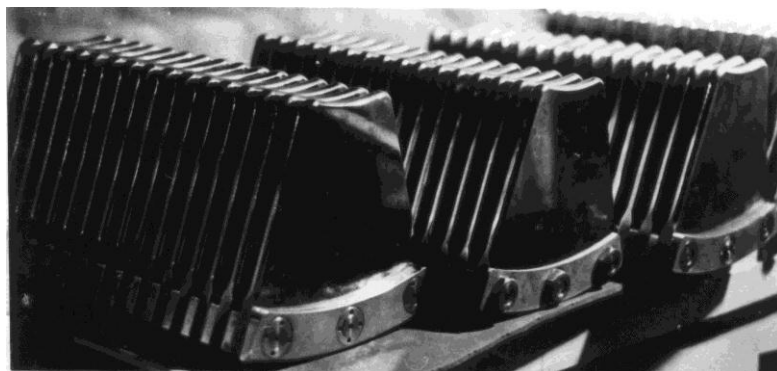
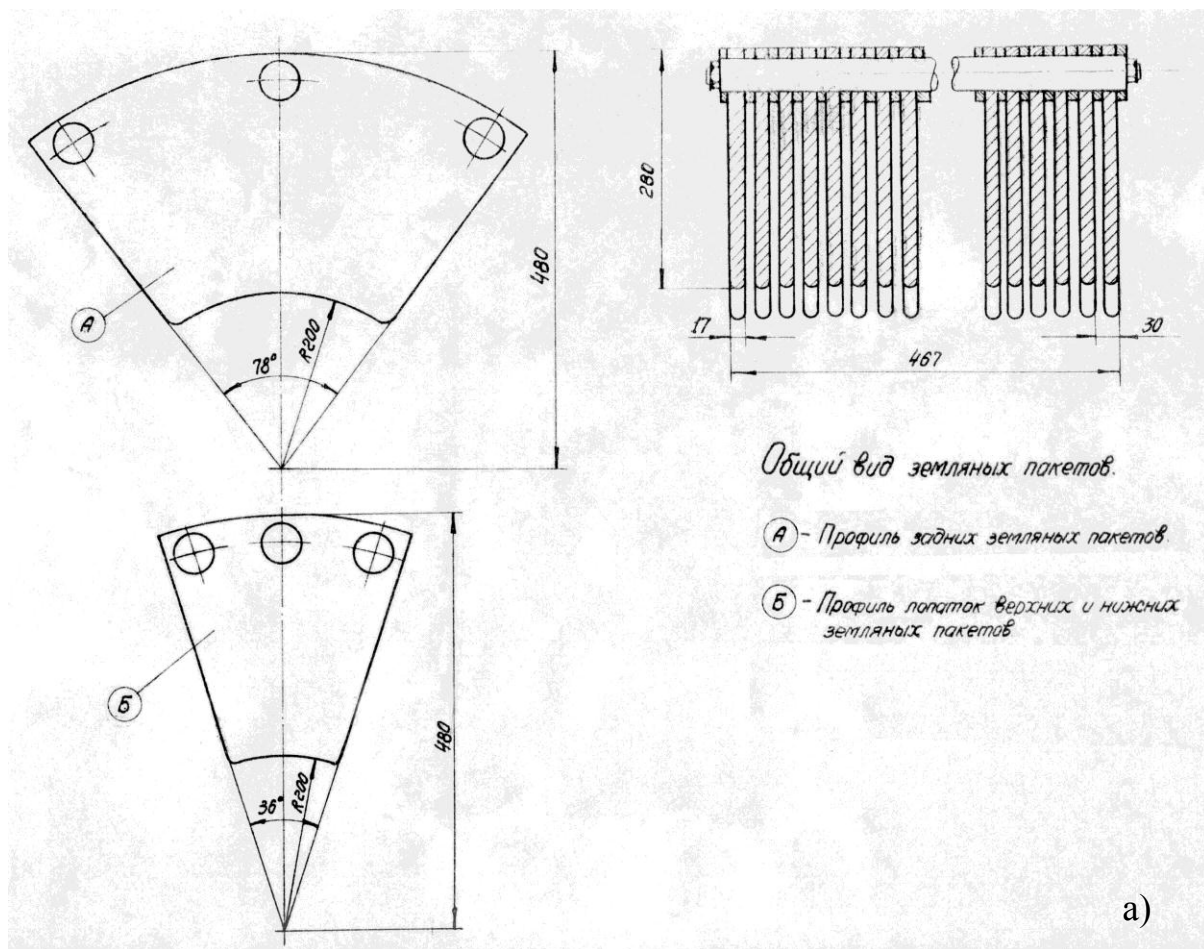


Рис. 6.8. «Земляные» пакеты:
а) геометрия; б) вид

Полицилиндрические конденсаторы вариатора частоты

На концах вала находятся полицилиндрические конденсаторы, предназначенные для защиты подшипников от ВЧ-токов. Конструкция и фотография блока полицилиндров приведены на рис. 6.9а, б.

Полицилиндрические конденсаторы состоят из двух частей – роторной (24, рис. 6.2) и «земляной» (25). Каждая из частей имеет 6 колец толщиной 3 мм и высотой 80 мм. Кольца расположены на основаниях, в

которых имеется по 6 concentric channels – « посадочных мест » соответствующих колец. Каждое из колец притягивается к основаниям 8 винтами, расположенными с обратной стороны основания.

Основания роторных частей полицилиндрических конденсаторов крепятся к торцам вала ротора вариатора при помощи прижимной гайки и шести болтов. На наибольшем диаметре основания имеется канавка, в которой размещены грузики для балансировки ротора.

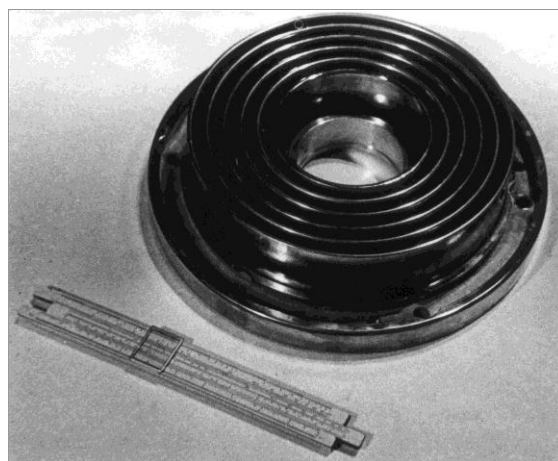
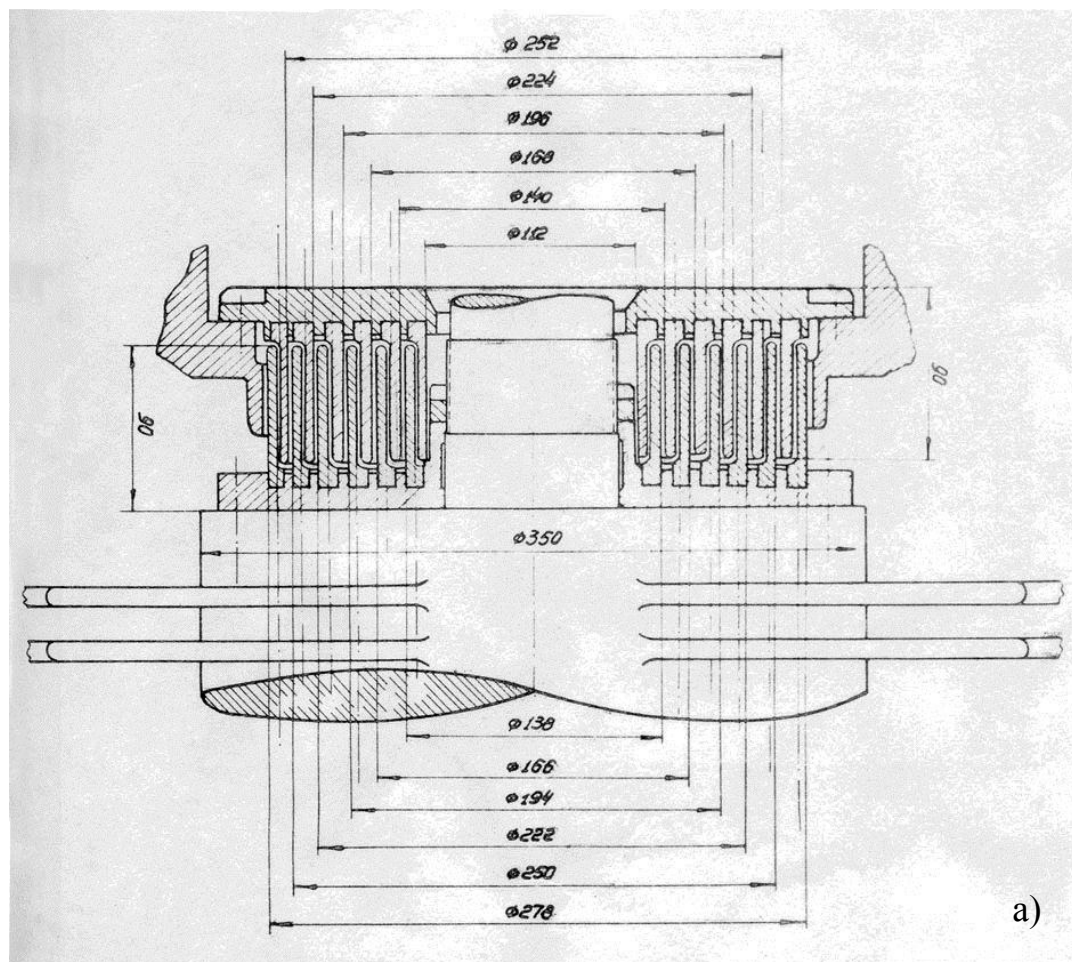


Рис. 6.9. Блок полицилиндров:
а) конструкция; б) наружные кольца

Электрический контакт между роторной частью конденсатора и ротором осуществляется через медную проволоку диаметром 1,4 мм, проложенную между ними. Охлаждение роторной части осуществляется через непосредственный контакт между ее основанием и торцом ротора. Основание «земляной» части полицилиндрических конденсаторов крепится к соответствующим «посадочным местам» в «щеках» вариатора при помощи шести болтов. На основание каждой «земляной» части напаяна медная трубка для охлаждения водой. В собранном виде зазор между пластинами конденсатора составляет $1 (\pm 0,1)$ мм.

Кожух вариатора частоты

Кожух вариатора (9, рис. 6.2) состоит из 4-х частей, изготовленных из конструктивной стали и медненных со стороны вакуумного объема. Основание кожуха – сварное и крепится к вакуумному отсеку. С боков к основанию кожуха крепятся «щеки» кожуха, которые имеют отверстия для выхода «посадочных мест» ротора вариатора, а также отверстия для фидеров обратной связи и трубок охлаждения «земляных» пакетов. С задней стороны основания кожуха крепится съемная крышка кожуха (22), которая имеет два смотровых окна (23) и отверстия для трубок охлаждения блокировочных конденсаторов и шунтов. Все разборные детали кожуха вакуумно уплотнены при помощи вакуумной резины.

«Щеки» вариатора частоты

«Щеки» вариатора (18, рис. 6.2), сварные с ребрами жесткости, изготовлены из конструктивной стали. С внешних сторон ротора вариатора «щеки» меднены, а с внутренних – меднены и покрыты хромом.

«Щеки» являются основной несущей конструкцией вариатора частоты. К ним сверху и снизу под определенным углом крепятся основания «земляных» пакетов и задняя съемная стенка (22). С внешних сторон «щеки» имеют «посадочные места» для крепления опоры ротора. К внутренней части опор крепится «земляная» часть полицилиндрических конденсаторов (25). «Щеки» непосредственно крепятся к вакуумному отсеку.

Система охлаждения вариатора частоты

Индуктивная часть вариатора частоты охлаждается через боковой ввод воды охлаждения вакуумной камеры. Вода последовательно проходит через ВЧ-дроссель, основание дуантного пакета, через штуцера, соединяющие индуктивные кольца (17, рис. 6.2) с основанием дуантного пакета, через П-образные индуктивные стойки (8) и основания индуктивных пакетов; далее опять через индуктивные кольца, дроссель и вывод воды из вакуумной камеры.

«Земляные» пакеты (12) охлаждаются через свои основания (13), каждый в отдельности. Ввод и вывод воды ведется через отверстие в боковых «щеках» кожуха. Задняя стенка, блокировочные конденсаторы (6) и шунты (5) соединены по воде последовательно. Ввод и вывод воды происходит через отверстие плиты кожуха. Все четыре «земляные» части полицилиндрических конденсаторов охлаждаются последовательно, а вводы трубок охлаждающей воды проходят через опоры подшипников ротора. Ввод и вывод воды в вал ротора вариатора (15) происходит с одной стороны вала при помощи разделительного узла водораспределения (29). Так как ротор полый и имеет каналы, то вода подается сначала в наружную полость, доходит до противоположного конца ротора и через его центральную часть выводится наружу. Охлаждение вариатора ведется дистиллированной водой.

Сборка и механическая регулировка узлов вариатора частоты

Вся механическая сборка каждого в отдельности вариатора происходит при помощи специальных приспособлений на сборочной плите. На ней выверяется параллельность «щек» корпуса (18, рис. 6.2), устанавливаются «земляные» пакеты (12), выверяются предварительные зазоры между роторными и «земляными» пластинами. Индуктивная часть собирается отдельно на специальном стенде, где ведется выверка индуктивных пакетов (11) и дуантного пакета (20) по угловому положению между ними, а также по положению всех пластин относительно друг друга. Окончательная сборка и регулировка вариатора частоты ведется непосредственно на вакуумном отсеке камеры. Здесь выверяются соосность вариаторов относительно друг друга, зазоры между ротором, «земляными», дуантными и индуктивными пакетами, а также положение всех пакетов по углам. Заключительный этап – это установка и выверка промежуточного вала, а также механическое симметрирование вариаторов друг с другом.

Обслуживание вариатора частоты и профилактический уход в период эксплуатации

В период эксплуатации обслуживание вариатора заключается в систематическом прослушивании, проверке и смазке вращающихся узлов. Во время профилактического ремонта необходимо производить смену смазки в неревизируемых узлах, а в ревизируемых производить смену подшипников, сальниковых уплотнений, а также, по мере необходимости, смену манжетных уплотнений. Необходима систематическая подтяжка всех водяных соединений и механических креплений. При ревизии требу-

ется систематическая проверка всех зазоров, а также зачистка и снятие налета со всех частей вариатора, находящихся под ВЧ-напряжением.

Принципиальные изменения, внесенные в конструкцию вариатора частоты

Пробная эксплуатация синхроциклотрона показала, что в нижней части диапазона напряжение на роторе вариатора при ускоряющем напряжении 8 кВ достигает 2,5 кВ, что при зазорах между пластинами ротора и в полицилиндрах ~ 1 мм вызывает пробой и электроэрозию. Это привело к ограничению ускоряющего напряжения и, следовательно, к уменьшению интенсивности пучка. (Зависимость между величиной ускоряющего напряжения и интенсивностью протонного пучка синхроциклотрона рассмотрена нами в главе 7, п. 7.3.) Поэтому с целью понижения напряжения на роторе вариатора и улучшения его эксплуатационных характеристик были введены принципиальные конструктивные изменения.

Все статорные и роторные пластины нового вариатора были изготовлены из алюминиевого сплава АМГ-6 вместо нержавеющей стали с хромовым покрытием по проекту. Полицилиндры изготовлены из меди М-2. Это уменьшило электрокоррозию поверхностей вариатора и количество образующихся на нем кратеров и каверн после электрических пробоев и резонансных ВЧ-разрядов (РВР), происходящих между пластинами вариатора и в полицилиндрах (подробнее в п. 6.5). Значительно облегчились работы по восстановлению поверхностей пластин ротора методом шабрения и полировки после эксплуатационного цикла (2 000–3 000 часов работы ускорителя).

Улучшился тепловой режим вариатора. Лопатки вариатора напрессованы на вал вариатора. Охлаждение лопаток происходит через контактные соединения между лопатками и валом, который охлаждается водой. Эти контактные соединения являются одновременно и тепловыми сопротивлениями при съеме теплотока с ротора. Использование алюминиевого сплава вместо нержавеющей стали улучшило теплосъем с лопаток вариатора и повысило его эксплуатационные характеристики.

Выше было показано, что при исследовании влияния емкости дуантных пакетов на частотную программу емкость C в нижней части диапазона практически не влияет на частоту системы. Поэтому с целью уменьшения начальной емкости вариатора и увеличения верхнего значения частоты программы 36-градусные дуантные пакеты были заменены заново изготовленными 18-градусными дуантными пакетами. Это уменьшило начальную емкость дуантных пакетов примерно с 275 (на один вариатор) до 150 пФ и, соответственно, увеличило максимальную частоту

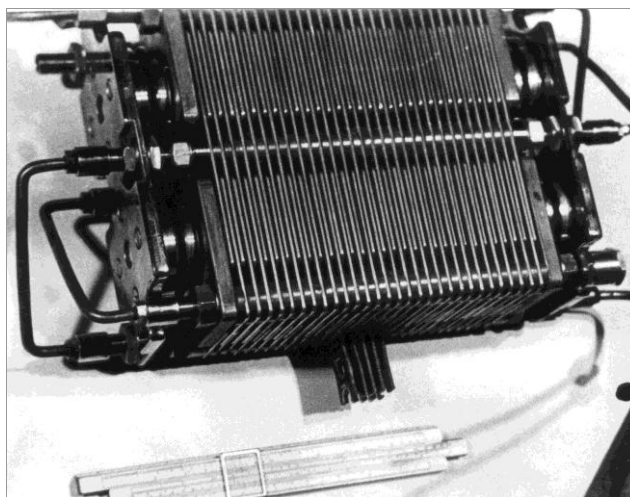
резонансной системы и величину df/α в районе захвата. Конструкция старого и нового дуантных пакетов показана на рис. 6.4а, б.

Как уже отмечалось, заземление по высокой частоте ротора вариатора и индуктивности C_2 осуществляется емкостью C_p , которая представляет собой емкость, образованную «земляными» пакетами вариатора и полицилиндрическими конденсаторами, и емкостью C_6 , которая является емкостью задних блокировочных конденсаторов, заземляющих индуктивные кольца вариатора по высокой частоте (рис. 5.18).

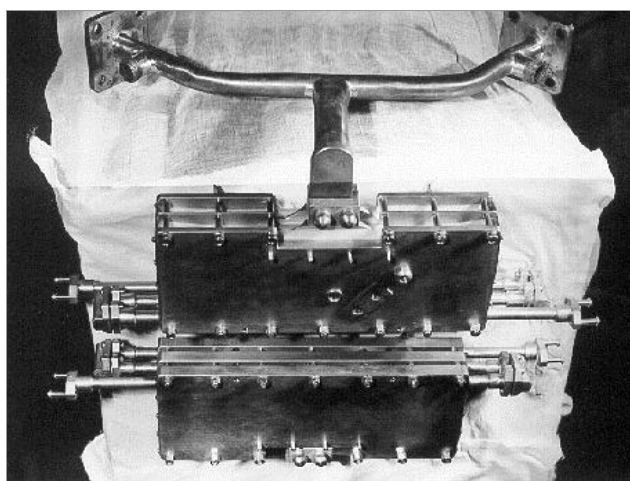
С целью уменьшения напряжения на роторе вариатора была разработана принципиально новая конструкция заземления ротора при помощи двух дисков диаметром 1 м и толщиной 10 мм, насаженных по краям вала ротора и имеющих зазор 1 мм с ответной «земляной» поверхностью кожуха вариатора. Конструкция этих дисков хорошо видна на рис. 6.1. Диски были изготовлены из алюминиевого сплава АМГ-6.

Были разработаны новые блокировочные конденсаторы. В первоначальном варианте задние блокировочные конденсаторы вариатора набирались из 3-миллиметровых латунных пластин размером 7×25 см² с зазором между ними 1 мм, который был ориентирован перпендикулярно магнитному полю ускорителя (рис. 6.10а, б). Из-за недостаточно жесткой конструкции и попадания в зазоры конденсаторов при включении магнитного поля мелких металлических стружек происходили частые пробои и замыкания пластин. В связи с этим, а также с целью увеличения емкости конденсаторов были разработаны новые задние блокировочные конденсаторы с емкостью 40 000 пФ, в которых было предусмотрено водяное охлаждение пластин, а «воздушные» зазоры были заменены на прокладки из тефлоновой пленки толщиной 0,25 мм.

Блокировочный конденсатор (б, рис. 6.2) набран из пяти латунных пластин толщиной 15 мм: трех «земляных» размером 235×200 мм и двух размером 135×200 мм. Эти две пластины при помощи приливов подсоединены к индуктивным кольцам через специальные крепления – шунты (5). Между пластинами проложена пленка из фторопласта толщиной 0,25 мм. Пластины стянуты между собой шестью латунными шпильками. На задней «земляной» пластине сверху и снизу прикреплены планки, при помощи которых конденсатор крепится на заднюю стенку статора вариатора частоты. Вода для охлаждения конденсаторов проходит через все пластины по имеющимся внутри них каналам. Специальные фарфоровые вставки разделяют разнопотенциальные пластины при последовательном охлаждении.



а)



б)

Рис. 6.10. Блокировочные конденсаторы вариатора:
а) до модернизации; б) после модернизации

Как отмечалось выше, была изменена геометрия всех статорных пластин блоков «земляных» пакетов, заземляющих по высокой частоте свободные от емкостного зацепления пластины ротора, которая приводила к паразитному резонансу в частотном диапазоне. Новая геометрия статорных пластин показана на рис. 6.8. Суммарная емкость C_p заземления ротора в нижней части диапазона увеличилась при этом до 22 000 пФ, и за счет этого нижняя частота диапазона уменьшилась на 0,3 МГц.

Защита подшипников вариатора частоты

Несмотря на «заземления» вариатора по высокой частоте с помощью вышеописанных заземляющих емкостей, на валу ротора присутствует ВЧ-напряжение до 2 кВ, и через подшипники вариатора протекают значительные ВЧ-токи. Так как в шарикоподшипниковом соединении имеется только «точечный» контакт шарик – обойма, то плотность токов достигает значительных величин, приводя к электрокоррозии подшипников и необходимости их замены через 1 000 часов работы ускорителя. По-

этому с внутренней стороны каждого из вариаторов были поставлены роликовые конусные подшипники, которые из-за более развитой контактной поверхности ролик – обойма лучше противостоят электрокоррозии.

Дополнительно подшипники были зашунтированы трущейся парой чугунных колец. Такая защита оказалась очень эффективной, а износостойкость подшипников увеличилась в десятки раз.

С целью уменьшения ВЧ-напряжения на роторе вариатора была изготовлена новая конструкция конденсаторов для защиты подшипников ротора – поликонические конденсаторы с более развитой поверхностью и регулируемым зазором (рис. 6.11). Это позволило увеличить емкость одного блока с 5 000 до 7 000 пФ.

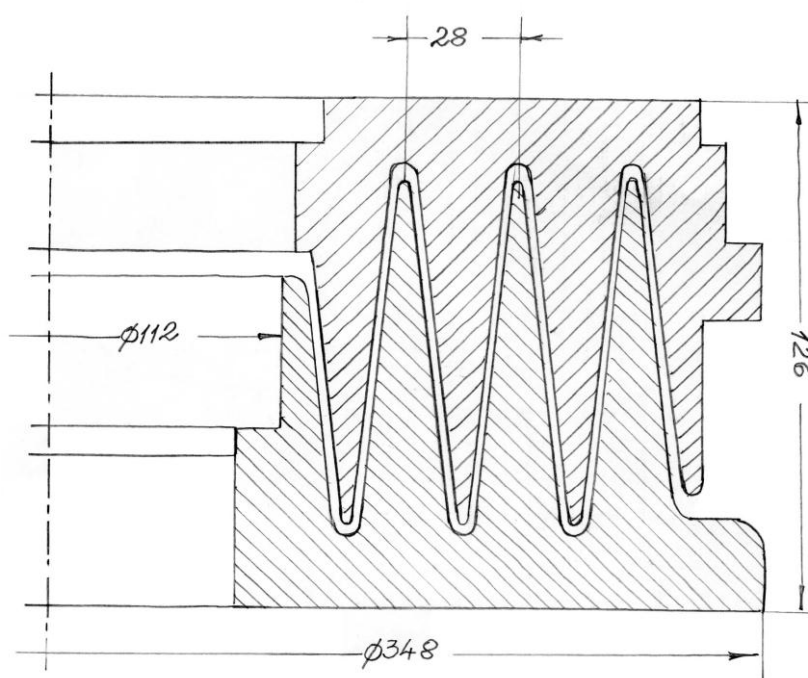


Рис. 6.11. Поликонический конденсатор

Важным следствием увеличения емкости конденсатора явилась более надежная защита подшипников вариатора от протекания ВЧ-токов и сдвиг продольных паразитных резонансов вариатора за пределы рабочей частотной программы.

Изменение индуктивностей L_2 и L_3

Как было показано выше, получение необходимого частотного диапазона было достигнуто за счет введения в схему вариатора индуктивности L_3 и уменьшения величины индуктивности L_2 (рис. 5.19). Была произведена конструктивная переделка крепления индуктивных пакетов вариатора к индуктивным кольцам в виде П-образных стоек, показанных на рис. 6.7, которые и образовывали индуктивность L_3 . Наличие подвиж-

ного контактного соединения позволяло изменять величину индуктивности L_3 и точно подстраивать частоту диапазона. Стойки охлаждаются водой.

Уменьшение величины L_2 было осуществлено за счет новой конструкции подсоединения индуктивных колец к задним блокировочным конденсаторам, показанной на рис. 6.12.

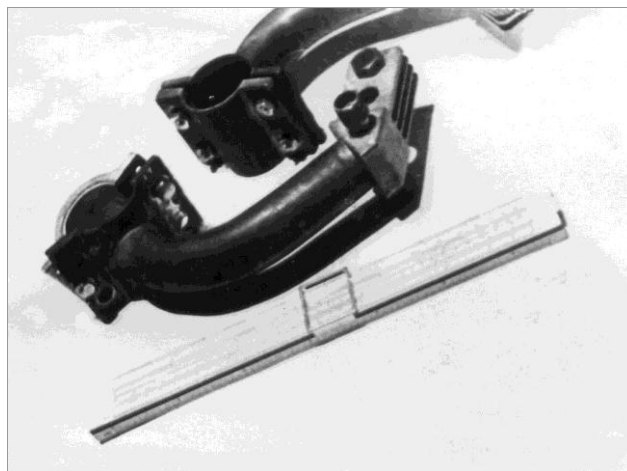


Рис. 6.12. Конструкция дужек, заземляющих индуктивность L_2

6.4. Контроль за тепловыми деформациями в конструкции вариатора частоты

Потери мощности в вариаторе составляют бóльшую часть суммарных потерь в ВЧ ускоряющей системе. Это является следствием использования в вариаторе индуктивных элементов и свойств резонансных контуров с возрастанием токов в них при приближении к резонансу. В главе 5 были получены выражения для величин токов, протекающих по индуктивным элементам вариатора (рис. 5.22).

Мощность, рассеиваемая в индуктивных элементах вариатора L_1 , L_2 , и L_3 , определяется выражением

$$P_i = \frac{1}{120} \int_0^{36^\circ} I_i^2(\alpha) R_i(\alpha) d\alpha,$$

где $I = 1, 2, 3$, а R_i – активное сопротивление с учетом величины скин-слоя соответствующего индуктивного элемента; α – угол поворота ротора вариатора в градусах. Величины активных сопротивлений R_i равны соответственно $R_1 = R'_1/8$, $R_2 = R'_2/8 + R'_d/4$, $R_3 = R'_3/8$. Здесь R'_1 и R'_2 – активное сопротивление соответствующих участков индуктивных колец; R'_3 – активное сопротивление конструкции подсоединения индуктивных пакетов к индуктивным кольцам; R'_d – активное сопротивление задних

дужек, обеспечивающих крепление индуктивных колец к задним блокировочным конденсаторам (рис. 5.17б).

Как видно из этих формул, уменьшение величины расстройки $\Delta f = f_1 - f$ в нижней части диапазона, необходимое для увеличения эквивалентной емкости вариатора, вызывает обратно пропорциональное величине расстройки возрастание токов во всех индуктивных элементах вариатора, и, соответственно, обратно пропорционально квадрату величины расстройки возрастает рассеиваемая в этих элементах мощность. Обратно пропорционально величине расстройки возрастает также напряжение U_{C2} на индуктивных пакетах и напряжение на роторе вариатора U_{cp3} , что может привести к пробоям между лопатками ротора и «земляными» пакетами и к эрозии подшипников вариатора.

Измерения показали, что потери мощности в вариаторе частоты при ускоряющем напряжении 8 кВ составляют около 150 кВт и сосредоточены на 80 % в скин-слое индуктивностей L_1, L_2, L_3 . Для изготовления этих индуктивностей была использована труба из нержавеющей стали, на поверхность которой гальваническим способом был нанесен слой меди и затем слой хрома, проводимость которого в 9 раз хуже меди. Поэтому с целью снижения рассеиваемой мощности был установлен контроль за толщиной покрытия хромом, которое было ограничено величиной в несколько мк. С целью снижения мощности, рассеиваемой в задних дужках вариатора, в которых ток в конце диапазона наибольший, было проведено серебрение этих дужек и хромовое покрытие не накладывалось.

Таким образом, ограничение амплитуды ускоряющего напряжения на дуанте и значительная мощность, рассеиваемая в индуктивных элементах вариатора, являются, по существу, платой за увеличение коэффициента перекрытия вариатора частоты по емкости и соответствующего расширения диапазона частот, необходимого для ускорения протонов до энергии 1 ГэВ.

Естественное желание повысить интенсивность пучка за счет увеличения ускоряющего напряжения приводит к предельно возможному режиму работы вариатора как по пробивному напряжению, так и по его тепловому режиму. Нагрев элементов вариатора, в основном его индуктивных дуг, на которых крепятся блоки пакетов, приводит к их тепловой деформации, к изменению зазоров между пластинами вариатора и возникновению пробоев. Так, например, введение регулируемой индуктивности L_3 (рис. 5.19) при помощи П-образных стоек (рис. 6.7) уменьшило механическую жесткость крепления индуктивных пакетов, и при нагреве стоек могло происходить смещение пакетов с изменением зазоров между пластинами ротора. Деформация пластин происходит также из-за их неравномерного нагрева.

Нами была разработана система измерения перемещения пластин ротора относительно кожуха вариатора и дистанционного контроля непосредственно во время эксплуатации ускорителя. Данные о перемещениях выводились на пульт управления, информируя о механических смещениях конструктивных частей вариатора. Контроль осуществлялся при помощи электроемкостных датчиков, расположенных по окружности статора.

Контроль за тепловым режимом работы вариатора и информация о смещении его частей позволили выработать регламент работы вариатора и ограничить величину ускоряющего напряжения предельно допустимой величиной, обеспечивающей длительную и надежную эксплуатацию ускорителя.

После введения системы защиты ускоряющей системы от ВЧ-пробоев система контроля за смещением ротора была демонтирована.

6.5. Система защиты ускоряющей системы от высокочастотных пробоев

Большинство конструктивных элементов ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона выполнены из меди. ВЧ-напряжение вырывает отдельные электроны с поверхности системы, которые, ускоряясь в ВЧ-поле, двигаются к противоположной поверхности и при величине коэффициента вторичной эмиссии электронов (КВЭ) больше единицы выбивают из нее больше одного электрона. Если время движения электрона между такими поверхностями равно полупериоду ВЧ-напряжения, то выбитые электроны двигаются в противоположном направлении и, в свою очередь, выбивают эмиссионные электроны. Так возникает электронная лавина, осциллирующая синхронно с частотой электрического поля, существующего между двумя поверхностями, – это так называемый РВР, или мультипакторный эффект. Этот разряд нарушает работу ВЧ-генератора и приводит к срыву генерации ВЧ-напряжения. Область существования РВР определяется соотношением между амплитудой и частотой ВЧ-напряжения и расстоянием между электродами.

При практических оценках удобно пользоваться обобщенными значениями граничных напряжений¹

$$\xi_{\text{гр.}} = \frac{U_{\text{гр.}}}{U_0},$$

где $U_{\text{гр.}}$ – амплитуда напряжения возникновения РВР.

$$U_0 = \frac{4\pi^2 f^2 d^2}{e/m} = 2,26 \cdot 10^{-2} (fd)^2 \text{ (МГц}^2 \cdot \text{см}^2\text{)},$$

¹ Загер Б. А., Тишин В. Г. Резонансный ВЧ-разряд в ускорителях // Междунар. конф. по ускорителям. М., 1964. С. 953–957.

где d – межэлектродное расстояние в сантиметрах; f – частота колебаний электрического поля в мегагерцах; e , m – заряд и масса электрона.

На рис. 6.13 приведена область существования РВР, полученная экспериментально на циклотронах У-300 и У-150 в ЛЯР ОИЯИ.

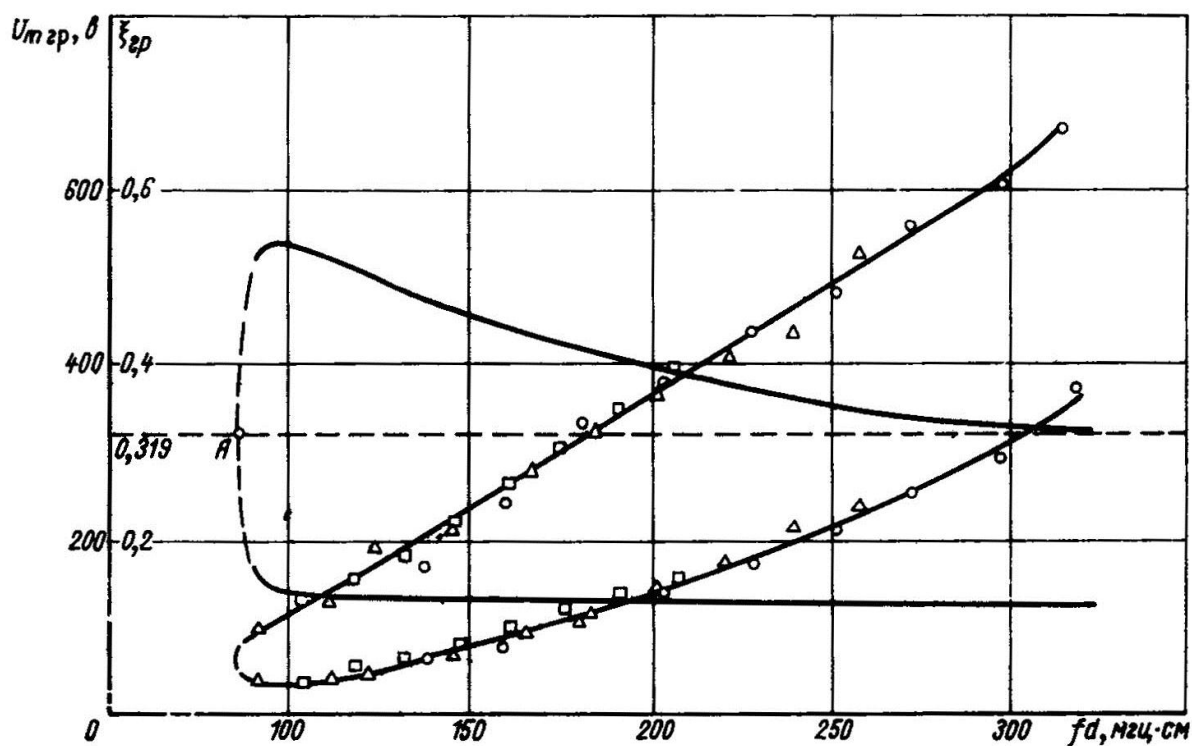


Рис. 6.13. Область существования РВР по результатам эксперимента.
 Значения f , МГц: 22,8 (0); 18,4 (Δ); 14,7 (\square);
 ξ – обобщенная амплитуда напряжения

При включении или подаче импульса ВЧ-напряжения амплитуда ВЧ-напряжения возрастает от 0 до U_{\max} , поэтому в реальной системе всегда найдется промежуток между электродами, где выполняется условие возникновения РВР, причем наличие стоячей волны в резонансной системе приводит к перемещению области существования РВР по длине резонатора (рис. 6.14). Наиболее рациональным способом ликвидации РВР является использование в ускоряющей системе покрытий электродов с КВЭ меньше единицы. Однако применение для этой цели существующих материалов представляется проблематичным.

Для защиты ускоряющей системы от РВР традиционно используется подача отрицательного смещения (1–3 кВ) на все ее элементы: дуант, вариатор, фокусирующие электроды, С-электрод и др. подача смещения изменяет временные интервалы пролета электронов между электродами в одну и другую сторону и тем самым предотвращает развитие лавинообразного РВР. Величина смещения, требующаяся для подавления РВР и полученная экспериментально, приведена на рис. 6.15.

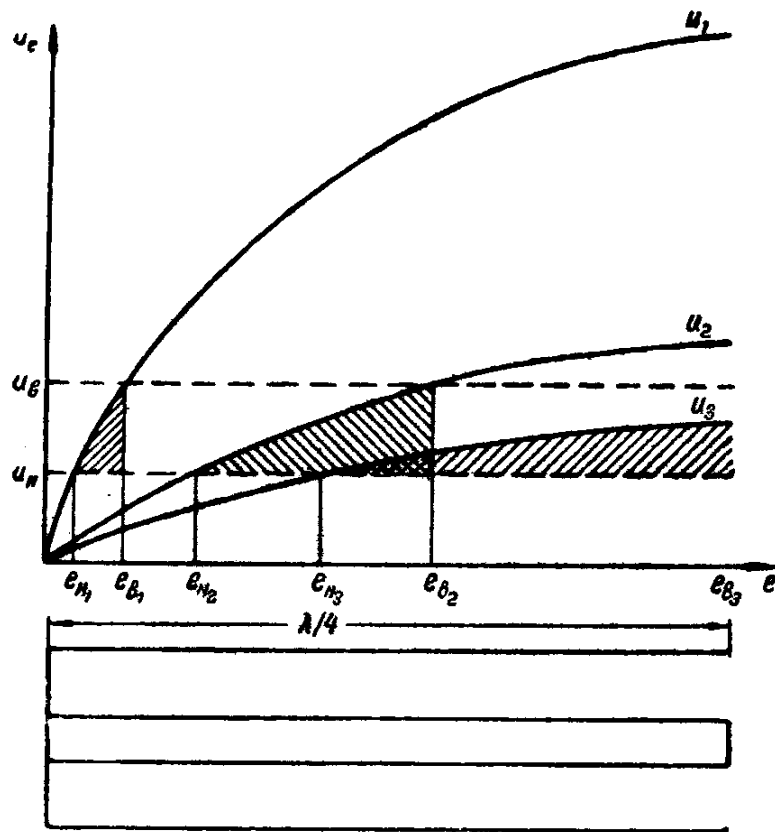


Рис. 6.14. Схематическая зависимость расположения областей существования РВР в четвертьволновом коаксиальном резонаторе

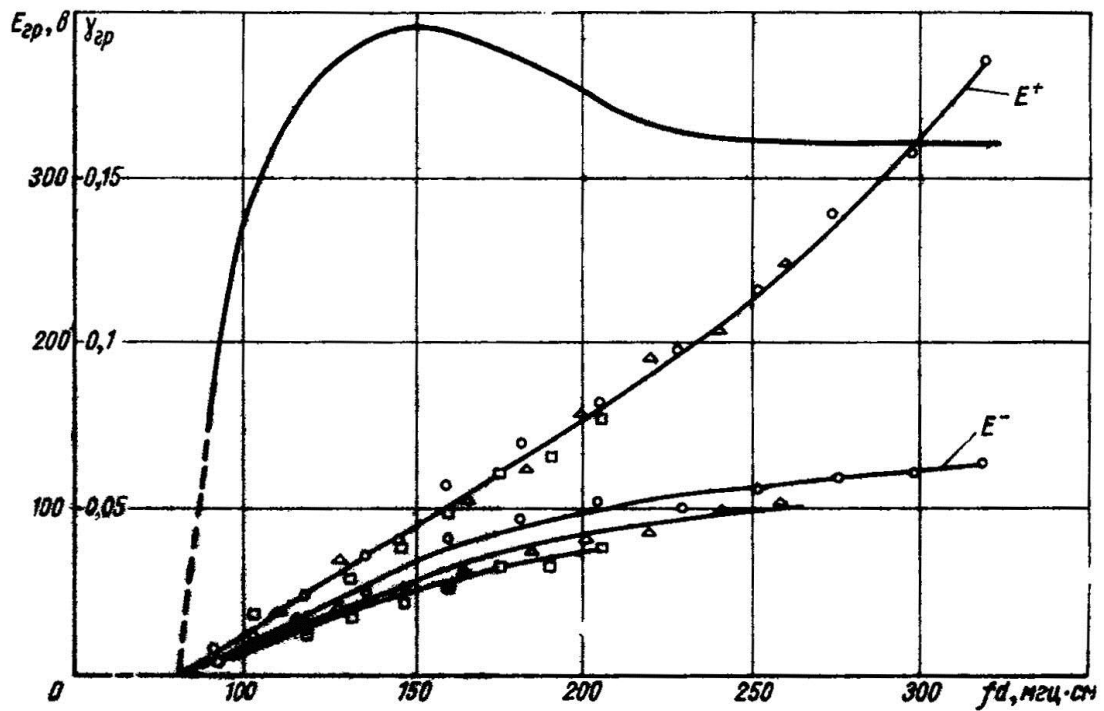


Рис. 6.15. Результаты измерения смещения, требующегося для подавления РВР (γ – обобщенная величина смещения).
Значения f , МГц: 22,8 (\circ); 18,4 (Δ); 14,7 (\square)

На синхроциклотроне ПИЯФ использована схема защиты, работающая следующим образом. Перед началом каждого рабочего цикла все вышеперечисленные элементы ускоряющей системы, имеющие емкостное сопротивление на землю, импульсно заряжаются до потенциала 2–2,5 кВ от высокоомного источника. За время рабочего цикла программы ускоряющего напряжения этот отрицательный потенциал уменьшается на 20–30 % через сопротивление утечки, но остается достаточным для предотвращения возникновения РВР. Перед следующим циклом ускорения происходит его подзарядка до первоначального уровня.

В случае возникновения в любом из элементов ускоряющей системы (при любой частоте ускоряющей программы) единичного пробоя одновременно происходит и разряд емкости системы, что автоматически приводит к срыву ВЧ-генерации ускоряющей системы на оставшуюся часть цикла ускорения. Если этот пробой носил случайный характер, то к следующему циклу ускорения система автоматически восстанавливает свою работоспособность. Система слежения и контроля анализирует и запоминает количество пробоев и частоту ускорения, при котором возникает пробой. При повторении серии пробоев программно снижается или отключается напряжение с ускоряющей системы.

Отметим, что наличие на поверхности электродов пленки вакуумного масла и слоя адсорбированных газов приводит к тому, что в начальный период работы ускорителя после предшествующей продолжительной остановки возможно возникновение плазменного разряда ударной ионизации. Поскольку инициатором плазменного разряда обычно служит РВР, эти два различных разряда часто путают. Если РВР можно ликвидировать с помощью смещения на электродах, то плазменный разряд при подаче постоянного напряжения усиливается. Образование плазмы в объеме происходит путем ионизации газа и продуктов разложения вакуумного масла, выделяющихся со стенок резонатора под действием электронной лавины РВР. Поэтому при эксплуатации ускорителей необходимо следить за чистотой поверхностей резонатора, исключить возможность попадания паров масла в вакуумный объем, а также предусматривать время для «тренировки» резонансной системы.

Разработанная нами система смещения полностью исключает развитие РВР и эффективно предотвращает длительный плазменный разряд.

6.6. Оптимизация частотной программы синхроциклотрона ПИЯФ

Важным параметром ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона является форма зависимости частоты ускоряющего напряжения от угла поворота ротора вариатора – так называемая частотная программа $f(\alpha)$.

В главе 3 были приведены формулы для нахождения зависимости $f(\alpha)$ при заданных параметрах ускорителя $B(r)$, $K(r)$, $V(\alpha)$. Форма этой частотной кривой $f(\alpha)$ в предположении, что ускоряющее напряжение на дуанте остается постоянным, приведена на рис. 6.19 (кривая 1). Однако при получении этой зависимости $f(\alpha)$ не учитывалось явление затухания амплитуды синхротронных колебаний в процессе ускорения.

Если в начале цикла ускорения сепаратриса была заполнена полностью, то при ускорении протонов по мере затухания синхротронных колебаний фазовая площадь, занятая пучком, становится меньше. Ускорение «большой» сепаратрисой «маленького» фазового объема невыгодно, т. к. не используется полностью амплитуда ускоряющего напряжения и время ускорения становится больше, чем это необходимо. Поэтому надо скорректировать частотную программу таким образом, чтобы размер сепаратрисы в процессе ускорения уменьшался по мере сокращения фазового объема, занятого пучком.

Эта зависимость может быть найдена из выражения для адиабатического инварианта фазовых колебаний, который представляет собой площадь, охватываемую фазовой траекторией на фазовой плоскости $\left(\frac{\Delta E}{\omega}, \varphi\right)$:

$$J(C, \varphi_s) = 2 \sqrt{\frac{2eV E_s}{\pi K_s \omega_s^2}} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \sqrt{\sin \varphi - \varphi \cos \varphi_s + C} d\varphi,$$

где C – константа, определяющая выбранную фазовую траекторию. Для сепаратрисы $C = C_s = \sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s$.

Предположим, что сепаратриса «заполнена» полностью. Тогда сохраняется величина

$$J_s(\varphi_s) = 2 \sqrt{\frac{2eV E_s}{\pi K_s \omega_s^2}} S(\varphi_s),$$

где $S(\varphi_s) = \int_{-\varphi_s}^{\varphi_1} \sqrt{\sin \varphi + \sin \varphi_s - (\varphi + \varphi_s) \cos \varphi_s} d\varphi$. Зависимость $S(\varphi_s)$ представлена на рис. 6.16. Отсюда, если заданы начальные значения V_0 , f_0 , K_0 и φ_{s0} , следует

$$S(\varphi_s) = \sqrt{\frac{V_0 n_0 n}{V n n_0} \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} S(\varphi_{s0}).$$

Располагая найденной путем численного интегрирования зависимостью $S(\varphi_s)$, может быть найдена искомая зависимость $\varphi_s(R)$. Результаты расчетов представлены на рис. 6.17, 6.18.

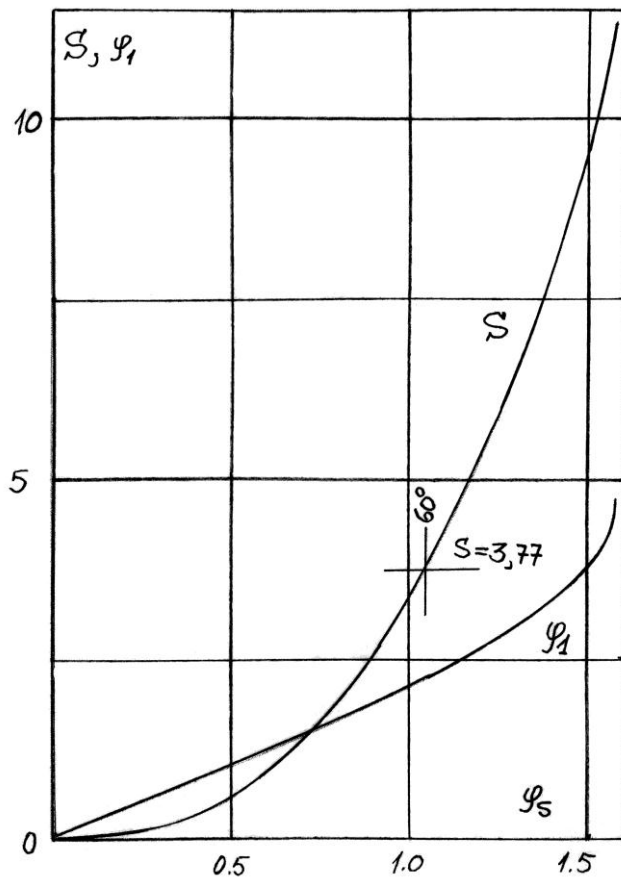


Рис. 6.16. Зависимость площади сепаратрисы S и правой фазы φ_1 от значения равновесной фазы φ_s

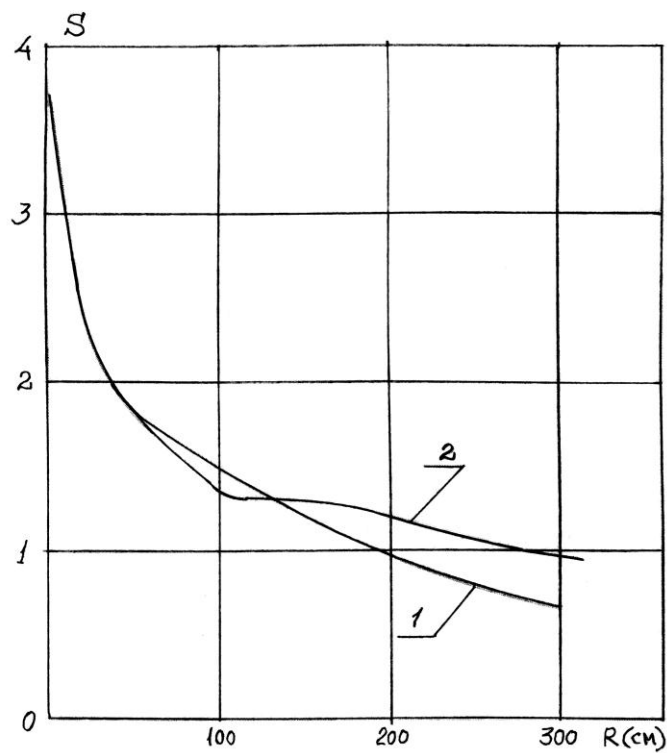


Рис. 6.17. Зависимость площади сепаратрисы S от радиуса R . 1 – $V = \text{const}$; 2 – $V = \text{varia}$

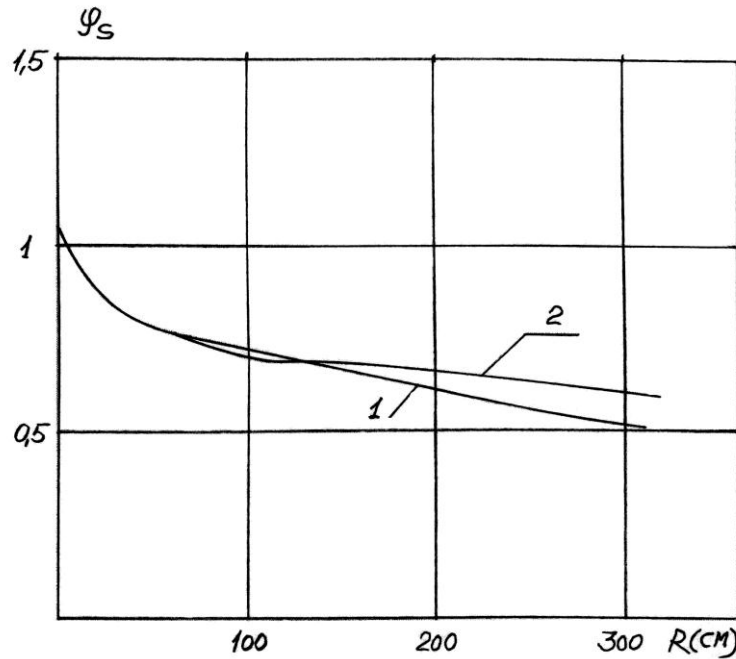


Рис. 6.18. Зависимость равновесной фазы φ_s от радиуса R .
 1 – $V = \text{const}$; 2 – $V = \text{varia}$. Вариант $V = \text{varia}$ соответствует реальной зависимости амплитуды ускоряющего напряжения от угла α для синхротрона ПИЯФ

На рис. 6.19 приведена форма оптимальной частотной кривой $f_{\text{opt}}(\alpha)$ и форма $f(\alpha)$, рассчитанная по формуле (3.9) (глава 3) без учета затухания синхротронных колебаний. Заметим, что оптимальная форма частотной кривой $f_{\text{opt}}(\alpha)$ мало отличается от кривой $f(\alpha)$.

Реальная форма частотной программы, измеренная на работающей ВЧ-системе синхротрона, оказалась отличной от оптимальной. Эта зависимость $f'_R(\alpha)$ также приведена на рис. 6.19. Важно отметить, что из-за свойства автофазировки отличие реальной программы от оптимальной не нарушает сам процесс ускорения, но приводит к увеличению амплитуды синхротронных колебаний, а в случае приближения величины $\cos \varphi_s$ к единице приводит к необходимости ограничения числа оборотов вариатора, т. е. частоты модуляции частотной программы и, следовательно, к уменьшению интенсивности. Действительно, в главе 3 была получена формула (3.6а), связывающая величину $\cos \varphi_s$ с частотной программой $df/d\alpha$ и величиной оборотов N . Поэтому оптимальная скорость вращения ротора, соответствующая значению $\cos \varphi_s = (\cos \varphi_s)_{\text{opt}}$ и постоянной амплитуде ускоряющего напряжения, может быть выражена в виде

$$N_{\text{opt}} = \frac{eVKf_s^2}{3E_s \frac{df}{d\alpha}} (\cos \varphi_s)_{\text{opt}}.$$

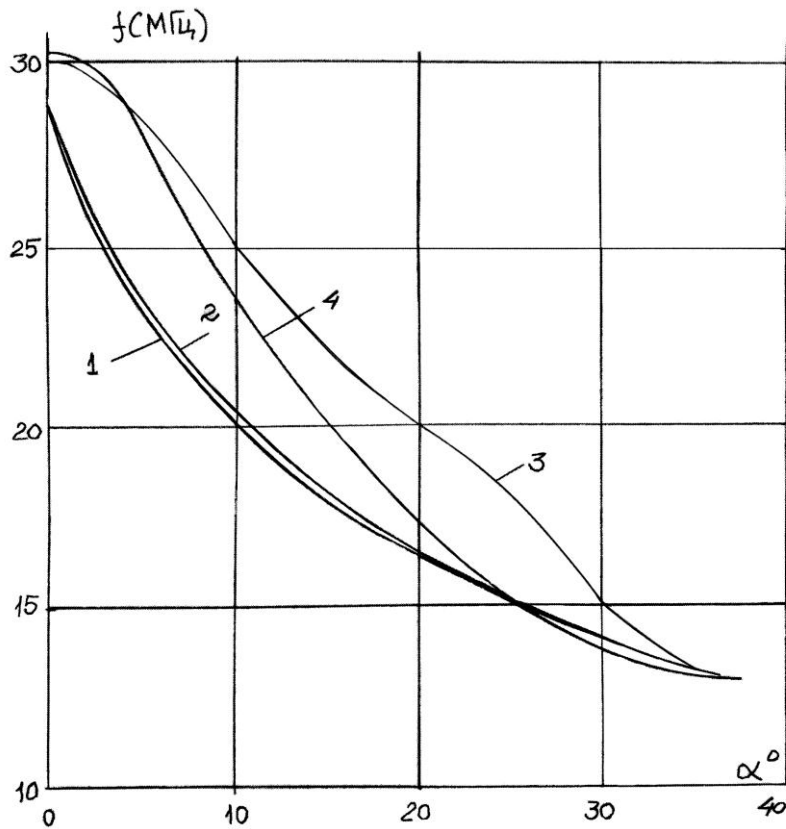


Рис. 6.19. Частотная программа:

1 – $f(\alpha)$ при $V \cos \varphi_s = \text{const}$; 2 – $f_{\text{opt}}(\alpha)$ при $V \cos \varphi_s = \text{const}$ с учетом затухания синхротронных колебаний; 3 – $f'_R(\alpha)$ – экспериментально измеренная частотная программа (до оптимизации); 4 – $f''_R(\alpha)$ – рабочая частотная программа синхроциклотрона (после оптимизации)

Однако если частотная и амплитудная программы не обеспечивают в процессе ускорения постоянство величины $V \cos \varphi_s$, то может оказаться, что при некоторых значениях угла α в пределах рабочего диапазона частот величина $\cos \varphi_s$ при выбранной скорости вращения ротора станет больше единицы. Это приведет к потере фазовой устойчивости и потерям пучка. Максимально допустимая скорость вращения ротора, при которой $\cos \varphi_s$ не выходит за пределы единицы, определяется выражением

$$N_{\max} < \left(\frac{eVRf^2}{3E_s \frac{df}{d\alpha}} \right)_{\max},$$

т. е. чем больше $df/d\alpha$, тем меньше допустимое число оборотов N_{\max} . При частотной программе $f'_R(\alpha)$ число оборотов вариатора соответствовало $N_{\max} = 300$ об./мин (период модуляции – 30 Гц).

Форма частотной кривой зависит от параметров ускорителя и его ВЧ ускоряющей системы, в частности от параметров вариатора, поэтому

программа была частично исправлена путем изготовления новых индуктивных пакетов с лопатками сложного профиля, найденного путем моделирования и ряда проб. Форма пластин показана на рис. 6.5. Получившаяся при этом зависимость частотной программы от угла $f_R''(\alpha)$ приведена на рис. 6.19. При этом величина производной $df/d\alpha$ в районе захвата изменилась незначительно, но в диапазоне углов $20\text{--}36^\circ$ приблизилась к расчетной. С новой формой частотной программы число оборотов ротора вариатора, соответствующее наибольшей интенсивности пучка, увеличилось с 300 до 500 об./мин.

В дальнейшем геометрия лопаток была упрощена и индуктивные пакеты были набраны из лопаток с прямолинейными кромками, но разной угловой протяженности (рис. 6.20). Клиновидные пакеты обеспечивали примерно такую же форму частотной программы $f_R''(\alpha)$.



Рис. 6.20. Форма лопаток клиновидных индуктивных пакетов

Отметим, что на частотной программе ускоряющей системы $f(t)$ есть два участка, которые требуют для оптимизации формы частотной программы иного подхода, который связан не только с проблемой автофазировки. Это начальный участок $f(t)$, в течение которого происходит захват протонов в режим ускорения, и конечный участок $f(t)$, который определяет параметры вывода пучка из синхроциклотрона, в частности длительность выведенного пучка.

Остановимся подробнее на оптимизации формы $f(\alpha)$ на этих участках.

Эффективность захвата

Далее будет показано, что эффективность захвата зависит от величины производной частотной программы df/dt на начальном участке $f(t)$, что подтверждается также экспериментальными результатами.

В главе 3 была получена связь между $df/d\alpha$ и оборотами вариатора N , поэтому настройка ускорителя на оптимальную величину эффективности захвата может быть осуществлена за счет выбора скорости вращения ротора вариатора, соответствующей оптимальному значению равновесной фазы, при которой эффективность захвата имеет максимум. Однако условие выбора оптимальных оборотов вариатора по критерию эффективности захвата не совпадает с условием ускорения протонов без потерь. Поэтому важно оптимизировать частотную программу $f(\alpha)$ на начальном участке в диапазоне частот захвата независимо от оптимизации программы в диапазоне частот ускорения протонов.

Такая оптимизация программы осуществляется на синхроциклотроне ПИЯФ следующим образом. К хвостовой части дуанта справа и слева от вариатора частоты были подсоединены регулируемые конденсаторы – триммеры. Подсоединение таких емкостей уменьшает резонансную частоту системы дуант – вариатор и сдвигает частотную программу $f(\alpha)$ в сторону нижних частот во всем диапазоне. Однако величина такого сдвига в начале программы при $f_{\max} \sim$ в 5 раз больше, чем при ее конечном значении f_{\min} . Поэтому с изменением емкости триммеров коррекция программы осуществляется практически только на начальном этапе цикла ускорения. Изменение величины f_{\max} приводит и к изменению ее производной df/dt в области частот захвата в больших пределах, вплоть до $df/dt = 0$.

Конструктивно триммеры были выполнены в виде двух круглых пластин, которые приводились в движение электродвигателями. Диаметр пластин ~ 30 см, расстояние от торца дуанта могло регулироваться от 5 до 15 мм. Управление осуществляется с пульта ускорителя, контроль ведется непосредственно по величине частоты в диапазоне захвата. Влияние такой коррекции на увеличение количества захватываемых в режим ускорения частиц и, следовательно, на увеличение интенсивности пучка синхроциклотрона подробно описано в главе 7, п. 7.3.

Длительность выводимого пучка

Прирост энергии протона за оборот (темп ускорения) определяет прирост радиуса равновесной орбиты и, следовательно, скорость «наплыва» ее на внутреннюю мишень или выводное устройство. Так как размер пучка по радиусу составляет ~ 20 см, то время «наплыва» и определяет длительность τ выводимого из ускорителя пучка. Длительность τ зависит от величины производной df/dt в конце программы. При уменьшении величины df/dt за счет автофазировки уменьшается и прирост энергии за оборот и, следовательно, увеличивается длительность вывода.

Уменьшение величины df/dt производится путем приближения конечной величины частотной программы f_{\min} , где $df/dt = 0$, к частоте f_k , соответствующей частоте вывода протонов. Так, например, в синхроциклотроне на энергию 680 МэВ (Дубна) в вариаторе предусмотрена такая регулировка¹. В синхроциклотроне ПИЯФ нижняя частота программы f_{\min} также приближена к f_k и длительность взаимодействия пучка с внутренней мишенью составляет величину $\tau \approx 600\text{--}800$ мкс, а длительность выведенного из ускорителя пучка составляет $\tau \approx 300$ мкс. Дальнейшему увеличению τ посвящена глава 7, п. 7.1.

Оптимизация частотной программы $f(\alpha)$ была осуществлена следующим образом:

- на протяжении всего цикла ускорения за счет изменения формы лопаток индуктивных пакетов;
- на начальном участке программы за счет введения регулируемых триммеров в хвостовой части дуанта;
- на конечном участке программы в диапазоне вывода за счет приближения конечной частоты программы к частоте вывода.

В результате проведенной оптимизации частотной программы число оборотов ротора вариатора, соответствующее наибольшей интенсивности пучка, увеличилось с 300 до 500 об./мин.

6.7. Оптимизация амплитудной программы синхроциклотрона ПИЯФ

Как указывалось выше, увеличение амплитуды ускоряющего напряжения на дуанте, определяющее интенсивность ускоряемого пучка, при наличии запаса мощности ВЧ-генератора, ограничено в основном двумя причинами: пробоями в зазорах вариатора частоты и перегревом отдельных элементов вариатора.

Как было показано в главе 3, частотная программа ускорителя $f(\alpha)$ и его амплитудная программа $U(\alpha)$ связаны между собой определенной зависимостью. Поэтому в идеальном случае для реализованной в новом вариаторе программы $f_R''(\alpha)$ требуется вполне определенная зависимость амплитуды ускоряющего напряжения от угла поворота ротора вариатора. С другой стороны, для каждого значения частоты системы существует предельная величина напряжения в отдельных элементах вариатора, при котором не возникает пробоев и не происходит недопустимого перегрева этих элементов. Зная распределение напряжений по ВЧ-системе синхроциклотрона и исходя из допустимых предельных напряжений в каждом

¹ Ворожцов С. Б. и др. Препринт ОИЯИ Р9-88-472. Дубна, 1988. 8 с.

элементе системы, может быть рассчитана зависимость амплитуды предельного ускоряющего напряжения от частоты $U_{\max}(\alpha)$.

Для формирования оптимальной амплитудной программы, соответствующей реально существующей зависимости для частотной программы $f(\alpha)$, использовался способ оптимизации непосредственно по величине интенсивности выведенного пучка ускорителя¹. Для этого весь интервал частотной кривой $f(\alpha)$ разбивался на 32 угловых интервала. На каждом из этих интервалов амплитуда ВЧ-напряжения оперативно уменьшалась до тех пор, пока это уменьшение не начинало сказываться на интенсивности ускорителя. Минимально возможная величина амплитуды напряжения принималась за оптимальную в этом интервале частот. После такой коррекции амплитудной программы во всем диапазоне частот производилось увеличение амплитуды ускоряющего напряжения во всем цикле ускорения без нарушения формы полученной кривой. Такое увеличение производилось до достижения максимально возможной величины ускоряющего напряжения с одновременным увеличением оборотов вариатора и настройкой на максимум интенсивности. Сформированную таким образом амплитудную программу $U_{\text{opt}}(\alpha)$ можно интерпретировать как оптимальную. Действительно, полученный экспериментально закон изменения $U_{\text{opt}}(\alpha)$ обеспечивает ускорение частиц без дополнительных потерь при любой реально существующей частотной программе $f(\alpha)$, обеспечивая минимум необходимой мощности, подводимой к ВЧ-системе.

Оперативная регулировка формы амплитудной программы ускоряющего напряжения синхроциклотрона производится при помощи манипулятора. Так, например, на синхроциклотроне ЦЕРН использовалась традиционная схема регулирования – стабилизация с аналоговым задатчиком формы напряжения. Частичная регулировка анодной программы была осуществлена на синхроциклотроне ОИЯИ путем подачи импульсного напряжения на сетку проходной лампы на отдельных участках частотной программы^{2, 3}.

На синхроциклотроне ПИЯФ в режиме амплитудной оптимизации манипулятор осуществляет синхронное манипулирование анодного напряжения ВЧ-генератора, включая его на время ускорения T , в течение которого $df/d\alpha < 0$, и одновременно обеспечивает оперативную возможность регулировки закона изменения анодного напряжения методом широтно-импульсной модуляции [6, 7].

¹ *Енчевич И. В. и др.* Препринт ОИЯИ Р9-3805. Дубна, 1968. 12 с.

² *Енчевич И. В., Томилина Т. Н.* // Тр. Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1970. Т. 2. С. 248–253.

³ *Глазов А. А. и др.* Препринт ОИЯИ Р9-12620. Дубна, 1979. 15 с.

Блок-схема устройства приведена на рис. 6.21. Постоянное напряжение от выпрямителя (1) через проходной триод (2) и блок (6) подается к аноду ВЧ-генератора (7) ускоряющей системы синхроциклотрона (8, 9).

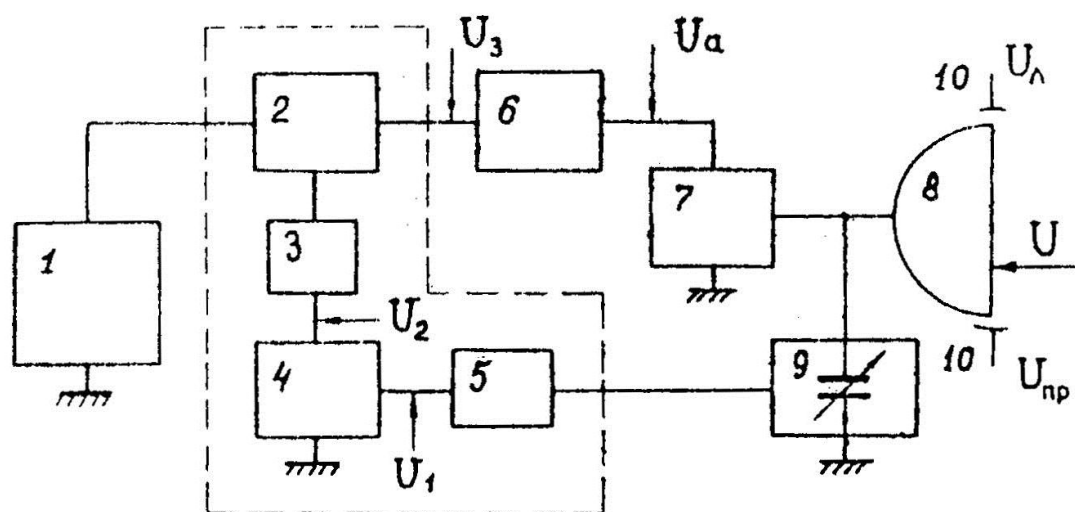


Рис. 6.21. Блок-схема регулировки ускоряющего напряжения:

1 – источник анодного питания – тиристорный выпрямитель; 2 – проходная лампа; 3 – разделительное устройство – оптронный преобразователь; 4 – широтно-импульсный модулятор; 5 – амплитудный модулятор – задатчик формы напряжения; 6 – обратный широтно-импульсный преобразователь – фильтр нижних частот; 7 – генератор синхроциклотрона; 8 – дуант; 9 – вариатор; 10 – измерители напряжения

Для управления работой триода используется модулятор (4), работающий по принципу широтно-импульсной модуляции с амплитудным модулятором (5), являющимся задающим источником формы напряжения. Так как проходная лампа (2) находится под высоким потенциалом, то для развязки его по напряжению от задающего блока используется высоковольтный оптронный преобразователь (3). В целом блоки 2–4 работают как манипулируемый широтно-импульсный преобразователь¹.

Основной особенностью предложенного способа регулирования является то, что в режиме широтно-импульсного преобразователя работает сам блок мощного высоковольтного манипулятора анодного питания синхроциклотрона.

Для восстановления на аноде генератора (7) аналогового сигнала U_a из промодулированного широтно-импульсным способом сигнала U_3 служит блок обратного преобразования (6). В качестве такого преобразователя использован фильтр нижних частот, отсекающий паразитные со-

¹ Куликов С. В., Чистяков Б. В. Дискретные преобразователи сигналов на транзисторах. М., 1972. 178 с.

ставляющие сигнала (составляющие с частотой следования тактовых импульсов и их высших гармоник, а также составляющие комбинационных частот) и пропускающий спектр модуляционных частот сигнала U_3 .

Применение принципа широтно-импульсной модуляции для изменения формы анодного напряжения мощного генератора синхротрона выгодно отличается от обычных способов амплитудной модуляции. Действительно, вследствие того что мощность блока проходных ламп соизмерима с мощностью генератора, ключевой режим работы блока проходных ламп, каскады которого работают в режимах насыщения или близких к нему, экономически целесообразен. Дополнительные преимущества вытекают из помехоустойчивости устройства с широтно-импульсной модуляцией, при которой не требуется стабилизации основных и вспомогательных источников питания и источников смещения каскадов блока (2). При этом уменьшается влияние наводок промышленной частоты и магнетронного эффекта накала, присущего мощным усилительным лампам, а также упрощается устройство разделителя (3), т. к. не требуется передачи аналоговой информации.

Использование принципа широтно-импульсного преобразования, охватывающего и мощные каскады манипулятора, позволило применить во всем мощном тракте питания генератора нестабилизированные источники анодного и сеточного напряжений. По этой же причине система для оптимизации амплитудной программы построена по простой схеме непосредственного регулирования без цепи обратной связи для стабилизации ускоряющего напряжения.

В качестве задатчика напряжения (5) для получения любого закона изменения амплитуды этого сигнала в заданном интервале времени использован генератор напряжения ступенчатой формы, осуществляющий аппроксимацию желаемой формы сигнала в виде совокупности 32-х последовательных дискретных ступеней с различными амплитудами. Схема автоматического смещения обеспечивает деление цикла ускорения T всегда на 32 равных временных интервала независимо от скорости вращения вариатора. Таким образом, изменяя амплитуду каждой ступени в отдельности, после соответствующего интегрирования можно воспроизвести аналоговый сигнал практически любой произвольной формы.

В качестве примера на рис. 6.22 приведены огибающие ВЧ-напряжений $U_n(t)$ и $U_{np}(t)$, полученные для измерения ускоряющего напряжения с емкостных делителей, расположенных слева и справа от щели дуанта, при соответствующем анодном напряжении $U_a(t)$ на генераторе. Реальные зависимости напряжений заменены гистограммами, имеющими 32 интервала по диапазону ускорения T в соответствии с числом ступеней регулировки в опорном задающем модуляторе.

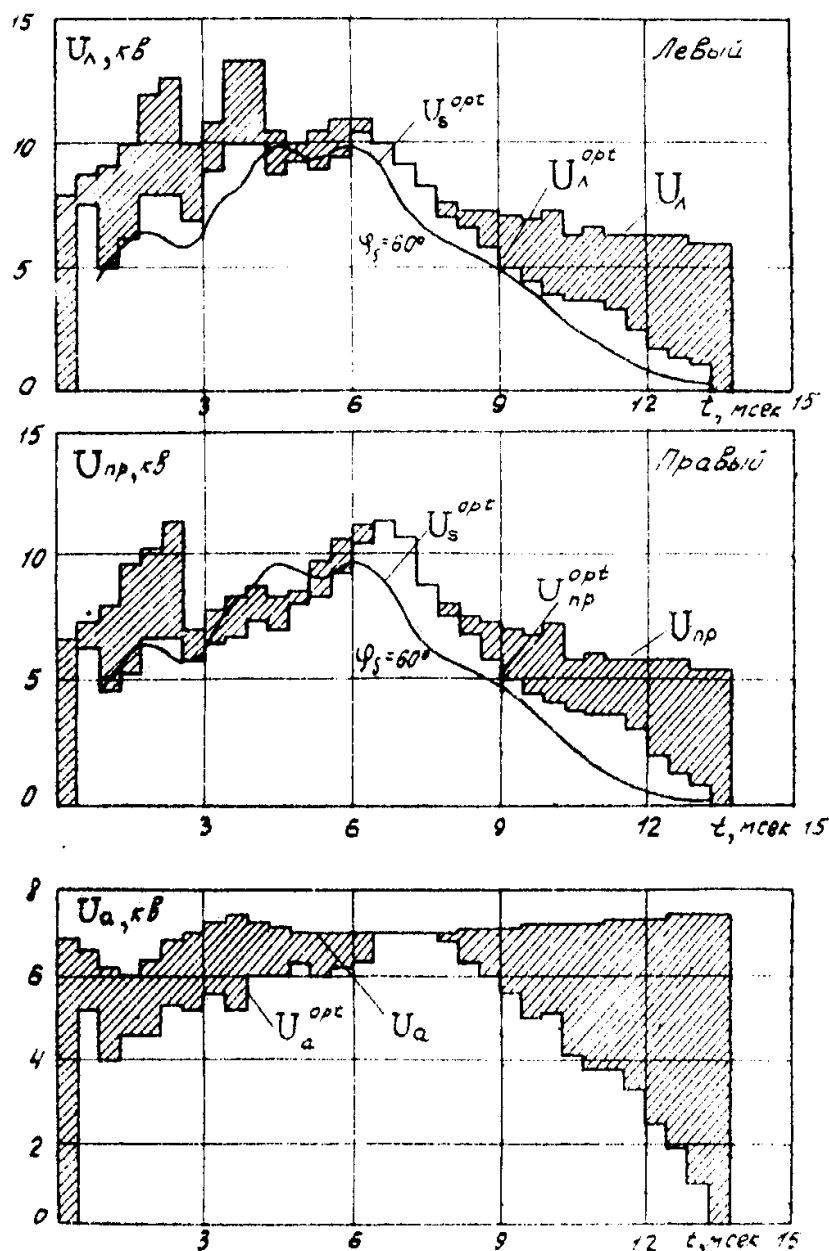


Рис. 6.22. Зависимости напряжений с измерителями амплитуды ускоряющего напряжения дуанта $U_{л}$, $U_{пр}$ и анодного напряжения $U_{а}$ от времени ускорения

Формы кривых $U_{л}$, $U_{пр}$ соответствуют амплитудной программе при практически постоянном напряжении на аноде генератора $U_{а}$ (некоторое изменение формы $U_{а}$ происходит из-за изменения нагрузки ВЧ-системы по диапазону). Форма кривых $U_{л}^{opt}$, $U_{пр}^{opt}$ соответствует оптимизации амплитудной программы непосредственно по выведенному пучку, полученной вышеописанным методом, а $U_{а}^{opt}$ – необходимой для этого форме напряжения на аноде генератора. Здесь же для сравнения приведена расчетная зависимость ускоряющего напряжения $U_{с}^{opt}$ при $\cos \varphi_s = 60^\circ$, соответствующая реальной частотной зависимости $f(\alpha)$.

Выброс амплитуды на начальном участке кривых $U_{л}^{opt}$, $U_{пр.}^{opt}$ обусловлен оптимизацией амплитуды в области частот захвата протонов в режим ускорения из ионного источника.

Таким образом, сравнение соответствующих кривых рис. 6.22 показывает, что введение оптимизации снижает примерно на 30 % величину мощности, рассеиваемой в вариаторах, что повышает надежность эксплуатации ВЧ-системы.

Применение системы регулирования амплитудной программы предоставляет также дополнительные возможности для оперативного определения допустимых пробивных напряжений на отдельных участках кривой, коррекции амплитудной программы в зависимости от «пробивного» состояния ВЧ-системы в периоды ее «тренировки» и эксплуатации, регулировки напряжения в районе захвата и т. п.

К сожалению, система оптимизации амплитудной программы была демонтирована во время модернизации манипулятора анодного питания синхроциклотрона, при переносе его из корпуса 2 в пульттовую корпуса 2а. Желательно, чтобы она была восстановлена.

6.8. Другие усовершенствования высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ

В ходе модернизации ВЧ-системы синхроциклотрона для обеспечения надежности и удобства эксплуатации был разработан ряд новых устройств.

- **Новый источник анодного питания** для генератора дуанта на 10 кВ, 80 А, выполненный по традиционной схеме 6-фазного выпрямителя на полупроводниковых диодах В112-25 с автотрансформаторной регулировкой по входной цепи (старый источник был выполнен на ртутных тиратронах типа ТР-1-40/15).
- **Новый генератор питания дуанта** выполнен на лампе ГУ-65А (вместо двух ламп ГК-5А – по проекту), работающей по схеме с заземленной сеткой. Все емкости: анодный разделительный конденсатор (9 500 пФ), емкостные делители обратной связи (2 700 : 5 400 пФ), регулируемый делитель для С-системы (160 пФ), блокировочные конденсаторы – выполнены в виде полированных латунных пластин с набором тефлоновых прокладок для подбора и изменения величины емкости. Мощность генератора – 500 кВ.
- **Новый манипулятор анодного питания.** Во всех синхроциклотронах между источником питания и генератором ВЧ-системы включен манипулятор анодного напряжения, проходные триоды которого работают как в режиме ключа, так и в режиме регуля-

тора анодного напряжения. Мощность манипулятора соизмерима с мощностью генератора и составляет 130 кВт.

Первоначально на синхроциклотроне ПИЯФ использовался манипулятор анодного напряжения, описанный в работах В. А. Алексеева и др.^{1,2}, выполненный на пяти лампах ГУ-23, работающих в параллель, с высоковольтной трансформаторной развязкой по сеточному входу управления манипулятором. Новый манипулятор выполнен на одной лампе ГУ-68А с высоковольтной оптронной развязкой по входу.

6.9. Система управления синхроциклотроном ПИЯФ (СУФ)

Разработанная нами система управления, синхронизации и контроля за работой ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ (СУФ) [8–10] выполняет следующие основные функции:

1) задает интервалы программы ускорения, управляя работой манипулятора анодного питания генератора ВЧ-системы. Этот интервал манипуляции задается импульсами с фотодатчика угла поворота ротора вариатора и захватывает диапазон частот от 30 до 13 МГц. С помощью вспомогательных синхроимпульсов скважность и период манипуляции можно менять в зависимости от требований режима ускорителя;

2) осуществляет управление и синхронизацию вспомогательных устройств ускорителя: генератора растяжки, генератора сброса, блока импульсной работы ионного источника, работу профилометров, системы защиты от пробоев и т. п.;

3) осуществляет синхронизацию всего комплекса физической аппаратуры, требующей совместной работы с ускорителем;

4) контролирует работу всех устройств ВЧ-системы ускорителя.

СУФ вырабатывает большое число стандартизованных синхроимпульсов с контролируемой привязкой к любому мгновенному значению частоты ускоряющего напряжения, т. е. к энергии ускоряемого пучка с точностью 10^{-3} . Функциональные возможности СУФ позволяют получить различные режимы работы ускорителя: режим накопления, режим поочередной работы на внутреннюю и наружную мишени, имеется возможность реализации режима с пересчетом циклов ускорения (пропуск циклов в любой очередности), а также могут осуществляться внешнее разрешение и запреты на любое число циклов или интервал времени работы ускорителя.

В режиме стабилизации дозы получения профилей протонного пучка и в некоторых других режимах работы ускорителя включение и отклю-

¹ Алексеев В. А. и др. // Тр. Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1968. С. 132.

² Алексеев В. А. и др. // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 811. С. 2459–2462.

чение пучка производится за счет «обрезания» начала частотной программы, предотвращающей захват протонов в режим ускорения без снятия анодного напряжения с ускоряющей системы.

Некоторые блоки и режимы работы СУФ адаптированы к автоматическому режиму работы с управлением от персонального компьютера.

СУФ конструктивно и функционально состоит из отдельных блоков, для обозначения которых приняты следующие аббревиатуры:

БИК – большая ионизационная камера;

БСА – блок стабилизации амплитуды ВЧ;

БСИ – блок стабилизации интенсивности;

ГИПИМО – генератор импульсного пилообразного тока – предварительный модулятор;

ГР – генератор растяжки;

ИПФЭ – источник питания фокусирующего электрода;

ИСВ – источник смещения на вариаторе;

ИСД – источник смещения на дуанте;

ЛЗ – линии задержки ВЧ;

ЛКР – логический коммутатор режимов;

МСФ – анодный манипулятор;

МОД – оконечный модулятор генератора растяжки;

ПИ – пересчет импульсов;

ПИФ – блок привязки к фазе ВЧ;

СЕЛ – частотный селектор;

СУФ – система управления синхроциклотроном (фазотроном);

УД – угловые датчики;

Уп. ЛЗ – управление линиями задержки ВЧ;

ФИ – формирователь импульсов;

ФЭ – фокусирующий электрод;

Σ – сумматор.

Остановимся на кратком описании отдельных блоков СУФ и режимов работы синхроциклотрона.

Блоки общего назначения

Блок «Угловые датчики» – УД

Предназначен для синхронизации периодов манипуляции ускоряющего ВЧ-напряжения с оборотами вариатора. УД установлены на промежуточном валу вариатора и состоят из датчиков «Пуск» и «Стоп», задающих интервалы программы ускорения и управляющих работой манипулятора анодного питания генератора ВЧ-системы. Оба датчика выполнены на электронных лампах 6Н16Б, т. к. находятся в активной зоне

синхроциклотрона. Выходные сигналы с датчиков, именуемые в дальнейшем «Пуск» и «Стоп», по кабельным линиям поступают на СУФ.

Блок «Формирователь импульсов» – ФИ-4

Предназначен для формирования из входных сигналов угловых датчиков нормированных сигналов уровня ТТЛ длительностью ≈ 10 мс, которые используются во всех блоках СУФ. В блоке ФИ-4 предусмотрена возможность организации режима «Проверка» с фиксированной частотой 25 или 50 Гц. Режим «Проверка» используется для наладки и проверки работы СУФ при отключенном вариаторе.

Блок «Перерасчет импульсов» – ПИ-2

Предназначен для изменения частоты следования манипуляционных циклов ускорения от 50 до 0,5 Гц с шагом 0,5 Гц. Основной режим работы синхроциклотрона – вывод протонного пучка с частотой 50 Гц. В отдельных случаях необходим режим работы синхроциклотрона с пониженной частотой вывода. Для этого необходимо, чтобы частота следования импульсов «Пуск» и «Стоп» могла дискретно изменяться. Эту функцию выполняет блок ПИ-2, имеющий коэффициент деления частоты следования пусковых и стоповых импульсов от 1 до 100.

Блок «Коммутатор „Растяжка“» – ЛКР

Это электронный коммутатор сигналов селекторов для организации таких режимов синхроциклотрона, как растяжка пучка и нейтронный генератор ГНЕЙС. Наличие этого блока позволяет исключить переключение ВЧ-кабелей при смене режимов синхроциклотрона.

Блок «Сумматор» – Σ

В этом блоке собираются основные сигналы управления, такие как «Пуск» и «Стоп», а также дополнительные сигналы от систем защиты от пробоев дуанта и вариатора: при работе профилометров, системы стабилизации интенсивности пучка и др. Выходной сигнал блока непосредственно управляет МСФ и, следовательно, ускоряющим ВЧ-напряжением. Предусмотрена возможность внешнего управления выходным сигналом блока, при этом синхронизация с оборотами вариатора сохраняется.

Блок «Частотный селектор» – СЕЛ

Предназначен для получения частотной отметки (в виде импульса на осциллографе) на определенной мгновенной частоте программы ускоряющего ВЧ-напряжения $f(t)$.

Четыре блока селекторов, работающих на разных участках частотной программы, предназначены для синхронизации работы отдельных устройств с ВЧ-программой синхроциклотрона: ионного источника, системы растяжки пучка, системы ГНЕЙС и т. п., а также для измерения мгновенного значения частоты при их работе.

Основные режимы работы синхроциклотрона ПИЯФ

Управление системой растяжки пучка

Сюда входят блоки СЕЛ, МОД, Уп. ЛЗ, ГИПИМО, источник питания с $I_{\max} = 12$ А. Все эти блоки входят в СУФ и расположены на пульте управления синхроциклотрона, в корпусе 2а.

СЕЛ осуществляет привязку включения ГР к необходимой частоте основного ускоряющего ВЧ-напряжения (~ 30 МГц). Уп. ЛЗ позволяют дискретно управлять синхронизацией ВЧ-напряжения ГР с основным ВЧ-напряжением, а также осуществлять синхронизацию с частотой пучка. Изменение частоты ГР осуществляется изменением тока подмагничивания ферритовых вариаторов, расположенных непосредственно в ГР. Диапазон перестройки ГР – 13,4–13,28 МГц. Функцию управления законом изменения частоты ГР выполняет ГИПИМО. Результирующая форма тока в ферритовых вариаторах – пилообразная. Длительность импульса тока до 12 мс регулируется, и тем самым изменяется длительность растянутого пучка. Для уменьшения рассеиваемой мощности в линии питания С-электрода ГР работает в импульсном режиме (~ 50 Гц) со скважностью ~ 2 . Для этого на управляющие сетки ламп из блока МОД подается отрицательное смещение прямоугольной формы 200 В. Подробно система описана в главе 7, п. 7.1.

Управление системой однооборотного сброса пучка протонов на мишень ГНЕЙС

Система управления высоковольтным импульсным (амплитуда ~ 100 кВ) генератором ГНЕЙС состоит из блоков СЕЛ и ПИФ. Для осуществления однооборотного сброса пучка протонов на мишень необходимо включить высоковольтный импульсный генератор в момент нахождения пучка на определенном радиусе и определенном азимуте С-электрода. Функцию привязки к радиусу выполняет блок СЕЛ ($f \approx 13,47$ МГц), а к азимуту – блок ПИФ. Оба блока имеют плавную ре-

гулировку по частоте (радиусу) и по фазе (азимуту). Подробно система описана в главе 7, п. 7.2.

Управление системой фокусировки

Трехэлектродная схема электростатической фокусировки ионного источника требует подачи на центральный ФЭ большого положительного потенциала (до 25 кВ). Для ограничения развития разряда Пеннинга, уменьшения мощности источника и нагрева электрода используется импульсный источник с длительностью импульса ≈ 1 мс. Для синхронизации источника питания с основной ВЧ-программой применяется СЕЛ ФЭ, работающий в диапазоне 30–29 МГц, а для оперативной корректировки формы частотной программы $df/d\alpha$ (в области захвата) используются дистанционно управляемые триммерные конденсаторы, подключенные к задней части дуанта. Оптимальное значение $F_{\max} = 29,67$ МГц. При этом $dF_{\max}/dt = 0$. Подробно система фокусировки описана в главе 7, п. 7.3.

Стабилизация интенсивности протонного пучка

Стабилизация интенсивности осуществляется методом интерполяции. В блоке БСИ импульсный ток с БИК интегрируется и сравнивается с опорным током. В зависимости от результата сравнения последующий (или последующие) цикл ускорения протонов пропускается или нет. Пропуск цикла ускорения осуществляется за счет «обрезания» частотной программы в области захвата протонов 30–29 МГц.

Такой режим работы используется при облучении больных для стабилизации дозы облучения, получаемой пациентом.

Перечислим основные изменения и усовершенствования ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона по сравнению с первоначальным проектом.

1. Предложена и введена в эксплуатацию принципиально новая симметричная система связи генератора с ускоряющей системой синхроциклотрона. Получено авторское свидетельство на изобретение.

2. Сконструирован и изготовлен в мастерских ПИЯФ новый вариатор частоты с новой геометрией лопаток ротора, боковыми дисками заземления ротора по высокой частоте, новой конструкцией П-образного крепления индуктивных пакетов и новой конструкцией блокировочного конденсатора.

3. Разработан и изготовлен новый генератор питания ускоряющей системы на новых конструктивных элементах и радиолампах.

4. Разработан и изготовлен новый источник анодного питания для генератора ускоряющей системы с заменой ртутных тиратронов на полупроводниковые тиристоры.

5. Разработан и изготовлен принципиально новый манипулятор анодного питания с переносом его из активной зоны в электрощитовое помещение пульта управления синхроциклотрона.

6. Разработана система дистанционного контроля за механическими смещениями ротора вариатора и деформацией его лопаток из-за их нагрева в процессе эксплуатации.

7. Создана автоматическая система контроля и предотвращения РВР и пробоев в вариаторе и дуанте.

8. Скорректирована форма частотной программы ускоряющего напряжения на дуанте, в частности введена регулировка производной программы df/da в диапазоне частот захвата, что привело к значительному увеличению интенсивности синхроциклотрона.

9. Разработана оригинальная система регулировки и оптимизации формы амплитуды ускоряющего ВЧ-напряжения на дуанте, что позволило оптимизировать процесс ускорения и уменьшить потери ВЧ-мощности в системе. Получено авторское свидетельство на изобретение.

10. Полностью разработана и введена в эксплуатацию система контроля и управления всеми подсистемами ВЧ ускоряющей системы – СУФ.

После проведения программы модернизации время работы ускорителя на физический эксперимент достигало 6 000 часов в год при одной основной ревизии вариатора частоты (в основном замена подшипников) и одной профилактической ревизии.

Публикации

1. *Абросимов Н. К., Волченков В. А., Елисеев В. А., Рябов Г. А., Чернов Н. Н.* Эффективный вывод протонного пучка синхроциклотрона на 1 ГэВ ФТИ СССР // ЖТФ. 1970. Т. 40. С. 2593–2596.
2. *Абросимов Н. К., Волченков В. А., Елисеев В. А., Рябов Г. А., Чернов Н. Н.* Вывод протонного пучка синхроциклотрона ФТИ им. А. Ф. Иоффе на энергию протонов 1 ГэВ // Тр. II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1972. Т. 2. С. 182–184.
3. *Абросимов Н. К., Рябов Г. А.* Эффективность регенеративного вывода пучка из синхроциклотрона // Тр. IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1975. Т. 1. С. 250–253.
4. *Abrossimov N. K., Eliseev V. A., Volchenkov V. A., Riabov G. A., Chernov N. N.* A 30 % Beam Extraction on the 1 GeV Synchrocyclotron at Gatchina // NIM. 1975. V. 126. P. 221–230.

5. **Абросимов Н. К., Волков В. К., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Чернов Н. Н.** Конструкция вариаторов частоты ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР // Отчет ЛИЯФ № 52. Гатчина: ЛФТУ, 1971. 12 с.
6. **Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Покровский А. С.** Оптимизация амплитудной программы синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР. Препринт ЛИЯФ 488. Л., 1979. 17 с.
7. Устройство для регулирования и оптимизации амплитудной программы ускоряющего напряжения синхроциклотрона: а. с. № 475948 с приоритетом от 17.03.1973 / **Н. К. Абросимов, А. В. Куликов, Г. Ф. Михеев.** Бюл. № 27, 1973. С. 227.
8. **Девятериков Р. П., Куликов А. В., Лавров В. В., Михеев Г. Ф.** Система управления синхроциклотрона ФТИ АН СССР // Тр. II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1972. Т. II. С. 234–236.
9. **Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Герасимов А. М.** Информационно-измерительная система синхроциклотрона на 1 ГэВ ЛИЯФ АН СССР // Тр. I Всесоюзного совещания по автоматизации исследований в ядерной физике. Киев, 1976. С. 108–112.
10. **Герасимов А. М., Куликов А. В., Михеев Г. Ф.** Автоматизированная система управления синхроциклотрона // Управляемые системы и машины. Киев, 1978. Вып. 1. С. 116–119.

Глава 7

Разработка и создание новых систем для комплекса синхроциклотрона ПИЯФ

7.1. Система увеличения длительности импульса протонного пучка синхроциклотрона ПИЯФ (система временной растяжки)

Одним из важных параметров ускоряемого пучка синхроциклотрона является его временная структура. Пучок имеет микроструктуру, обусловленную частотой обращения ускоряемых протонов в магнитном поле ускорителя, и макроструктуру, обусловленную импульсным характером работы синхроциклотрона. Физические исследования, проводимые на пучках синхроциклотрона, предъявляют различные требования к временной структуре протонных пучков и пучков вторичных частиц. Так, для экспериментов, в которых используется электронная регистрирующая аппаратура, необходимы практически непрерывные во времени, не имеющие импульсной структуры пучки. В экспериментах по измерению времени жизни короткоживущих частиц, таких как π - и K -мезоны [1], необходимы растянутые во времени пучки, имеющие малую длительность импульсов микроструктуры. В экспериментах с использованием для измерения энергии частиц методики времени пролета [2] необходимы импульсные пучки, у которых вся интенсивность сконцентрирована в одном импульсе микроструктуры.

Для обеспечения преобразований временной структуры пучков в районе выводного радиуса синхроциклотрона ПИЯФ был установлен так называемый *C*-электрод. В отличие от обычно используемой на других синхроциклотронах конструкции *C*-электрода на синхроциклотроне ПИЯФ используется предложенная в нашем институте конструкция *C*-электрода с удаленной боковой стенкой. Такая конструкция позволяет использовать один и тот же электрод как для временной растяжки пучка, так и для однооборотного сброса пучка на внутреннюю нейтронообразу-

ющую мишень. В первом случае обе пластины запитываются синфазно от одного и того же ВЧ-генератора, во втором случае пластины запитываются импульсами высокого напряжения, находящимися в противофазе. С-электрод может быть использован также для временной растяжки внутреннего пучка за счет резонансной раскачки вертикальных бетатронных колебаний.

При обычном режиме работы синхроциклотрона ускоренный протонный пучок, поступающий на внутреннюю мишень или в выводную систему, носит импульсный характер. Для характеристики временной структуры пучка синхроциклотрона вводят коэффициент заполнения m (duty factor), определяемый как отношение длительности макроимпульса пучка Δt к периоду их следования (периоду модуляции T_M):

$$m = \frac{\Delta t}{T_M}.$$

У всех синхроциклотронов величина m лежит в пределах 1–5 %. Так, например, для синхроциклотрона ПИЯФ длительность макроимпульса выведенного протонного пучка Δt составляет ~ 300 мкс, а период модуляции $T_M \approx 20$ мс, что соответствует коэффициенту временного заполнения пучка $m = 1,5$ %. Такая малая величина m бывает неприемлема для большинства физических экспериментов, проводимых на протонных и вторичных пучках. Так, при использовании электронной регистрирующей аппаратуры возникает проблема, связанная с наличием мертвого времени детекторов и электронных регистрирующих устройств. При регистрации частиц детектором с мертвым временем τ исходный поток частиц превращается в разреженный поток, в котором временные интервалы между частицами не могут быть меньше τ , что приводит к потере части регистрируемых частиц и искажению формы измеряемых временных распределений¹. Эта проблема усиливается с увеличением интенсивности регистрируемых пучков, поэтому желательно, чтобы протоны и вторичные частицы поступали на мишень не импульсно, а непрерывно, как это имеет место, например, в циклотронах, в которых $m = 100$ %. В связи с этим практически на всех синхроциклотронах используются специальные системы временной растяжки пучка, которые преобразуют ускоряемые сгустки (банчи) протонов в непрерывную, или почти непрерывную, последовательность протонов, поступающих на внутреннюю или внешнюю мишень.

Обзор существующих методов временной растяжки пучка в синхроциклотронах дан в работе Л. М. Онищенко², где подробно рассмотрены

¹ Калашикова В. И., Козодоев М. С. Детекторы элементарных частиц. М., 1966. 253 с.

² Онищенко Л. М. Препринт ОИЯИ Р9-7836. Дубна, 1974. 27 с.

возможные способы временной растяжки пучка в синхроциклотроне, которые включают в себя метод бетатронного ускорения, методы радиального и вертикального отклонений пучка за счет воздействия на него магнитным или электрическим полем, метод растяжки на подвижной (вибрирующей) мишени, медленное «доускорение» пучка с помощью С-электрода и другие.

Исторически первым вариантом системы временной растяжки пучка для внутренней мишени, который мы рассматривали при сооружении синхроциклотрона ПИЯФ, могут служить так называемые катушки Данилова – Кима. С помощью этих катушек, устанавливаемых на верхнем и нижнем полюсах магнита, на последних радиусах в зоне вывода пучка создается первая гармоника вертикальной составляющей магнитного поля $B^{(1)}(t)$ с изменяющейся во времени амплитудой. Под воздействием этой гармоники орбита сгустка пучка может быть сдвинута по радиусу на величину

$$x = \frac{rB^{(1)}}{nB_0}.$$

Пучок ускоряется до конечного радиуса r_k , соответствующего конечной энергии W_k , и затем, за счет медленного увеличения амплитуды первой гармоники, наводится на мишень, расположенную на радиусе $R_M = r_k + A_{\text{бет.}} + A_{\text{син.}}$, где $A_{\text{бет.}}$ и $A_{\text{син.}}$ – максимальные амплитуды радиальных бетатронных и синхротронных колебаний пучка. Особенностью такой системы является исчезновение в пучке, взаимодействующем с мишенью, микроструктуры, обусловленной резонансным способом ускорения пучка с частотой, равной частоте обращения пучка. Серьезным недостатком является невозможность использования подобной системы для выводимого из камеры протонного пучка, т. к., с одной стороны, трудно одновременно разместить в камере магнитный канал и катушки, а с другой – введение первой гармоники магнитного поля может привести к нарушению регенеративного процесса вывода. Система катушек Данилова – Кима первоначально использовалась для растяжки пучка, направляемого на внутреннюю мезонообразующую мишень, на синхроциклотронах ЦЕРН¹ и ОИЯИ².

В связи с созданием на синхроциклотроне ПИЯФ эффективной системы вывода пучка из ускорительной камеры с коэффициентом вывода 30 % оказалось более выгодным отказаться от внутренних мишеней для получения пучков π -мезонов и полностью перейти на внешние мезонообразующие мишени. Поэтому основным требованием к выбору

¹ *Susini A. et al. // CERN. MSC/PR/2814/. 7 apr. 1972. 17 p.*

² *Данилов В. И. и др. // Атомная энергия. 1965. Т. 19. Вып. 3. С. 289–292.*

метода временной растяжки пучка на синхроциклотроне ПИЯФ стала его применимость к растяжке выведенного протонного пучка.

В настоящее время основным способом временной растяжки пучка в синхроциклотронах, одинаково применимым как к внутреннему, так и к выведенному протонному пучку, является способ медленного синхроциклотронного доускорения пучка перед его поступлением на внутреннюю мишень или в выводную систему при помощи дополнительного ускоряющего *C*-электрода^{1,2}. Такие системы *C*-растяжки в их разных модификациях использовались (или используются) практически на всех синхроциклотронах мира.

Требования к системе растяжки пучка с помощью *C*-электрода

Схема работы системы временной растяжки пучка с помощью *C*-электрода такова. Ускоряемый сгусток протонного пучка с помощью основного дуанта ускоряется до энергии $W = W_k - \Delta W$, соответствующей радиусу $r = r_k - (A_{\text{бет.}} - A_{\text{син.}})$. Здесь

$$\Delta W = \left[(1-n) \left(1 - \frac{E_0^2}{(E_0 + W_k)^2} \right) \right] \frac{(E_0 + W_k)}{r_k} (A_{\text{бет.}} + A_{\text{син.}}), \quad (7.1)$$

$A_{\text{бет.}}$ в синхроциклотроне с открытым ионным источником определяется начальными условиями захвата, $A_{\text{син.}}$ – максимальным энергетическим разбросом ускоряемых частиц в сепаратрисе:

$$\Delta E_{\text{max}} = \pm 2 \sqrt{\frac{e V E_s}{\pi K} (\sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s)}. \quad (7.2)$$

Соответствующая ему амплитуда радиальных колебаний

$$A_{\text{син.}} = \frac{r}{(1-n)\beta^2} \frac{\Delta E_{\text{max}}}{E}.$$

Для синхроциклотрона ПИЯФ максимальная амплитуда бетатронных колебаний $A_{\text{бет.}}$ равна 8 см, а вычисленная по формуле (7.1) максимальная амплитуда синхротронных колебаний $A_{\text{син.}}$ при амплитуде напряжения на дуанте $V = 10$ кВ равна 0,6 см.

После ускорения сгустка до энергии W основной генератор, питающий дуант, выключается, и дальнейшее медленное ускорение осуществляется уже за счет *C*-электрода. Время взаимодействия пучка с мишенью, или время вывода пучка с помощью выводной системы,

¹ *Huxtable G., Rogers P. S., Russell F. M. // NIM. 1963. V. 23, No. 2. P. 357–358.*

² *Глазов А. А. и др. Препринт ОИЯИ Р9-87-171. Дубна, 1987. 13 с.*

$$\Delta t_c = \frac{\Delta W T_{\text{обр.}}}{2e V_c \sin \frac{\varphi}{2} \cos (\varphi_s)_c},$$

где V_c и $(\varphi_s)_c$ – амплитуда ускоряющего напряжения и равновесная фаза C -электрода, а φ – его угловая протяженность. «Медленность» темпа ускорения с помощью C -электрода и, следовательно, увеличение Δt_c могут быть обеспечены либо за счет уменьшения по сравнению с основным дуантом амплитуды ускоряющего напряжения на C -электроде V_c , либо за счет уменьшения $\cos (\varphi_s)_c$, либо за счет одновременного уменьшения того и другого.

Частота ускоряющего напряжения, при которой происходит переход от ускорения основным дуантом к ускорению C -электродом,

$$f_{\text{пер.}} = \frac{e c B(R)}{2\pi (E_0 + W_k - \Delta W)}.$$

Ширина диапазона частот (девиация частоты) C -электрода

$$\Delta f = f_{\text{пер.}} - f_k.$$

Основная проблема, связанная с созданием такой системы временной растяжки пучка, состоит в переходе от одного режима ускорения к другому без потерь ускоряемых частиц. Для этого необходимо, чтобы фазовый объем пучка, ускоряемого основным дуантом, при переходе попал внутрь сепаратрисы C -электрода. Обычно уменьшение темпа набора энергии с помощью C -электрода осуществляется за счет выбора малой величины $\cos (\varphi_s)_c$ ¹. В этом случае при переходе к режиму ускорения с помощью C -электрода равновесная фаза частицы должна измениться скачком от значения $(\varphi_s)_{\text{дуанта}}$ к значению $(\varphi_s)_c$. Скачкообразное изменение равновесной фазы приведет к возбуждению синхротронных колебаний как по фазе, так и по энергии, что, в свою очередь, для обеспечения перехода от одного режима к другому без потерь потребует увеличения амплитуды ускоряющего напряжения на C -электроде. При этом пропорционально квадрату амплитуды ускоряющего напряжения увеличивается и мощность генератора C -электрода.

Снижение напряжения и мощности генератора C -электрода можно достичь при переходе к режиму многократного синхроциклотронного доускорения, при котором остановленный на радиусе $r = r_k - (A_{\text{бет.}} - A_{\text{син.}})$ пучок перезахватывается в C -электрод не один раз, а многократно. Частотная программа C -электрода при таком режиме имеет вид свипирующей

¹ Онищенко Л. М. Фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля. Дис. ... д. ф.-м. н. Дубна, 1995. 63 с.

щего сигнала с девиацией Δf_c , период модуляции которого в 10–50 раз меньше T_m . При таком режиме амплитуда на C -электроде уменьшается в несколько раз. Однако снижается и эффективность растяжки. Такие системы использовались на синхроциклотронах в Орсе¹, Чикаго², ЦЕРН³.

Отметим способ растяжки, основанный на принципе стохастического доускорения⁴, при котором напряжение на C -электроде изменяется случайным образом, а также способ фазового смещения, механизм которого описан А. А. Коломенским и А. Н. Лебедевым, при котором частота ускоряющего напряжения на C -электроде модулируется в направлении не уменьшения, а увеличения частоты $\frac{df_c}{dt} > 0$. По данным, приведенным в работе Линдбака⁵, эффективность такого режима соизмерима с режимом многократного синхроциклотронного «доускорения», ~ 30–50 %.

При разработке системы временной растяжки пучка для синхроциклотрона ПИЯФ с целью уменьшения набора энергии за оборот мы пошли по пути уменьшения амплитуды ускоряющего напряжения C -электродов. В этом случае переход можно осуществить при равенстве равновесной фазы C -электродов и основного дуанта

$$(\varphi_s)_c = (\varphi_s)_{\text{дуанта}}. \quad (7.3)$$

Такой переход уже не вызовет дополнительной раскачки радиально-фазовых колебаний частиц пучка. При этом необходимо обратить внимание на то обстоятельство, что из-за затухания фазовых колебаний частиц пучка в процессе ускорения от начальной до конечной энергии размер фазового объема пучка может оказаться существенно меньше размера сепаратрисы основного дуанта. В этом случае условием перехода от одного режима ускорения к другому без потерь является равенство энергетического размера сепаратрисы C -электродов энергетическому размеру фазового объема пучка в конце цикла ускорения. В таком случае необходимое ускоряющее напряжение C -электродов может оказаться значительно ниже.

Внутри сепаратрисы основного дуанта фазовая траектория, охватывающая фазовый объем пучка, определяется точками поворота траектории φ_{\min} и φ_{\max} , которые связаны между собой условием

$$\sin \varphi_{\max} - \sin \varphi_{\min} - (\varphi_{\max} - \varphi_{\min}) \cos \varphi_s = 0. \quad (7.4)$$

¹ Cabrespine A. // Comptes Rendus. 1960. V. 250, No. 14. P. 2544; J. Phys. et Radium. 1960. V. 215. P. 332.

² Molthen E. H. // NIM. 1964. V. 29. P. 29.

³ Levy Ph. // CERN Int. Rep. MSC-71-1. Febr. 1971. P. 17.

⁴ Celler R. and Scmitter K. H. // CERN Int. Rep. 58-13. 1958. P. 15.

⁵ Lindbak S. // CERN Int. Rep. MSC-71-1. Febr. 1971. P. 23.

Равновесная фаза φ_s может быть найдена из выражения

$$\cos \varphi_s = -\frac{3E_s N}{eVK} \frac{1}{f_s^2} \left(\frac{df_s}{d\alpha} \right)_{\text{дуанта}}.$$

Задавая φ_{\min} , можно из условия (7.4) определить φ_{\max} и затем размеры фазового объема пучка по координатам φ и E , которые определяются как

$$\Delta\varphi = \varphi_{\max} - \varphi_{\min};$$

$$(\Delta E_{\max})_{\text{фаз.}} = \pm \sqrt{\frac{2eVE_s}{\pi K} [\sin \varphi_s - \sin \varphi_{\min} - (\varphi_s - \varphi_{\min}) \cos \varphi_s]}.$$

Разброс по фазам в ускоренном пучке связан с длительностью импульса микроструктуры пучка соотношением

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta t_{\min}}{T_{\text{обр.}}}$$

Находя $\Delta\varphi$ из измерений длительности импульсов микроструктуры пучка и полагая приближенно $\varphi_{\min} \cong \varphi_s - \frac{\Delta\varphi}{2}$, можно определить величину разброса по энергии в фазовом объеме пучка $(\Delta E_{\max})_{\text{фаз.}}$ и, приравнявая ее к величине разброса по энергии в сепаратрисе C -электрода (7.2), определить минимальную величину необходимого напряжения на C -электроде:

$$(V_c)_{\min} = \frac{V [\sin (\varphi_s)_c - \sin \varphi_{\min} - [(\varphi_s)_c - \varphi_{\min}] \cos (\varphi_s)_c]}{2 [\sin (\varphi_s)_c - (\varphi_s)_c \cos (\varphi_s)_c] \sin \frac{\varphi}{2}}. \quad (7.5)$$

Здесь $(\varphi_s)_c$ – равновесная фаза C -электрода, определяемая выражением

$$\cos (\varphi_s)_c = -\frac{E_s}{2eV_c K \sin \frac{\varphi}{2}} \frac{1}{f_s^2} \left(\frac{df_s}{dt} \right)_c.$$

Таким образом, для того чтобы обеспечить переход от ускорения основным дуантом к ускорению с помощью C -электрода без потерь пучка, нужно при переходе «посадить» сепаратрису C -электрода на фазовый объем пучка. Этого можно достичь, если за счет введения синхронизации между частотой и фазой напряжения на основном дуанте и напряжения на C -электроде будет обеспечено равенство равновесной фазы C -электрода и равновесной фазы основного дуанта. При этом напряжение на C -электроде должно быть больше минимального, определенного выражением (7.5), $V_c > (V_c)_{\min}$.

Кинетическую энергию перехода от ускорения основным дуантом к ускорению с помощью C -электрода мы выбрали равной 970 МэВ. Это

соответствует радиусу орбиты протонов 310 см и частоте ускоряющего напряжения в момент перехода 13,4 МГц.

По данным, приведенным в главе 3, в конце цикла ускорения величина производной частотной программы основного дуанта равна 0,15 МГц/град. Отсюда в соответствии с формулой (7.4) при амплитуде ускоряющего напряжения 10 кВ равновесная фаза основного дуанта оказывается равной 1,3 рад. Измеренная длительность импульса микроструктуры пучка при этом составляет около 10 нс, и, следовательно, разброс фаз в ускоренном пучке составляет 0,8 рад. Отсюда в соответствии с формулой (7.5) необходимая минимальная амплитуда ускоряющего напряжения на *C*-электроде оказывается равной 0,6 кВ.

Исходя из этих условий, в ПИЯФ была реализована принципиально новая модификация способа временной растяжки пучка при помощи *C*-электрода [3–7], основные преимущества которого:

- 100%-ный перезахват ускоряемых частиц из режима ускорения основным дуантом в режим ускорения *C*-электродом;
- малая величина ускоряющего напряжения на *C*-электроде;
- малая мощность генератора *C*-системы за счет введения ферритового вариатора.

Конструкция и блок-схема системы временной растяжки пучка с помощью *C*-электрода синхроциклотрона ПИЯФ

Конструкция *C*-электрода синхроциклотрона ПИЯФ изображена на рис. 7.1. *C*-электрод состоит из двух дугообразных пластин с угловой протяженностью 60° и шириной 25 см. Внутренний радиус пластин – 304 см, наружный – 329 см. В отличие от обычно используемой формы *C*-электрода, в которой обе пластины соединены между собой задней вертикальной стенкой, в нашем случае эта стенка удалена, что обеспечило возможность использовать пластины *C*-электрода также и в качестве вертикального дефлектора. Каждая пластина в отдельности установлена внутри камеры на трех штоках. Боковые штоки представляют собой керамические изоляторы. Центральные штоки служат для подачи напряжения на *C*-электрод и проходят сквозь стенки вакуумной камеры через керамические изоляторы, заполненные инертным газом. Конструкция крепления *C*-электрода позволяет регулировать радиальное и вертикальное положение пластин без нарушения вакуума в камере. Возможное перемещение пластин в радиальном направлении составляет 40 см, а расстояние между пластинами может изменяться от 6 до 18 см. Регулирующие элементы снабжены указателями положения пластин (6, рис. 7.1). Конструкция изоляторов *C*-электрода обеспечивает его работу также

и в режиме вертикального дефлектора при импульсном напряжении на пластинах до 100 кВ.

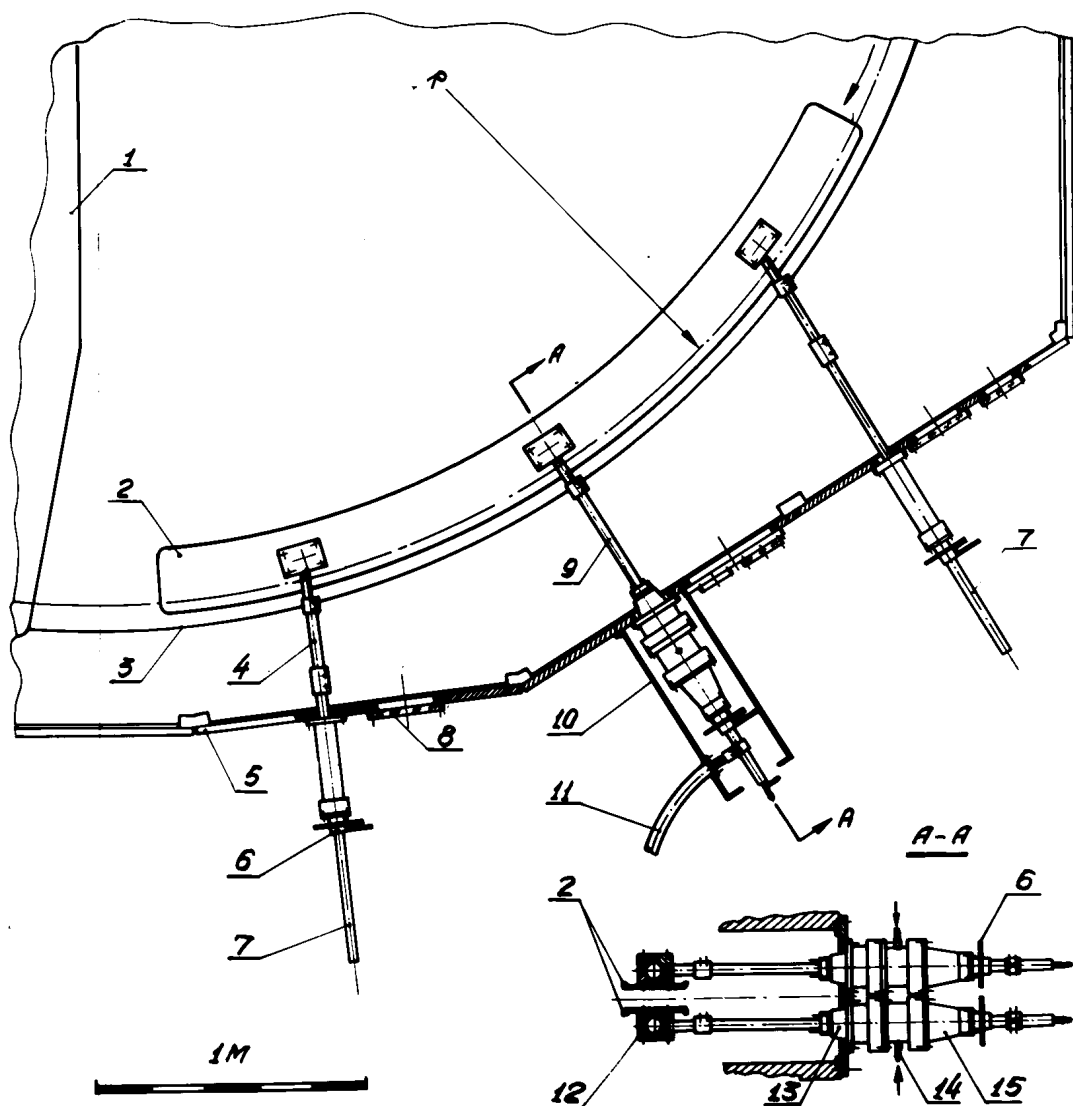


Рис. 7.1. Конструкция и размещение С-электрода в камере ускорителя:
 1 – дуант; 2 – пластины С-электрода; 3 – край полюса электромагнита;
 4 – керамические изоляторы; 5 – стенки вакуумной камеры; 6 – указатели положения пластин; 7 – штоки-держатели; 8 – смотровые окна;
 9 – штоки-вводы; 10 – защитный кожух; 11 – кабели фидерных линий;
 12 – шарниры крепления пластин; 13 – внутренние изоляторы;
 14 – штуцера подачи газа; 15 – наружные изоляторы

Блок-схема системы временной растяжки пучка синхроциклотрона ПИЯФ представлена на рис. 7.2.

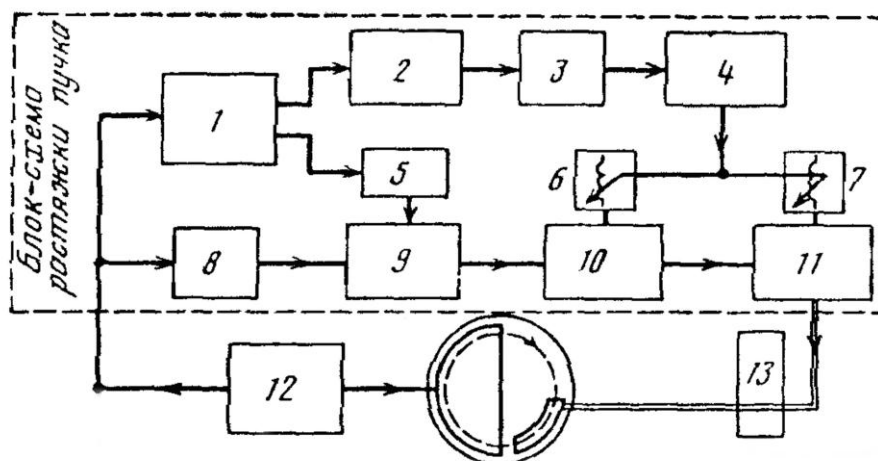


Рис. 7.2. Блок-схема системы временной растяжки пучка:

1 – блок частотных отметок; 2 – формирователь импульса тока; 3 – интегратор; 4 – усилитель тока; 5 – формирователь сигнала от основного генератора; 6, 7 – ферритовые вариаторы; 8 – линия задержки; 9 – управление синхронизацией; 10 – задающий генератор; 11 – усилитель мощности; 12 – ВЧ-генератор; 13 – импульсный ферритовый трансформатор системы вертикального отклонения пучка

Каждая пластина S -электрода соединена с анодом лампы выходного каскада усилителя мощности генератора S -электрода (11, рис. 7.2) при помощи фидерной линии, выполненной из двух отрезков ВЧ-кабеля с полиэтиленовой изоляцией длиной 12,5 м. Со стороны генератора кабели заземлены через индуктивность с ферритовым сердечником (ферритовый вариатор частоты (7)), образуя $3/4$ -волновую резонансную систему S -электрода со средней частотой 13,4 МГц. Перестройка резонансной частоты системы осуществляется за счет изменения тока подмагничивания ферритового вариатора. Девиация частоты – 250 кГц. Специальный 20-ступенчатый формирователь тока подмагничивания (2) позволяет воспроизводить практически любой закон изменения частоты генератора S -электрода в пределах диапазона 250 кГц. На пластины S -электрода также подается отрицательное смещение до 2,5 кВ с целью воспрепятствовать развитию паразитного РВР. Генератор S -электрода выполнен на лампах ГУ-5А в виде двух каскадов: задающего генератора (10) и усилителя мощности (11). Такая схема ослабляет влияние пучка на стабильность частоты генератора.

Отличительной чертой системы временной растяжки пучка синхроциклотрона является наличие систем синхронизации генератора S -электрода с основным генератором синхроциклотрона и ускоряемым пучком (рис. 7.3). Для обеспечения условия (7.3) введена цепь синхронизации генераторов основного дуанта и S -электрода по частоте и фазе в течение времени переходного процесса от одного режима ускорения

к другому. С этой целью основной генератор дуанта (1, рис. 7.3) связан с генератором C -электрода (4) при помощи линии связи через блок регулируемых фазовращателей (5). Вторая система синхронизации (по существу, система отрицательной обратной связи) обеспечивает подстройку частоты и фазы генератора C -электрода по частоте и азимутальному положению ускоряемого сгустка пучка. Она осуществляется за счет подачи напряжения, которое наводит на резонансную систему C -электрода циркулирующий в системе сгусток. Это напряжение через блок выделения сигнала азимутального положения пучка (6) подается на вход генератора C -электрода (4). Оптимальная фаза напряжения синхронизации подбирается при помощи регулируемого фазовращателя (7).

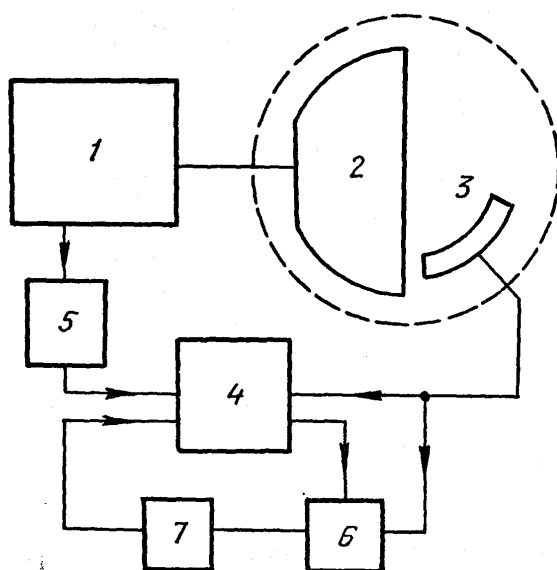


Рис. 7.3. Системы синхронизации генератора C -электрода:
 1 – основной генератор; 2 – дуант; 3 – C -электрод; 4 – генератор C -электрода; 5, 7 – регулируемые фазовращатели; 6 – блок выделения сигнала азимутального положения пучка

Временная диаграмма работы ускорителя в режиме временной растяжки пучка представлена на рис. 7.4. Генератор C -электрода работает непрерывно на частоте 13,4 МГц. Протонный пучок ускоряется основным дуантом до энергии примерно 970 МэВ. В этот момент (момент t_2) основная частотная программа с помощью анодного манипулятора должна быть выключена. Перед выключением основного генератора (момент времени t_1), когда частоты основной программы и резонансной системы C -электрода сближаются, происходит захват частоты генератора C -электрода основным генератором дуанта, и в течение интервала времени от t_1 до t_2 оба генератора работают на одной частоте и синфазно. Подстройка оптимальной разницы фаз между напряжениями на дуанте и C -электроде осуществляется с помощью блока регулируемых фазовращателей. Разни-

ца фаз подстраивается таким образом, чтобы обеспечить условие (7.3) – равенство в момент перехода равновесной фазы C -электрода и центральной фазы фазового объема пучка.

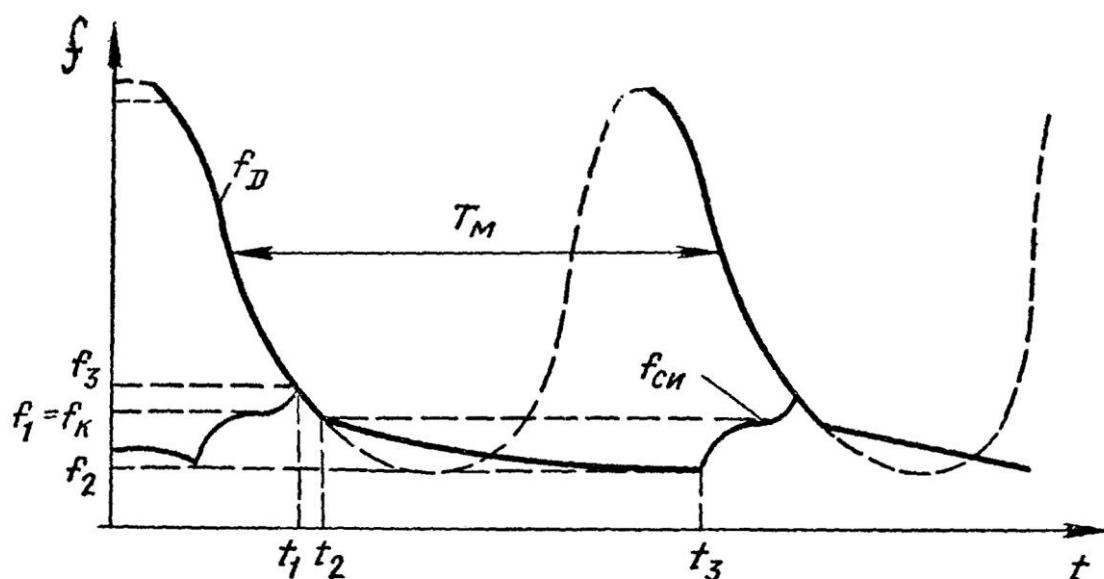


Рис. 7.4. Временная диаграмма работы C -электрода

В момент времени t_2 , когда частота основной программы достигает значения $f_1 = f_k$, соответствующего оптимальному радиальному положению пучка относительно C -электрода, отключается анодное напряжение генератора дуанта и включается блок управления ферритовым вариатором девиации частоты C -электрода, обеспечивая дальнейшее медленное доускорение пучка при помощи C -электрода. После выключения генератора дуанта остается работать вторая система синхронизации, обеспечивающая коррекцию частоты и фазы генератора C -электрода по частоте и фазе обращения сгустка. Интервал времени от t_2 до t_3 и форму зависимости частоты C -электрода от времени $f_c(t)$ можно оперативно менять в широких пределах.

При частоте модуляции ускоряющего напряжения основной частотной программы около 50 Гц длительность макроимпульса растянутого протонного пучка $\Delta t = t_3 - t_2$ составляет около 10–15 мс. Полная девиация частоты в этом интервале времени $\Delta f = f_1 - f_2 = 250$ МГц.

Управление работой генератора C -электрода осуществляется СУФ, расположенной на пульте управления ускорителя.

Наличие двух систем синхронизации: по частоте и фазе между дуантом и C -электродом – позволило практически без потерь перевести фазовый объем пучка, ускоряемого дуантом, в сепаратрису C -электрода и избежать дальнейших фазовых потерь пучка. Это позволило резко снизить напряжение на C -электроде. Снижение напряжения и узкополос-

ность

генератора C -электрода, резонансно перестраиваемого по частоте при помощи ферритового вариатора, позволили резко снизить его мощность. В оптимальном режиме напряжение на C -электроде составляет 2–2,5 кВ, что соответствует мощности примерно 0,5–1,0 кВт. Относительно небольшое напряжение и мощность генератора C -электрода резко упростили задачу его создания. Так, в частности, при создании резонансной системы C -электрода не понадобилось создавать особую коаксиальную линию, как это было сделано на других синхроциклотронах, – был использован промышленный коаксиальный кабель типа РКГ-15 и т. п.

Принципиально новая схема временной растяжки с двумя системами синхронизации была защищена авторскими свидетельствами [5, 7].

Параметры растянутого пучка

Временное распределение интенсивности растянутого пучка в отдельных циклах и суммарное распределение за продолжительное время показано на рис. 7.5. Полная повторяемость формы суммарных распределений растянутого пучка свидетельствует о высокой стабильности системы. Колебания интенсивности в отдельных циклах ускорения не выходят за пределы статистического отклонения.

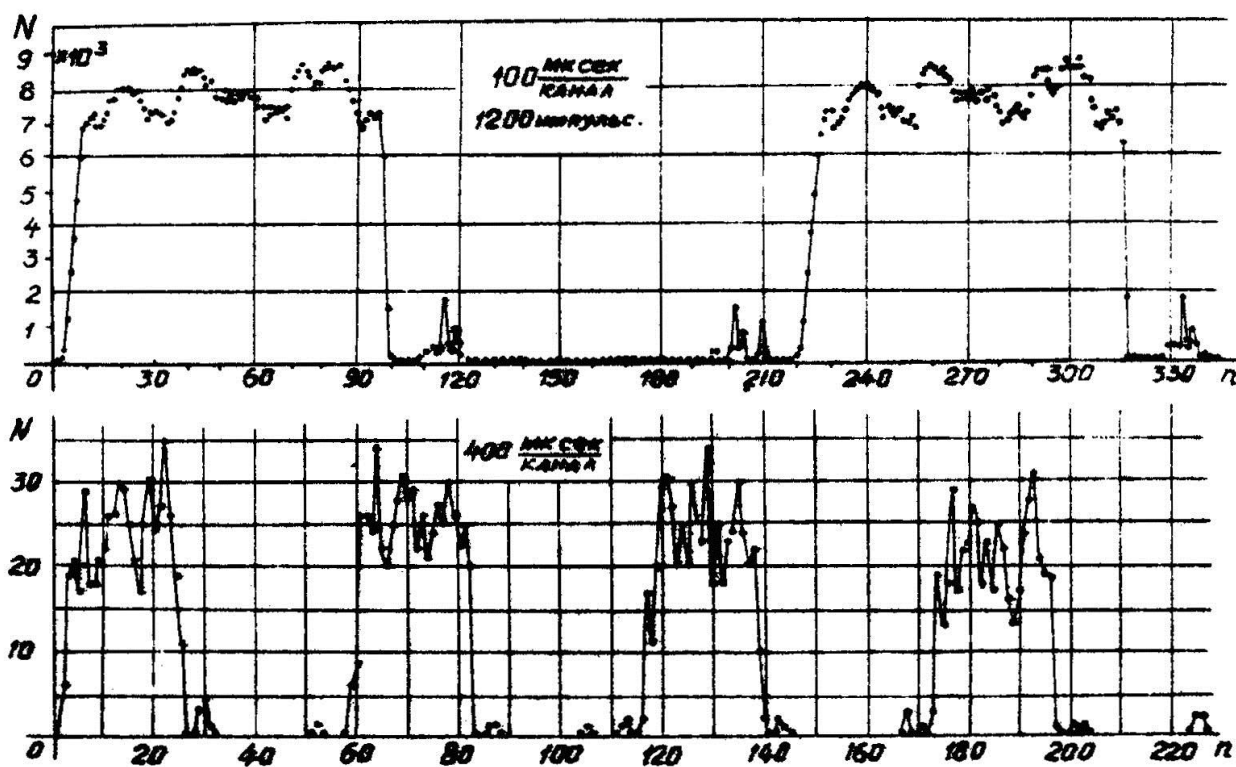


Рис. 7.5. Временное распределение интенсивности выведенного протонного пучка

На осциллограмме рис. 7.6а–в показан выведенный растянутый пучок синхроциклотрона – сигнал с ФЭУ, который расположен в главном зале ускорителя.

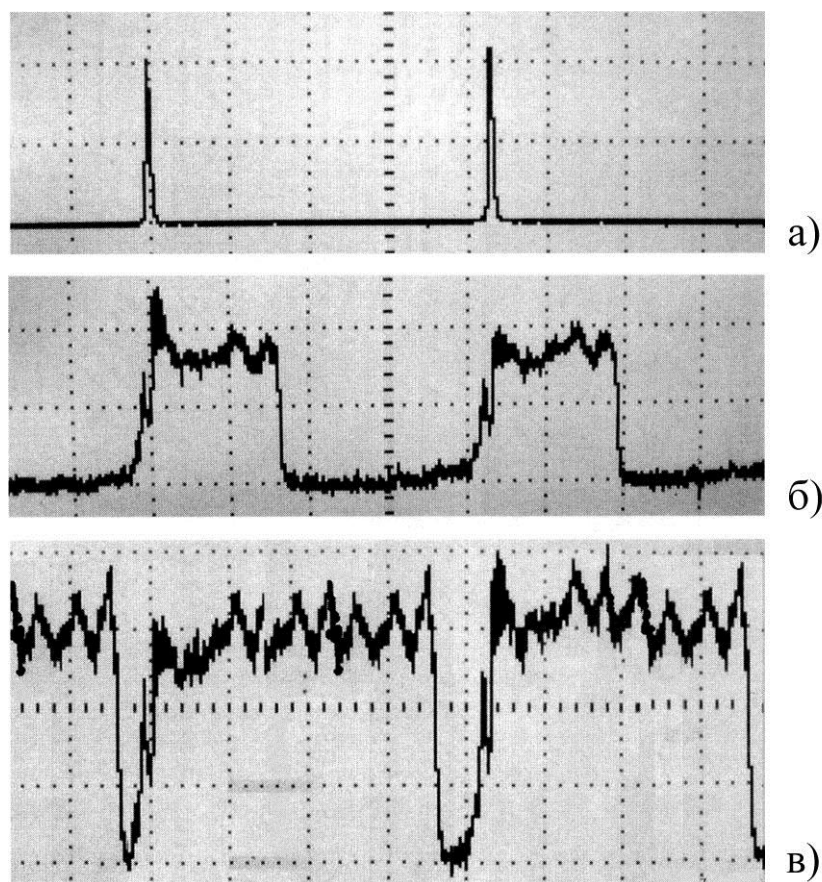


Рис. 7.6. Осциллограммы макроимпульса выведенного пучка:
а) нерастянутого; б, в) растянутого

На рис. 7.7 показана зависимость интенсивности пучка от сдвига фаз между напряжением на дуанте и С-электроде. Работа системы растяжки без фазировки ее с основной программой приводит к уменьшению средней интенсивности на 30–50 % при одновременном значительном ухудшении стабильности интенсивности растянутого пучка от цикла к циклу.

На рис. 7.8 представлена зависимость интенсивности растянутого импульса протонного выведенного пучка от коэффициента временного заполнения $m = \frac{\Delta t}{T_M}$. Начальная точка на графике $\left(\frac{I}{I_{\max}}\right) = 1$ соответствует режиму работы ускорителя без системы растяжки пучка (длительность импульса пучка ~ 300 мкс, $\frac{\Delta t}{T_M} = 1,4$ %).

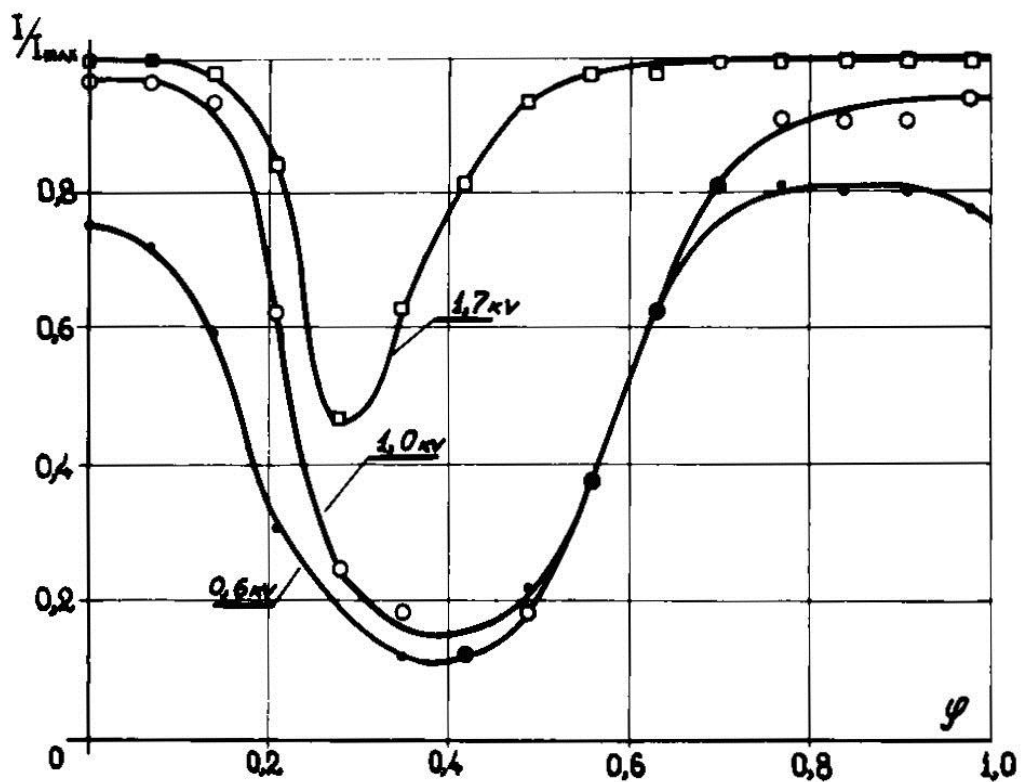


Рис. 7.7. Зависимость интенсивности пучка от сдвига фаз между напряжением на дуанте и С-электроде

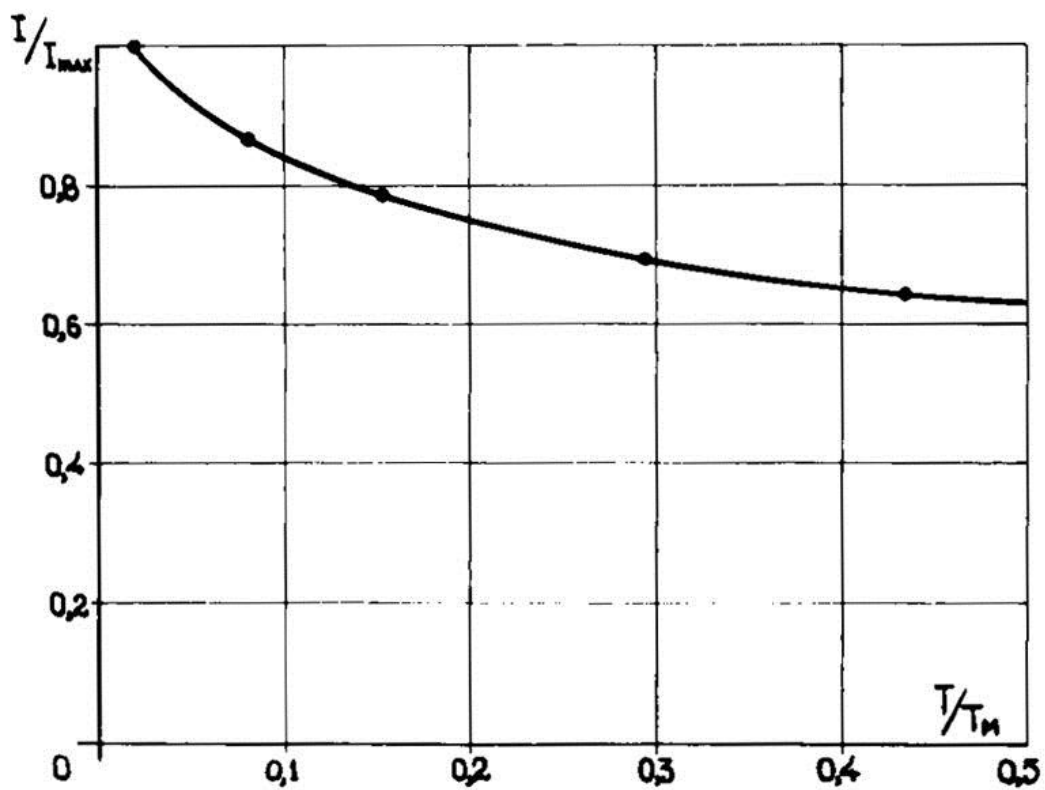


Рис. 7.8. Зависимость относительной интенсивности растянутого пучка от коэффициента временного заполнения

Переход пучка от ускорения дуантом к ускорению S -электродом происходит со 100%-ной эффективностью, а экспоненциальный спад интенсивности с ростом коэффициента временного заполнения связан с уменьшением времени жизни пучка из-за неоднородностей магнитного поля вблизи регенеративной выводной системы ускорителя.

В выведенном и растянутом с помощью S -электрода пучке сохраняется микроструктура. Полуширина банчей в растяжке уменьшается от начала ~ 10 – 12 нс к концу ~ 4 – 2 нс при периоде между банчами ~ 77 нс. При сравнении с полушириной микроструктуры нерастянутого пучка ~ 12 нс видно, что при перезахвате в S -электрод практически полностью сохраняется фазовый объем пучка.

Отметим, что сохранение микроструктуры в растянутом пучке позволяет проводить физические эксперименты по времяпротонной методике, где важно иметь как можно более короткие по времени импульсы микробанчей. Подбором режима синхронизации нам удалось получить длительность банча ~ 7 нс в начале растяжки и 2 нс в ее конце при расстоянии между ними 77 нс. Эта длительность использовалась при экспериментах с μ^+ - и K^+ -мезонами [8, 9].

Отметим также, что максимально возможный коэффициент заполнения в S -системе синхроциклотрона ПИЯФ равен примерно 80 %. При работе синхроциклотрона ПИЯФ с пропуском циклов ускорения удается растянуть пучок на время, большее нескольких периодов модуля T_M . Так, в эксперименте по малоугловому pp -рассеянию время растянутого пучка составляло $\sim 0,5$ – 1 с.

7.2. Импульсный нейтронный пучок синхроциклотрона ПИЯФ. Система однооборотного сброса протонов на внутреннюю мишень

Развитие ядерной энергетики требует все более точных измерений констант взаимодействия нейтронов с ядрами, которые могут быть проведены при использовании нейтронных спектрометров по времени пролета. Создание таких спектрометров требует, в свою очередь, создания мощных импульсных источников нейтронов с малой длительностью нейтронного импульса, которые могут быть осуществлены на протонных ускорителях с использованием реакции спалейшен при облучении тяжелых мишеней протонами¹.

При взаимодействии протонов с энергией 1 ГэВ со свинцовой мишенью образуется порядка 20 нейтронов на один протон, из которых примерно 85 % имеют максвелловский спектр со средней энергией около

¹ Шабалин Е. П. // Атомная энергия. 1982. Т. 52. Вып. 2. С. 92.

3 МэВ и изотропным угловым распределением. Остальные нейтроны образуются в каскадных процессах взаимодействия протонов с нуклонами ядра и имеют энергию несколько сотен МэВ и остронаправленное вперед угловое распределение. На синхроциклотроне задача, связанная с получением импульсного пучка нейтронов, была решена с помощью однооборотного сброса протонного пучка на нейтронообразующую мишень, установленную ниже или выше средней плоскости ускорителя^{1,2}. В качестве такого дефлектора был использован С-электрод, у которого удалена боковая стенка и на разделенные пластины которого может быть подан высоковольтный импульс для отклонения ускоряемого сгустка пучка как целого в вертикальном направлении. Для получения испарительного спектра нейтронов использовался полиэтиленовый замедлитель.

Создание на синхроциклотроне ПИЯФ импульсного дефлектора сделало возможным получение импульсного пучка нейтронов и сооружение на его базе нейтронного спектрометра по времени пролета ГНЕЙС [2, 10, 11]. Работаящая система спектрометра ГНЕЙС была подробно описана в главе 2, п. 2.3, рис. 2.20.

Схема и принцип работы импульсного дефлектора

Схема нейтронного генератора приведена на рис. 7.9. На радиусе «конечной» орбиты ускоряемых протонов (1) установлен электростатический дефлектор (2). На этом же радиусе установлена нейтронообразующая мишень (3), но выше (или ниже) плоскости орбиты (1). Таким образом, ни дефлектор (2), ни мишень (3) не препятствуют свободному вращению сгустка ускоренных протонов (4). Пластины дефлектора (2) подсоединены к многофункциональному блоку питания и управления дефлектором (5).

Наведение сгустка ускоренных протонов на мишень осуществляется электростатическим дефлектором. В нужный момент, когда сгусток (4) достигает предельной энергии и вращается по «конечной» орбите, на пластины дефлектора подается высоковольтный импульс напряжения. Сгусток протонов получает импульс в вертикальном направлении, в результате чего он через оборот попадает на торец мишени. Ось нейтронного пучка (6) проходит через центр мишени и составляет угол α с касательной (7) к конечной орбите.

¹ Scanlon I. P. et al. // RSI. 1957. V. 28, No. 10. P. 749.

² Rainwater I. et al. // RSI. 1964. V. 35, No. 3. P. 263.

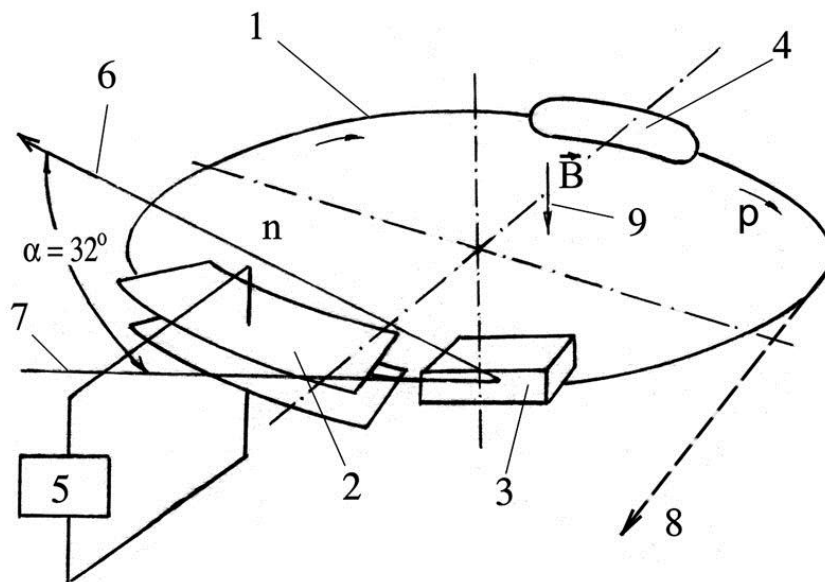


Рис. 7.9. Схема работы нейтронного генератора:

1 – «конечная» орбита протонов 1 ГэВ; 2 – пластины электростатического дефлектора; 3 – нейтронообразующая мишень; 4 – сгусток протонов; 5 – блок питания и управления дефлектором; 6 – ось направления нейтронного пучка; 7 – направление касательной к орбите; 8 – направление оси выводимых из ускорителя протонов для использования их в различных физических экспериментах; 9 – направление магнитного поля ускорителя

Рассмотрим принцип работы нейтронного генератора и его основные характеристики. Расчетная схема работы нейтронного генератора приведена на рис. 7.10.

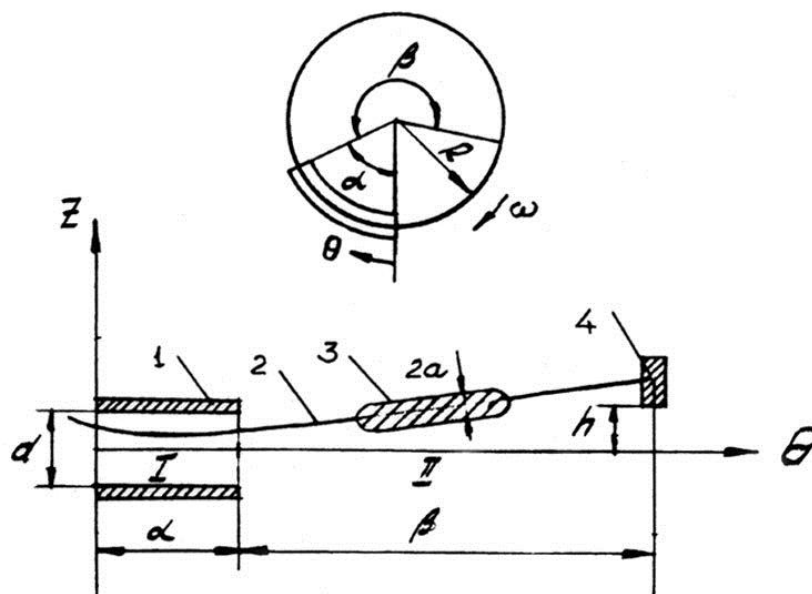


Рис. 7.10. Схема расчета импульсного дефлектора:

1 – пластины дефлекторов; 2 – траектория движения сгустка; 3 – сгусток ускоренных протонов; 4 – мишень

Временные характеристики стартового нейтронного пучка определяются временем взаимодействия ускоренного протонного пучка с нейтронообразующей мишенью. Минимально возможное время взаимодействия определяется угловой протяженностью сгустка $\sim 45^\circ$ и равно $\sim 8-12$ нс, что является приемлемой величиной для использования время-пролетной методики. При достаточно большой величине амплитуды напряжения, подаваемого на дефлекторные пластины, можно осуществить 100%-ный однооборотный сброс протонного пучка на внутреннюю мишень, установленную ниже или выше средней плоскости ускорителя.

Параметры импульсного дефлектора

Зададим геометрию импульсного дефлектора следующим образом. Пусть R – радиус, соответствующий энергии сброса пучка на мишень, α – угловая протяженность отклоняющих пластин дефлектора, а β – угловое расстояние от выхода дефлектора до мишени (рис. 7.10). Соответствующие линейные размеры будут: $l = \alpha R$ и $L = \beta R$.

Уравнение вертикального движения частицы с энергией, соответствующей радиусу R внутри дефлектора (область I, рис. 7.10), может быть записано в следующем виде (изменением полной скорости частицы за счет электрического поля внутри дефлектора пренебрегаем):

$$m\ddot{z} = e\mathcal{E}_z - \frac{e}{c}vB_r. \quad (7.6)$$

Здесь m , e и v – масса, заряд и скорость частицы; \mathcal{E} – напряженность электрического поля внутри дефлектора (поле предполагается однородным по высоте); B_r – радиальная компонента магнитного поля в месте нахождения частицы.

Замечая, что $B_r = -\frac{nB_z}{R}Z$, где $n = -\frac{R}{B_z}\frac{dB_z}{dR}$, B_z – вертикальная компонента магнитного поля в средней плоскости зазора, заменяя дифференцирование по времени дифференцированием по азимутальному углу θ и вводя угловую частоту вращения частицы $\omega = -\frac{eB_z}{mc}$, уравнение (7.6)

можно записать в виде

$$z'' + nz = \frac{e\mathcal{E}_z}{m\omega^2}. \quad (7.7)$$

Начальные условия на входе частицы в дефлектор зададим следующим образом:

$$Z \Big|_{\theta=0} = Z_0; \quad Z' \Big|_{\theta=0} = Z'_0 = \varphi R,$$

где φ – угол между направлением движения частицы и средней плоскостью зазора.

Решение уравнения (7.7) в области I запишется в виде

$$Z = \left(Z_0 - \frac{e\mathcal{E}_z}{nm\omega^2} \right) \cos \sqrt{n}\theta + \frac{Z'_0}{\sqrt{n}} \sin \theta + \frac{e\mathcal{E}_z}{nm\omega^2}.$$

Значения Z и Z' на выходе из дефлектора

$$\begin{cases} Z_\alpha = \left(Z_0 - \frac{e\mathcal{E}_z}{nm\omega^2} \right) \cos \sqrt{n}\alpha + \frac{Z'_0}{\sqrt{n}} \sin \sqrt{n}\alpha + \frac{e\mathcal{E}_z}{nm\omega^2} \\ Z'_\alpha = -\sqrt{n} \left(Z_0 - \frac{e\mathcal{E}_z}{nm\omega^2} \right) \sin \sqrt{n}\alpha + Z'_0 \cos \sqrt{n}\alpha. \end{cases} \quad (7.8)$$

В области II (рис. 7.10), за дефлектором, уравнение вертикального движения частицы полностью совпадает с обычным уравнением вертикальных бетатронных колебаний:

$$Z'' + nZ = 0.$$

Решение этого уравнения может быть записано в виде

$$Z = Z_\alpha \cos \sqrt{n}\theta + \frac{Z'_\alpha}{\sqrt{n}} \sin \sqrt{n}\theta \quad (7.9)$$

(угол θ при этом отсчитывается от выхода дефлектора).

Подставляя в (7.9) выражения для Z_α и Z'_α из (7.8) и полагая $\theta = \beta$, после некоторых преобразований получим

$$\begin{aligned} Z_\beta = & Z_0 \cos \sqrt{n}(\alpha + \beta) + \frac{Z'_0}{\sqrt{n}} \sin \sqrt{n}(\alpha + \beta) + \\ & + \frac{2e\mathcal{E}_z}{nm\omega^2} \sin \left[\sqrt{n} \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \sin \frac{\sqrt{n}\alpha}{2}. \end{aligned} \quad (7.10)$$

Первые два члена выражения (7.10) представляют собой обычные вертикальные бетатронные колебания и могут быть объединены в один:

$$A \sin \left[\sqrt{n}(\alpha + \beta) + \delta \right],$$

где A – амплитуда колебаний; δ – фаза колебаний на входе в дефлектор. Отсюда следует, что вертикальный размер пучка $2A$ на входе дефлектора за счет вертикальных бетатронных колебаний полностью переносится на мишень. Третий член выражения (7.10) представляет собой вертикаль-

ное отклонение пучка за счет действия дефлектора, которое оказывается не зависящим от начальных условий на входе в дефлектор.

Таким образом, расстояние по вертикали от края мишени до средней плоскости должно быть не более $h - A$, где

$$h = \frac{2e\mathcal{E}}{nm\omega^2} \sin \sqrt{n} \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \sin \frac{\sqrt{n}\alpha}{2} =$$

$$= \frac{2eU^*ER^2}{(E^2 - E_0^2)d} \frac{\sin \sqrt{n} \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \sin \frac{\sqrt{n}\alpha}{2}}{n}. \quad (7.11)$$

Здесь U^* – эффективная амплитуда напряжения на дефлекторе с учетом краевых эффектов за счет конечных размеров пластин; d – расстояние между пластинами дефлектора; E – полная энергия частицы; E_0 – ее энергия покоя.

При $n \rightarrow 0$ величина

$$\frac{2 \sin \left[\sqrt{n} \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \sin \frac{\sqrt{n}\alpha}{2}}{n} \rightarrow \alpha \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right).$$

В связи с этим выражение (7.11) может быть записано в виде

$$h = \frac{h_0}{f}, \quad (7.11a)$$

где $h_0 = \frac{eU^*ER^2\alpha \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right)}{(E^2 - E_0^2)d}$ представляет собой вертикальное отклонение

пучка в случае отсутствия радиальной компоненты магнитного поля ($n = 0$),

$$a \quad f = \frac{n \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \alpha}{2 \sin \left[\sqrt{n} \left(\beta + 2 \frac{\alpha}{2} \right) \right] \sin \frac{\sqrt{n}\alpha}{2}}.$$

Введем величину

$$U_0^* = \frac{hd}{R^2 \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \alpha} \frac{E^2 - E_0^2}{E} 10^6 \text{ (кВ)}$$

(энергия измеряется в гигаэлектронвольтах), которая представляет собой напряжение, необходимое для отклонения пучка на величину h при отсутствии радиальной компоненты магнитного поля, т. е. при $n = 0$.

Выражение (7.11) можно записать в виде

$$h = \frac{eU^*ER^2}{(E^2 - E_0^2)d} q(\alpha, \beta, n), \quad (7.116)$$

где $q = \frac{2 \sin \left[\sqrt{n} \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \sin \frac{\sqrt{n} \alpha}{2}}{n}$.

Величина q для различных α , β и n представлена на рис. 7.11.

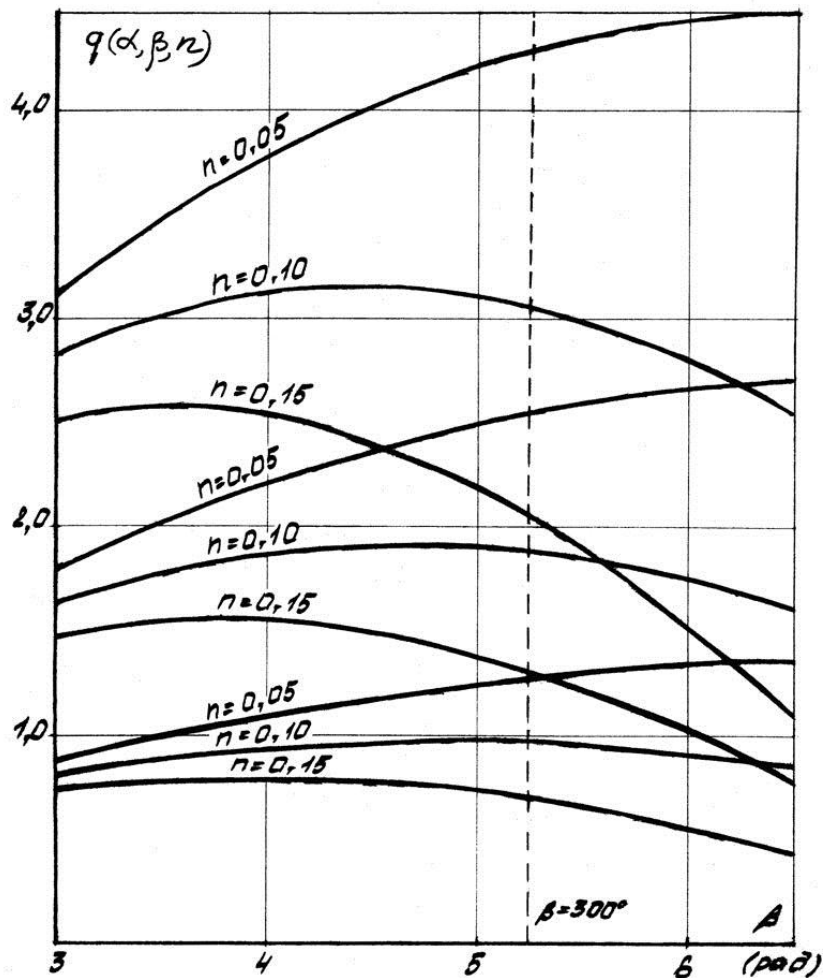


Рис. 7.11. Величина q для различных α , β и n

При заданных α и n величина q имеет максимум при $\beta_{\text{opt}} = \frac{\pi}{2\sqrt{n}} - \frac{\alpha}{2}$, равный $\frac{2}{n} \sin \frac{\sqrt{n} \alpha}{2}$. Величина β_{opt} для различных α и n представлена на рис. 7.12.

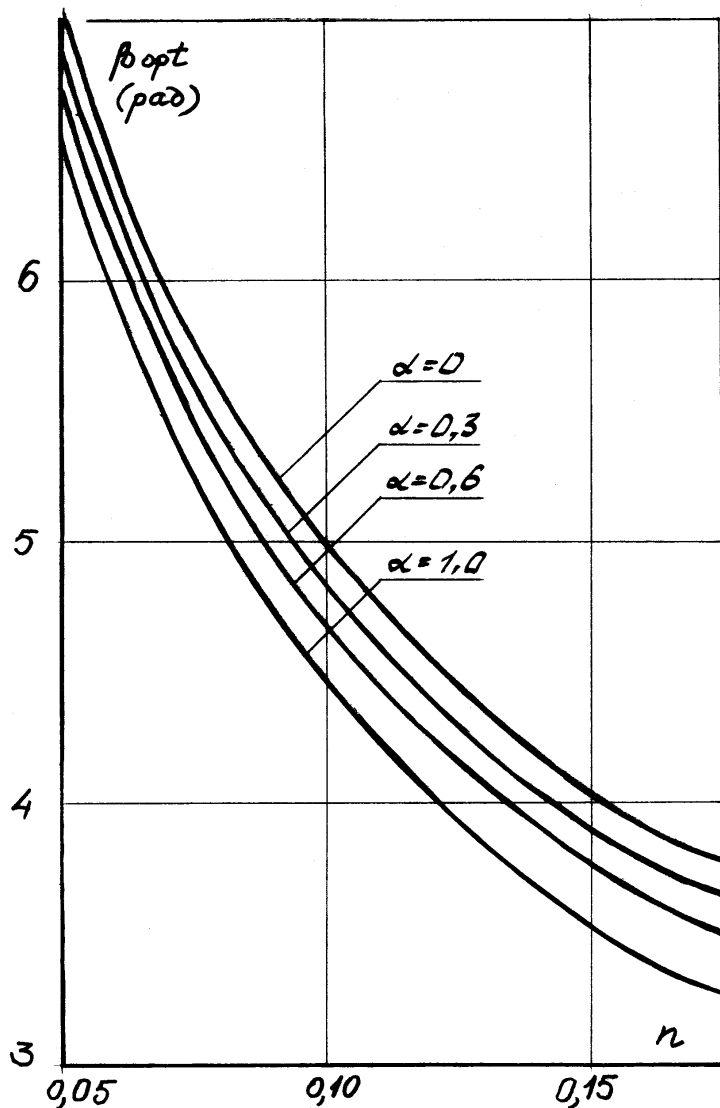


Рис. 7.12. Величина β_{opt} для различных α и n

Из выражений (7.11а, б) видно, что при заданной геометрии дефлектора и заданном напряжении наибольшее отклонение пучка получается при $n = 0$. При $n > 0$ величина отклонения всегда меньше, чем при $n = 0$. При заданных α и n величина отклонения растет с ростом β , при $\beta = \beta_{opt}$ достигает максимума и затем падает. В связи с этим выбор $\beta > \beta_{opt}$ нецелесообразен.

При заданных α и β величина n должна быть выбрана меньше, чем $n_{гр} = \frac{\pi^2}{(2\beta + \alpha)^2}$. Если при этом $\alpha + \beta = 2\pi$ (мишень установлена на входе

в дефлектор), то $n_{гр} = \frac{1}{\left(4 - \frac{\alpha}{\pi}\right)^2}$. Из (7.11б) следует формула для вычис-

ления напряжения, необходимого для отклонения пучка на величину h , при заданных α , β и n :

$$U^* = \frac{hd}{R^2} \frac{E^2 - E_0^2}{E} \frac{10^6}{q(\alpha, \beta, n)} \text{ (кВ)},$$

где E и E_0 измеряются в гигаэлектронвольтах. В нашем случае $R = 316$ см, $E_0 = 0,938$ ГэВ, $E = 1,938$ ГэВ, $U^* = 14,9 \frac{hd}{q}$ (кВ), где h и d измеряются в сантиметрах.

Оценим необходимую величину напряжения на дефлекторе при расстоянии между его пластинами $d = 6$ см. Пусть нижний край мишени расположен на расстоянии $h = a = 2$ см от медианной плоскости, т. е. практически касается пучка. Тогда необходимое напряжение на дефлекторе $U = 84,7$ кВ при $n = 0,05$, $q = 4,25$; $U = 118$ кВ при $n = 0,1$, $q = 3,05$.

Временная схема работы импульсного дефлектора

Временная схема работы импульсного дефлектора и форма его импульса приведены на рис. 7.13.

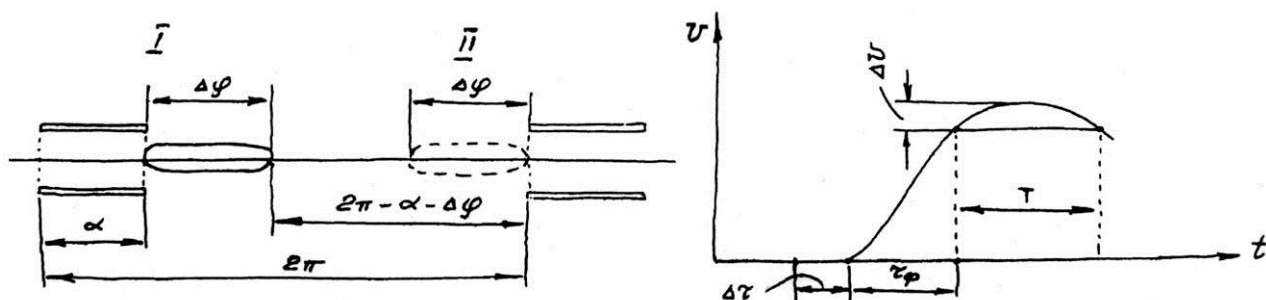


Рис. 7.13. Временная схема работы импульсного дефлектора (слева) и форма импульса дефлектора (справа).

α – угловой размер дефлектора; $\Delta\varphi$ – угловой размер сгустка протонов; U – напряжение на дефлекторе; T – длительность импульса дефлектора; τ_ϕ – длительность фронта импульса; $\Delta\tau$ – суммарная погрешность

Пусть азимутальная протяженность сгустка составляет величину $\Delta\varphi$. Тогда время пролета сгустком дефлектора, т. е. время между выходом из дефлектора (положение I) и очередным входом в него (положение II),

$$t = \frac{2\pi - \alpha - \Delta\varphi}{2\pi f_0}.$$

За этот интервал времени на дефлектор должно быть подано полное напряжение. Отсюда требование ко времени нарастания фронта отклоняющего импульса $\tau_\phi < t + \Delta\tau$, где $\Delta\tau$ – суммарная погрешность в точно-

сти определения углового положения сгустка относительно дефлектора и задержки в схемах запуска (рис. 7.13). Длительность отклоняющего импульса должна быть не меньше времени, в течение которого сгусток находится между пластинами дефлектора, т. е.

$$T \geq \frac{\Delta\varphi + \alpha}{2\pi f_0}.$$

Наиболее жесткие требования налагаются на величину нарастания фронта импульса, которая при амплитуде ~ 100 кВ должна быть ~ 50 нс, что является достаточно сложной технической задачей. Полученные оценки полностью подтвердились при экспериментальной проверке. Генератор импульса сброса обеспечивает на пластинах C -электрода импульсную разность потенциалов до 100 кВ с передним фронтом от 70 до 100 нс.

Конструкция совмещенной системы временной растяжки и быстрого сброса пучка

Основной проблемой при реализации системы однооборотного сброса пучка на внутреннюю нейтронообразующую мишень являлось обеспечение возможности совместной работы C -электрода в качестве ускоряющей системы при растяжке пучка и одновременно в качестве отклоняющего дефлектора при однооборотном сбросе пучка на внутреннюю мишень. Здесь мы использовали совмещенную систему, предложенную сотрудниками Ускорительного отдела ПИЯФ, А. В. Куликовым и Н. Н. Черновым [13]. Предложенная ими принципиальная схема генератора сброса, совмещенная с системой растяжки, представлена на рис. 7.14. Источником импульсного напряжения дефлектора является тиратронный генератор Л 1÷4 с выходным ферритовым трансформатором (7). Выходная обмотка трансформатора, состоящая из центральных жил фидеров питания C -электрода (1), выполнена таким образом, что система обеспечивает синфазную подачу ускоряющего напряжения на пластины в режиме растяжки и противофазную подачу импульса напряжения в режиме сброса. Одновременно достигается отсутствие связи

между импульсным генератором и генератором ВЧ. СУФ позволяет работать одновременно в режиме растяжки и однооборотного сброса при любой последовательности их чередования от цикла к циклу ускорения. Более того, возможен режим, когда в одном цикле ускорения часть пучка растягивается и выводится наружу, а оставшаяся часть импульса сбрасывается на мишень.

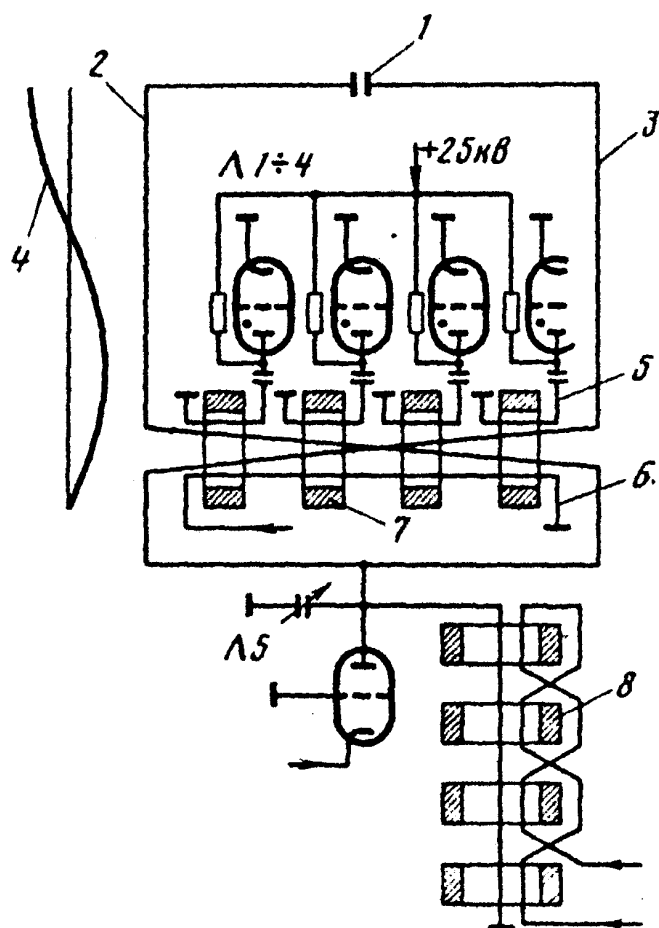


Рис. 7.14. Упрощенная схема генератора сброса:

1 – С-электрод; 2–3 – фидерные линии связи с С-электродом; 4 – распределение напряжения вдоль фидеров в режиме работы растяжки пучка; 5 – первичная обмотка импульсного трансформатора; 6 – обмотка подмагничивания импульсного трансформатора; 7 – ферритовый импульсный трансформатор; 8 – ферритовый вариатор частоты С-электрода; Л 1 ÷ 4 – тиратронный генератор; Л5 – ВЧ-генератор системы растяжки пучка

Разработаны и введены в эксплуатацию совмещенная система временной растяжки пучка с помощью С-электрода и система однооборотного сброса протонного пучка на внутреннюю нейтронообразующую мишень, в которой в качестве импульсного дефлектора, осуществляющего сброс пучка, используются разъединенные пластины С-электрода. Совмещенная система обеспечивает подачу на пластины С-электрода либо ускоряющего напряжения С-электрода, либо импульса напряжения с амплитудой около 100 кВ и длительностью 70 нс, необходимого для сброса протонного сгустка на свинцовую мишень, которая находится ниже средней плоскости зазора магнита. Создание импульсного дефлектора позволило создать на базе синхроциклотрона ПИЯФ уникальный нейтронный спектрометр по времени пролета ГНЕЙС.

В 2008 году с использованием системы ГНЕЙС был получен пучок нейтронов с энергетическим спектром, повторяющим спектр атмосферных нейтронов, для тестирования компонентов радиоэлектроники на радиационную стойкость.

Использование дефлектора для отклонения протонного пучка на внутреннюю мишень позволяет менять временную структуру стартового нейтронного пучка. Подавая на дефлектор импульсы различной амплитуды и длительности, можно варьировать скорость подачи пучка на нейтронообразующую мишень и тем самым изменять временную структуру нейтронного пучка. Другая возможность – подавать на пластины дефлектора синусоидальное напряжение с частотой вертикальных бетатронных колебаний. Подбирая частоту, амплитуду и длительность, можно изменять скорость отклонения протонного пучка и тем самым варьировать временную структуру нейтронного пучка на мишени.

7.3. Система увеличения интенсивности пучка синхроциклотрона ПИЯФ

Эффективность захвата

Как известно, для обеспечения устойчивого режима ускорения в синхроциклотроне для равновесной частицы φ_s с фазой должно быть выполнено условие автофазировки

$$\cos \varphi_s = -\frac{3E_s N}{eV f_s^2 K} \frac{df_{\text{ген.}}}{d\alpha} < 1,$$

где V и $f_{\text{ген.}}$ – амплитуда и частота ускоряющего напряжения на дуанте; E_s и f_s – энергия и частота обращения равновесной частицы; α – угол поворота ротора вариатора частоты в градусах; N – число оборотов ротора вариатора в минуту; параметр $K = 1 + \frac{n}{(1-n)\beta_s^2}$.

Благодаря изменению частоты ускоряющего напряжения захват протонов в ускорительный режим происходит только в короткие промежутки времени, когда частота ускоряющего напряжения сравнивается с частотой обращения протонов вблизи центра ускорителя. Эффективность захвата протонов в режим ускорения определяется как отношение интервала времени $\Delta\tau$, когда осуществляется захват, к периоду модуляции частоты ускоряющего напряжения T_M :

$$\varepsilon = \frac{\Delta\tau}{T_M}.$$

Детальный расчет эффективности захвата для синхроциклотрона с учетом возвращения протонов в течение первого фазового колебания в центр ускорителя был проведен в известной работе Бома и Фолди¹:

$$\varepsilon = \frac{2\sqrt{2}}{T_M \left| \frac{d\omega_{\text{ген.}}}{dt} \right|} \sqrt{\frac{e V_0 \omega_s^2 K}{\pi E_s}} L(\varphi_s),$$

где V_0 – амплитуда ускоряющего напряжения в начале цикла ускорения; $L(\varphi_s)$ – рассчитанная в этой работе функция от φ_s . При $\varphi_s = 60^\circ$ функция $L(\varphi_s)$ имеет максимум, равный 0,58, и при $\varphi_s = 0$ и $\varphi_s = 90^\circ$ обращается в нуль.

Замечая, что для вариатора частоты, имеющего σ лопастей, частота модуляции ускоряющего напряжения $F_M = \frac{N}{60} \sigma$, и, следовательно,

$T_M = \frac{60}{N\sigma}$, выражение для эффективности захвата может быть записано в виде

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}\sigma f_0}{180 \frac{df_{\text{ген.}}}{d\alpha}} \sqrt{\frac{e V_0 K}{\pi E_0}} L(\varphi_s).$$

Необходимо отметить, что теория захвата Бома и Фолди предполагает наличие на начальном этапе ускорения щелевого набора энергии ускоряемого протона. Однако в синхроциклотроне, в системе с одним дуантом и открытым ионным источником, ширина ускоряющей щели оказывается во много раз больше приращения радиуса протона за один оборот, и, как следствие этого, приращение энергии на один оборот при неизменном ускоряющем напряжении зависит от радиуса². Реально щелевой набор энергии в системе с одним дуантом наступает только после того, как протон наберет энергию, соответствующую радиусу 30–40 см. Поэтому приведенные выше формулы для эффективности захвата являются приближенными и носят, скорее, качественный характер. Численные расчеты начальной стадии ускорения, проведенные в ЛЯП ОИЯИ³, показали, что оптимальное значение $\cos \varphi_s$ для синхроциклотрона до реконструкции равно не 0,5, а несколько больше – 0,65.

Настройка ускорителя на оптимальную величину эффективности захвата может быть осуществлена за счет выбора скорости вращения ротора вариатора, соответствующей оптимальному значению равновесной фазы,

¹ *Bohm D. and Foldy L. // Phys. Rev. 1947. V. 72. P. 649.*

² *Данилов В. И. и др. // Тр. Междунар. конф. по ускорителям. М., 1964. С. 591.*

³ Там же. С. 595.

при которой эффективность захвата имеет максимум. Оптимальная скорость вращения ротора, соответствующая значению $\cos \varphi_s = (\cos \varphi_s)_{\text{opt}}$ и постоянной амплитуде ускоряющего напряжения, может быть выражена в виде

$$N_{\text{opt}} = \frac{eVK f_s^2}{3E_s \frac{df_{\text{ген.}}}{d\alpha}} (\cos \varphi_s)_{\text{opt}}.$$

Однако, если частотная и амплитудная программы не обеспечивают постоянство величины $V \cos \varphi_s$ в процессе ускорения, может оказаться, что при некоторых значениях угла α в пределах рабочего диапазона частот величина $\cos \varphi_s$ при выбранной скорости вращения ротора станет больше единицы. Это приведет к потере фазовой устойчивости и потерям пучка. Максимально допустимая скорость вращения ротора, при которой $\cos \varphi_s$ не выходит за пределы единицы, определяется выражением

$$N_{\text{max}} < \left(\frac{eVK f_{\text{ген.}}^2}{3E_s \frac{df_{\text{ген.}}}{d\alpha}} \right)_{\text{max}}.$$

Поэтому в случае $N_{\text{opt}} > N_{\text{max}}$ для предотвращения фазовых потерь пучка необходимо выбрать реальную скорость вращения ротора меньше, чем N_{opt} , что приводит к снижению интенсивности ускоряемого пучка. Таким образом, условие, налагаемое на форму частотной программы $f(\alpha)$, состоит в том, чтобы при выборе оптимальной скорости вращения вариатора в диапазоне захвата она обеспечивала отсутствие фазовых потерь в пределах всего рабочего диапазона частот.

Амплитуда ускоряющего напряжения

Вопрос о зависимости интенсивности пучка синхроциклотрона от амплитуды ускоряющего напряжения рассматривался во многих работах. Разные авторы дают несколько отличные друг от друга результаты, которые можно представить в виде

$$I = \alpha V^n,$$

где α – константа, а n – показатель степени, который находится в пределах от 2 до 3. В качестве основного фактора, определяющего зависимость интенсивности пучка от амплитуды ускоряющего напряжения, выступает наличие в центральной области ускорителя пространственного заряда, который из-за отсутствия вертикальной фокусировки в центральной области приводит к расталкиванию частиц в вертикальном направлении

и гибели части пучка на крышках дуанта. Влияние пространственного заряда особенно сильно сказывается при использовании системы с одним дуантом и открытым ионным источником. Чем больше амплитуда ускоряющего напряжения, тем больше приращение энергии протона на один оборот и тем быстрее ускоряемый протон покинет область действия пространственного заряда.

В хорошо известной работе К. Маккензи¹ проведена оценка интенсивности пучка синхроциклотрона с открытым ионным источником после прохождения пучком центральной области ускорителя и получена зависимость $I \sim V^3$. Оценка основана на предположении, что в центральной области ускорителя фокусировка за счет спадающего по радиусу магнитного поля отсутствует и возникает скачком на некотором радиусе.

В работе Дж. Лоусона² получена зависимость $I \sim V^{5/3}$, основанная на предположении, что магнитное поле вблизи центра ускорителя имеет параболический спад, следовательно, вертикальные магнитные фокусирующие силы действуют уже начиная с самых малых радиусов. Однако сделанная здесь оценка основана также на предположении о наличии с самого начала процесса ускорения щелевого набора энергии, поэтому полученный результат неприменим для синхроциклотрона с открытым ионным источником.

В указанных выше работах не учитывалась вертикальная фокусировка частиц за счет электрического поля дуантов. В работе С. Холма³ учтены оба типа вертикальной фокусировки ускоряемых частиц в центральной области: магнитная и электрическая. Здесь получена зависимость $I \sim V^2$. Однако в этой работе также используется предположение о щелевом наборе энергии.

Наиболее реалистичный результат для синхроциклотрона с открытым ионным источником получен в ЛЯП ОИЯИ, в Дубне^{4,5}. Здесь было показано, что для синхроциклотрона с открытым ионным источником справедлива зависимость $I \sim V^{5/2}$. В связи с этим для увеличения интенсивности ускоряемого пучка необходимо иметь величину амплитуды ускоряющего напряжения как можно больше. Поэтому все проекты реконструкции синхроциклотронов, проведенные, например, в ЦЕРН и ЛЯП ОИЯИ, были направлены в первую очередь на повышение амплитуды ускоряющего напряжения. Основным фактором, ограничивающим амплитуду ускоряющего напряжения в крупных синхроциклотронах, яв-

¹ Mackenzie K. R. // Nucl. Instrum. and Methods. 1964. V. 31. P. 139–146.

² Lawson J. D. // Nucl. Instrum. and Methods. 1965. V. 34. P. 173–174.

³ Holm S. // Nucl. Instrum. and Methods. 1968. V. 64. P. 317–322.

⁴ Данилов В. И. Вопросы повышения интенсивности и эффективности работы синхроциклотрона ОИЯИ. Дис. ... д. ф.-м. н. Дубна, 1969. 176 с.

⁵ Данилов В. И. и др. // Атомная энергия. 1966. Т. 21. Вып. 5. С. 402.

ляется электрическая прочность зазоров вариатора частоты. Необходимость иметь большое перекрытие по частоте ускоряющего напряжения приводит к необходимости иметь большое перекрытие по емкости вариатора частоты, а это, в свою очередь, приводит к необходимости иметь достаточно малые зазоры между рабочими пластинами вариатора. Обычно эти зазоры составляют величину порядка нескольких миллиметров и ограничивают амплитуду ускоряющего напряжения величиной 10–15 кВ.

Однако представляет интерес также и поиск других путей увеличения интенсивности пучка синхроциклотрона, не связанных с коренной реконструкцией его ВЧ-системы, изменением топографии магнитного поля и переходом к ионному источнику закрытого типа. Одним из таких путей для синхроциклотрона с открытым ионным источником является увеличение вертикальной фокусировки в центральной области, где дефокусирующие силы, вызванные наличием пространственного заряда, ограничивают интенсивность пучка ускорителя. Обычно для компенсации расталкивающего действия пространственного заряда в центральной области применяют магнитную и электростатическую фокусировки. Как показывает опыт ряда лабораторий, применение дополнительной магнитной фокусировки в центральной области путем повышения показателя спада магнитного поля из-за технических трудностей ее реализации не является эффективным и не приводит к существенному прогрессу в решении задачи увеличения интенсивности.

Для фокусировки протонов малой энергии в центральной области оказывается удобным использовать электростатическую фокусировку. В этом случае при сравнительно небольших напряжениях на электродах возможно получение фокусирующих сил, превышающих силы магнитной фокусировки в несколько раз. Дополнительным преимуществом электростатической фокусировки является возможность ее регулировки путем изменения потенциалов на электродах. Примером является фокусировка, возникающая от отрицательного напряжения смещения, подаваемого на дуант. На многих ускорителях отмечено повышение интенсивности при увеличении напряжения смещения. На синхроциклотроне ОИЯИ для формирования фокусирующего электрического поля в центральной области был введен дополнительный электрод, на который подавался отрицательный потенциал. Имеется сообщение об испытании такого электрода и на синхроциклотроне ЦЕРН. Электрод аналогичного типа использовался также и на синхроциклотроне ПИЯФ до середины 1977 года.

На синхроциклотроне ПИЯФ была разработана принципиально новая система формирования фокусирующего электростатического поля, обеспечивающая значительно большие фокусирующие силы. Такая система привела к существенному повышению интенсивности ускорителя, обеспечив интенси́вность выведенного пучка 1 мкА [12–15].

Трехэлектродная фокусирующая система синхроциклотрона ПИЯФ

Принцип действия

Фокусирующее электростатическое поле в центральной области ускорителя создается с помощью специальных электродов. Основные требования к электростатическому полю и электродам можно сформулировать следующим образом:

- электрическое поле должно иметь максимально возможные вертикальные компоненты, обеспечивающие фокусировку к медианной плоскости на малых радиусах, где магнитная фокусировка мала;
- электрическое поле не должно возмущать движение частиц в горизонтальной плоскости, что может проявляться в появлении дрейфа центра орбит и нарушении процесса захвата в режим ускорения;
- расположение ионного источника и потенциал его анода должны выбираться такими, чтобы, с одной стороны, обеспечивалась эффективная работа источника, а с другой стороны, элементы конструкции источника и его плазменный шнур не приводили к существенному искажению электростатических полей системы.

Рассмотрим с точки зрения выполнения этих требований различные схемы введения фокусирующих электростатических сил. На рис. 7.15а в схематичном виде представлена электростатическая фокусировка от напряжения смещения в системе с одним дуантом. Можно видеть, что подача на дуант отрицательного потенциала смещения при определенной геометрии, в принципе, обеспечивает наличие фокусирующих составляющих электростатического поля E_z . Однако фокусирующие силы ограничены величиной напряжения смещения, которая обычно не превышает нескольких кВ и не может быть сильно увеличена из-за повышения напряжения на элементах радиочастотной системы.

На рис. 7.15б представлена схема фокусирующей системы синхроциклотрона ОИЯИ¹. В этом случае фокусирующие силы могут быть значительно выше, т. к. на дополнительный электрод подается напряжение $\sim (-15 \div -20)$ кВ. Несимметричное расположение дополнительного электрода обеспечивает наличие вертикальной составляющей и в центре магнитного поля синхроциклотрона.

¹ Данилов В. И. и др. // Атомная энергия. 1966. Т. 21. Вып. 5. С. 402.

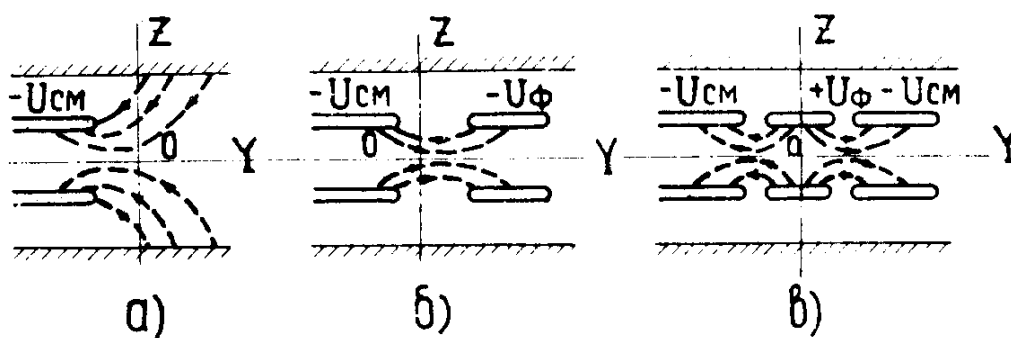


Рис. 7.15. Схемы электростатической фокусировки в центральной области синхроциклотрона:

а) фокусировка полем смещения дуанта; б) фокусировка, используемая на синхроциклотроне ОИЯИ; в) схема фокусировки синхроциклотрона ПИЯФ

Недостатком обеих систем является отсутствие центральной симметрии электростатических полей. Наличие горизонтальной составляющей электростатического поля, перпендикулярной кромке дуанта, приводит к смещению центров орбит от центра ускорителя за счет дрейфа в электрическом поле и, следовательно, к ухудшению качества пучка.

Новая схема электростатической фокусировки, предложенная в ПИЯФ и реализованная на СЦ-1000, представлена на рис. 7.15в. В этой схеме на дуант и боковой электрод подается отрицательное напряжение смещения, а на центральный фокусирующий электрод – высокий положительный потенциал. В новой системе фокусирующая сила значительно больше, а электрическое поле в центральной области обладает центральной симметрией относительно оси OZ , что исключает дрейф для центральных орбит. Электростатическое поле такой системы имеет обширную зону с замкнутыми эквипотенциалами, поэтому дрейф мгновенного центра для нецентральных орбит будет происходить вокруг центра ускорителя по траекториям, близким к эквипотенциалам.

Естественно, что необходимо учитывать наличие радиальной компоненты электрического поля, приводящей к изменению частоты обращения частиц. На практике это означает, что при введении фокусирующего по вертикали поля одновременно необходимо корректировать частотную программу ускоряющего напряжения.

Конструкция

На рис. 7.16 приведена принципиальная схема фокусирующей системы и расположение ее в камере ускорителя. В центральную область синхроциклотрона помещены: центральный фокусирующий электрод (1), имеющий форму вытянутого эллипса, и полукруглый боковой электрод (2). Каждый из электродов состоит из двух пластин, расположенных симметрично по отношению к медианной плоскости. Пластины цен-

трального электрода подключены к источнику положительного напряжения (11), а пластины бокового электрода – к источнику отрицательного смещения дуанта (10). Под пластинами центрального электрода находятся камеры (4) открытого ионного источника типа Пеннинга с холодными катодами (5). Катоды и аноды ионного источника объединены между собой попарно и подключены к блоку питания (9). Аноды ионного источника (4) при помощи переключателя (12) могут подключаться либо к земле, либо к пластинам фокусирующего электрода (1), реализуя две модификации подключения ионного источника. Основной, рабочей, модификацией является схема подключения конусов к пластинам фокусирующего электрода как обеспечивающая наибольший коэффициент захвата протонов в процессе ускорения. Все пластины электродов, а также аноды ионного источника заземлены по ВЧ-напряжению конденсаторами (6).

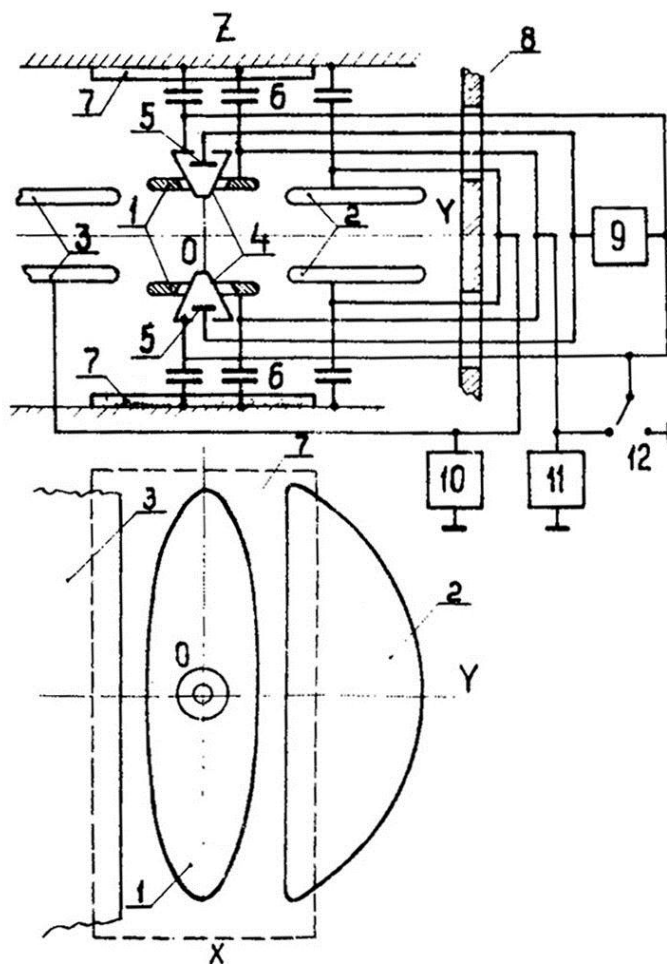


Рис. 7.16. Схема фокусирующей системы синхроциклотрона ПИЯФ: 1 – центральный фокусирующий электрод; 2 – боковой электрод; 3 – дуант; 4 – конусы ионного источника; 5 – катоды ионного источника; 6 – блокировочные конденсаторы; 7 – изоляторы; 8 – стенка вакуумной камеры; 9 – блок питания ионного источника; 10 – источник напряжения смещения дуанта; 11 – блок питания фокусирующего электрода; 12 – переключатель режима работы

На рис. 7.17 приведен чертеж верхней половины центрального электрода и ионного источника, а на рис. 7.18 – фотография фокусирующего устройства в собранном виде. Легкосъемная конструкция центрального электрода позволяет производить быструю замену электрода при проведении работ по оптимизации его геометрии. Электрическая коммутация пластин электродов производится снаружи камеры, что позволяет быстро диагностировать неисправности фокусирующего устройства без вскрытия вакуумной камеры ускорителя. Пластины всех электродов, а также камеры ионного источника охлаждаются при помощи тепловых труб, выполненных из кварцевого стекла с заполнением жидким неполярным диэлектриком. Для охлаждения элементов нижней части фокусирующей системы эти тепловые трубы подключены при помощи дополнительных тепловых мостиков, подводящих тепло к каждой из труб снизу и отводящих его сверху.

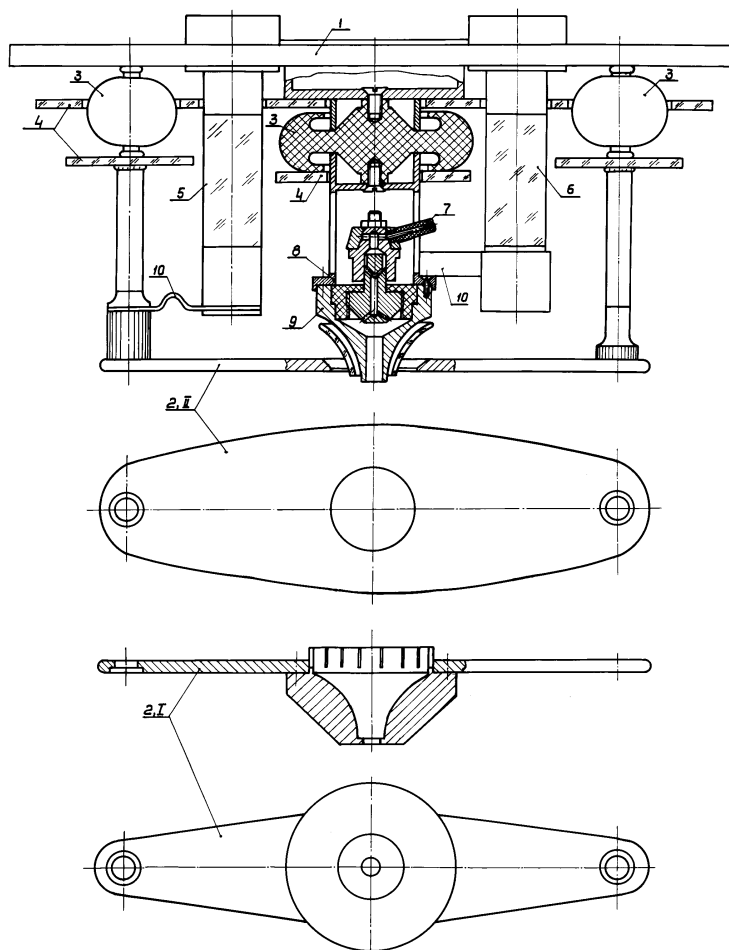


Рис. 7.17. Конструкция верхней половины фокусирующего электрода и ионного источника:

1 – основание; 2 – пластины фокусирующего электрода; 3 – конденсаторы типов К15У-1-100 и К15У-1-470; 4 – стеклянные изоляторы; 5, 6 – тепловые трубы; 7 – штуцер подачи газа; 8 – катод ионного источника; 9 – конус ионного источника; 10 – тепловые мостики



Рис. 7.18. Фокусирующее устройство в собранном виде

Использование фокусирующего устройства показало, что конструкция выдерживает длительную эксплуатацию и без охлаждения, поэтому впоследствии тепловые трубы были демонтированы.

Схема питания и управления

Согласно принципу действия трехэлектродной схемы электростатической фокусировки (рис. 7.15в) на центральный электрод необходимо подавать большой положительный потенциал. Однако, как известно, около любых электродов, находящихся под положительным потенциалом в вакуумной камере синхроциклотрона, при наличии магнитного поля возникает разряд Пеннинга. Этот разряд не только сильно нагружает источник положительного потенциала фокусирующего электрода, но и может приводить к искажению распределения электростатического поля. Для уменьшения мощности источника и нагрева электродов выбрана импульсная схема питания.

Электрическая схема питания фокусирующей системы приведена на рис. 7.19, а на рис. 7.20 показаны диаграммы основных напряжений и синхроимпульсов, поясняющие ее работу. Импульсный источник питания фокусирующего электрода (IV) обеспечивает следующие параметры импульса при отсутствии газа в ионном источнике: амплитуда $U_{\phi} \leq +25$ кВ, длительность импульса на уровне $0,9U_{\max} - 200$ мкс и на уровне $0,5U_{\max} \sim 1$ мс, ток в импульсе $\leq 0,1$ А. Импульс синхронизирован с частотной программой ускорителя.

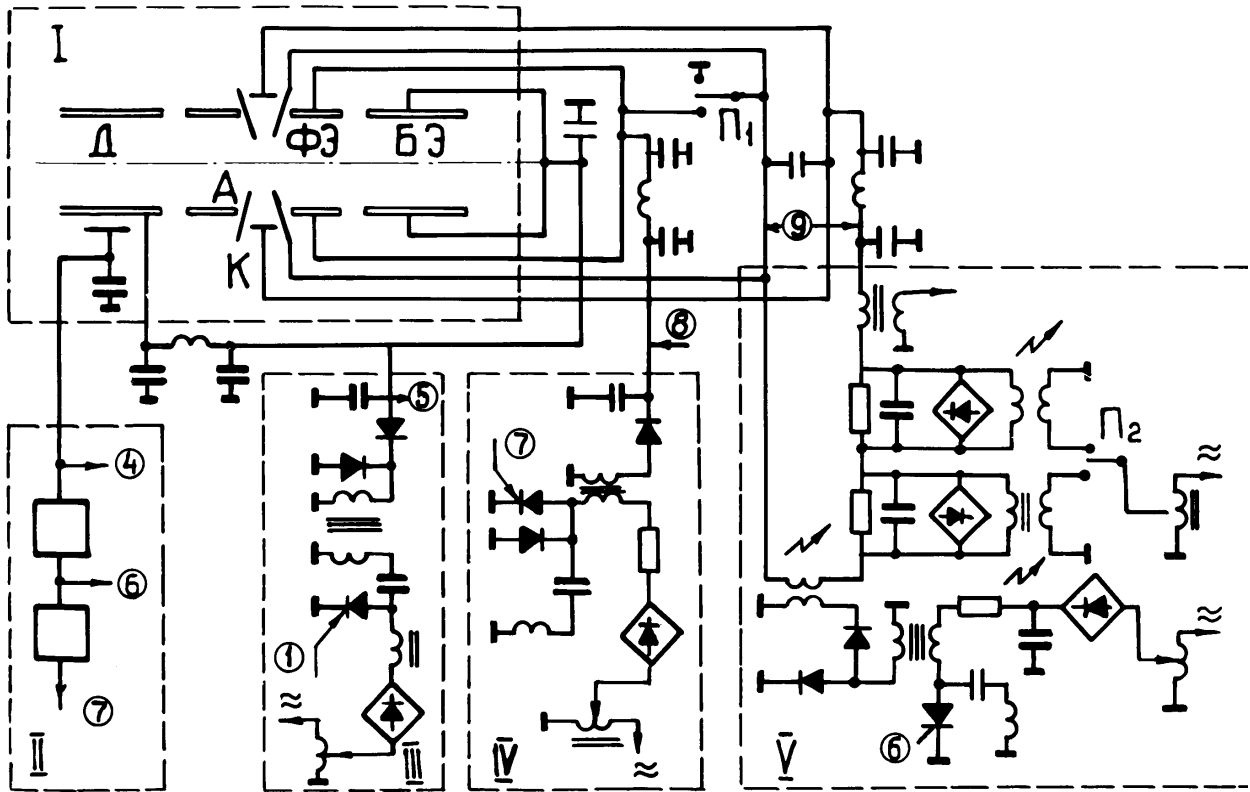


Рис. 7.19. Схема электропитания фокусирующего устройства:

I – камера; II – блок синхронизации с ВЧ-программой; III – источник смещения дуанта; IV – блок питания фокусирующего электрода; V – блок питания ионного источника

Для подачи смещения на дуант и боковой электрод используется принцип подзаряда емкости дуант – земля импульсами отрицательной полярности от источника (III) перед началом каждого цикла ускорения. Такой способ питания дуанта принят с целью автоматического снятия напряжения смещения с ВЧ-системы при возникновении в ней пробоев. При пробое происходит быстрый разряд емкости дуант – земля и автоматический срыв генерации на оставшуюся часть цикла ускорения.

Блок питания (V) позволяет регулировать постоянное напряжение между анодом и катодом ионного источника в пределах ± 300 В. Последовательно с источником постоянного напряжения включен импульсный источник с регулируемой амплитудой до -1 кВ и длительностью $\sim 0,5$ мс. Одновременная подача отрицательного импульсного и положительного постоянного напряжений (рис. 7.20) позволяет получать от ионного источника большие токи в интервале захвата и надежно закрывать его на все остальное время ускорения.

Синхронизация с ВЧ-программой ускорителя осуществляется блоком (II).

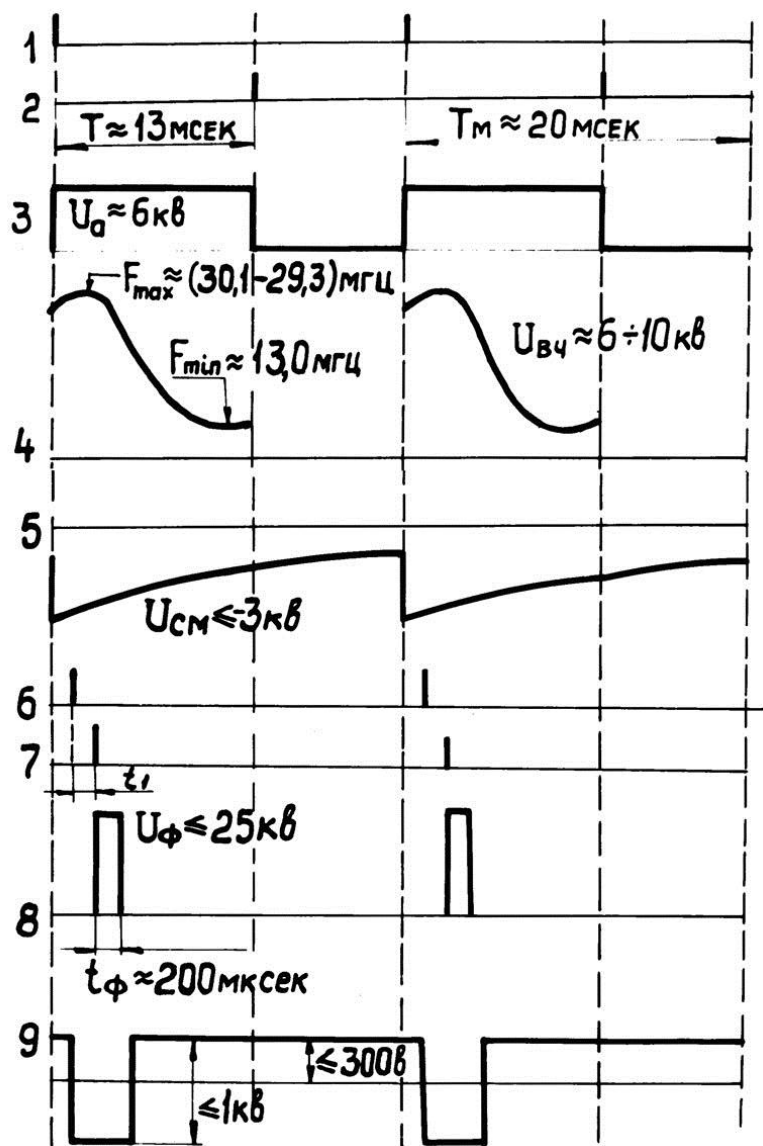


Рис. 7.20. Диаграмма напряжений:

1, 2 – импульсы включения и выключения ВЧ-программы; 3 – амплитуда напряжения на аноде ВЧ-генератора; 4 – частотная программа; 5 – импульс смещения дуанта; 6, 7 – импульсы синхронизации включения напряжения на фокусирующий электрод; 8 – импульс фокусирующего электрода; 9 – напряжение на катоде ионного источника

Распределение электрических полей в центральной области синхроциклотрона

Распределение электрических полей изучалось путем моделирования центральной области ускорительной камеры совместно с дуантом, боковым и фокусирующим электродами и ионным источником в электролитической ванне. При изучении распределения статических полей плазма дуги ионного источника моделировалась металлическим стержнем, диаметр которого соответствовал диаметру отверстия в аноде источника, а потенциал равнялся потенциалу анода. Для ускоряющего ВЧ-поля при-

нималось, что плазма ионного источника не влияет на его пространственное распределение.

Геометрия пластин центрального электрода изображена на рис. 7.17. Длина пластин – 260 мм, расстояние между пластинами по вертикали составляет 180 мм (между конусами – 100 мм). Апертура дуанта и бокового электрода, а также расстояние между ними – 120 мм. Диаметр центрального отверстия конуса ионного источника – 8 мм.

На рис. 7.21 представлено распределение статического потенциала в медианной плоскости при напряжении на фокусирующем электроде $U_{\phi} = +15$ кВ и напряжении смещения на дуанте и боковом электроде $U_{см} = -3$ кВ. Пунктиром показаны границы электродов.

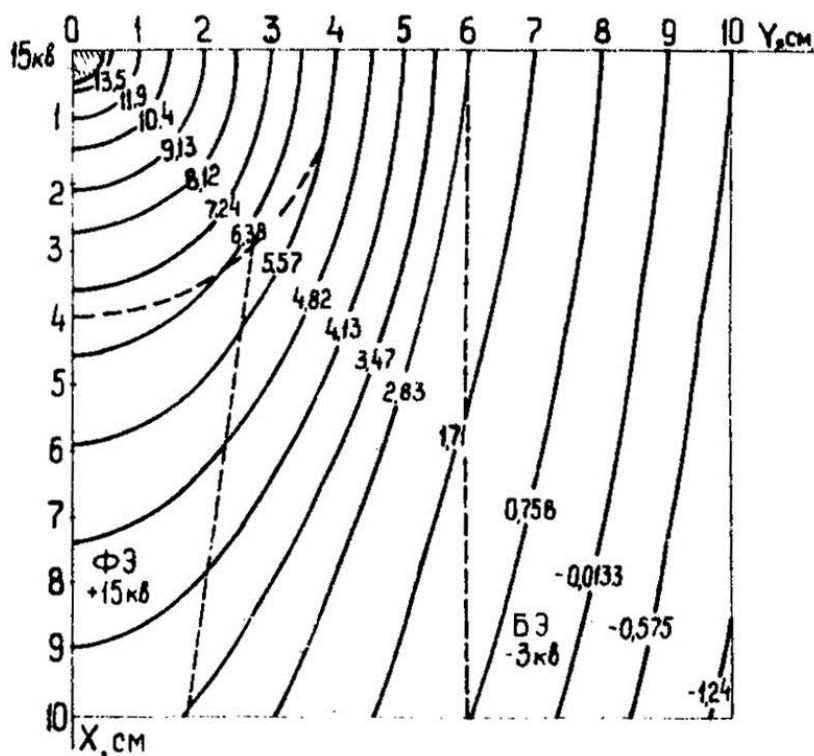


Рис. 7.21. Распределение потенциала электростатического поля в медианной плоскости

На рис. 7.22 показано распределение вертикальной составляющей электростатического поля E_z для вертикальных плоскостей ZOX и ZOY . На рис. 7.23 приведена зависимость от радиуса показателя спада магнитного поля n и эффективного значения $n_{эл.}$ для медианной плоскости ускорителя, а также сумма $n + n_{эл.}$

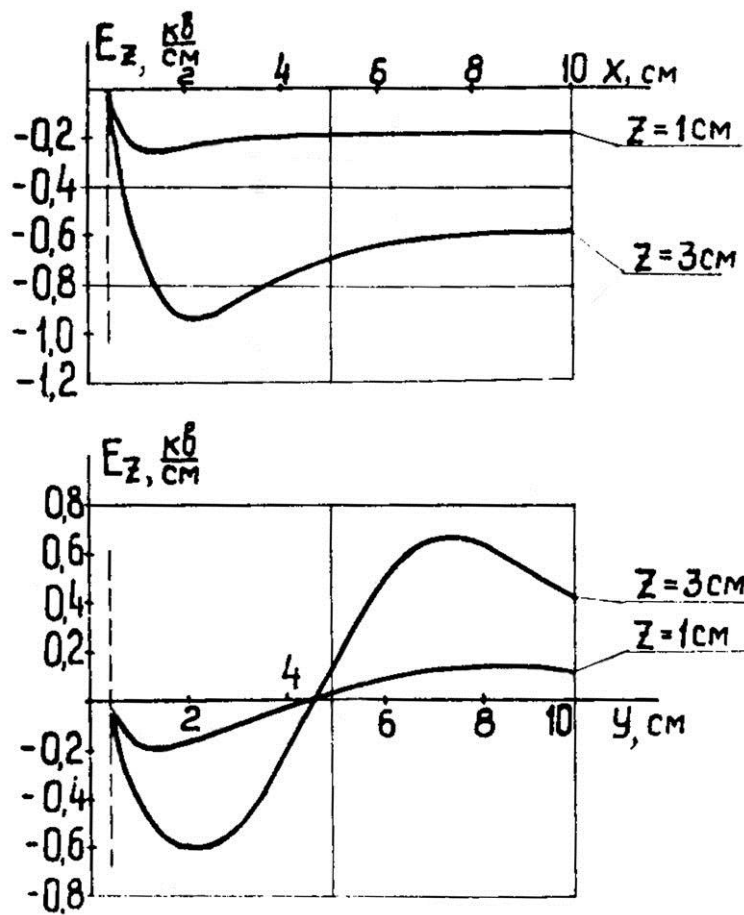


Рис. 7.22. Распределение вертикальных компонент напряженности электростатического поля

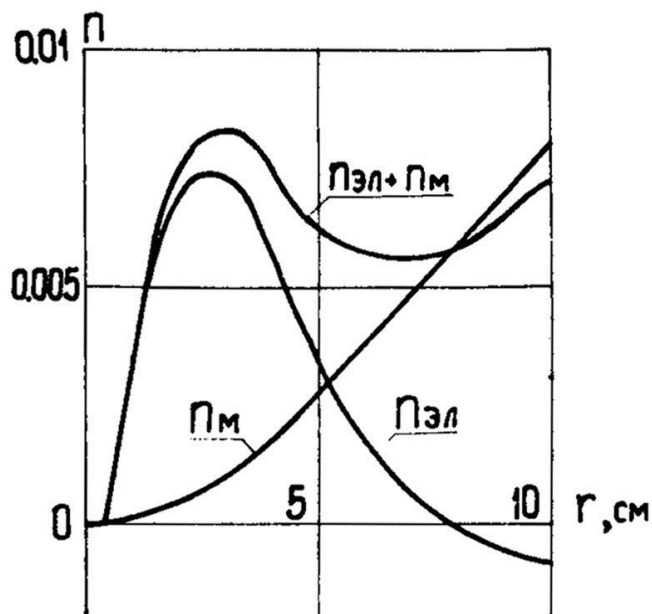


Рис. 7.23. Зависимость показателя спада магнитного поля и эффективного показателя спада электростатического поля $n_{эл}$ от радиуса

Из рис. 7.21–7.23 видно, что электростатическое поле системы вблизи центра ускорителя обладает замкнутыми эквипотенциалами с центральной симметрией, приближающейся к круговой для малых радиусов, а область фокусирующего действия этого поля простирается до радиусов ~ 8 см. Распределение составляющих E_x и E_y по радиусу для плоскостей ZOX и ZOY приведено на рис. 7.24.

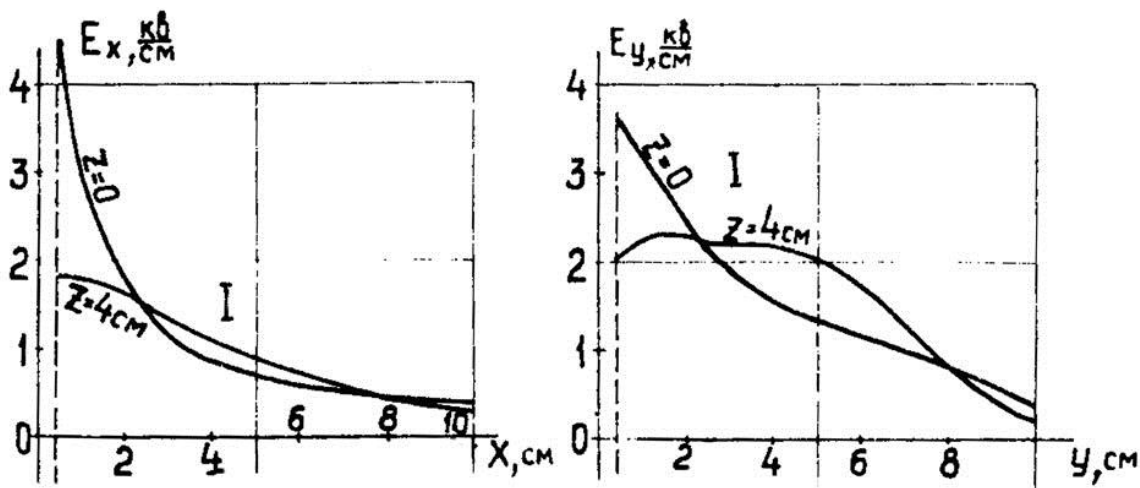


Рис. 7.24. Распределения горизонтальных компонент электростатического поля в плоскостях ZOX и ZOY

Измерения распределений ВЧ электрического поля показало, что установка фокусирующего электрода не приводит к его существенному изменению.

Корректировка частотной программы

Наличие больших величин горизонтальных составляющих электростатических полей (рис. 7.24) приводит к существенному изменению зависимости частоты обращения протона от радиуса. В связи с этим оказалось необходимым предусмотреть возможность оперативной корректировки формы частотной программы ускорителя $f(t)$ вблизи области захвата. Для этой цели были установлены специальные триммерные конденсаторы, подключенные к задней части дуанта. Управление конденсаторами производится дистанционно с пульта управления синхроциклотрона. Место подключения триммерных конденсаторов выбрано таким образом, чтобы изменение формы частотной программы осуществлялось только на начальном этапе цикла ускорения. При увеличении емкости конденсаторов происходит уменьшение максимальной резонансной частоты ВЧ-системы f^{\max} , и диапазон частот захвата сдвигается в область с меньшими значениями производной df/dt .

Такой способ корректировки частотной программы эквивалентен способу изменения df/dt во время захвата путем изменения величины магнитного поля ускорителя. В этом случае область захвата также перемещается относительно кривой $f(t)$ за счет изменения частот обращения, что приводит к изменению производной. В синхроциклотроне ПИЯФ этот способ корректировки может быть использован только при работе с внутренним пучком, т. к. при изменении магнитного поля требуется перестройка системы вывода.

Экспериментальные результаты

Влияние фокусирующей системы на интенсивность выведенного пучка

Экспериментальные результаты были получены при обычном эксплуатационном режиме синхроциклотрона.

На рис. 7.25 (кривая *a*) приведена относительная величина интенсивности выведенного пучка синхроциклотрона I/I_0 в зависимости от напряжения, подаваемого на пластины фокусирующего электрода. Величина $I_0 = 0,08$ мкА соответствует следующим параметрам ускорителя: напряжение на фокусирующем электроде $U_\phi = 0$, напряжение смещения на дуанте и боковом электроде $U_{см} = -2$ кВ, напряжение анод – катод ионного источника $U_{АК} = +100$ В, магнитное поле в центре ускорителя $B_0 = 1,928$ Т и максимальная частота частотной программы ускорителя $f_1^{max} = 30,1$ МГц.

При увеличении напряжения U_ϕ до ~ 6 кВ наблюдается повышение интенсивности выведенного пучка \sim в 4,5 раза. Однако рост напряжения U_ϕ приводит к уменьшению интенсивности, что можно объяснить влиянием радиальной составляющей электростатического поля на радиально-фазовое движение при увеличении U_ϕ .

На рис. 7.25 (кривые *б, в*) приведены зависимости интенсивности выведенного пучка от U_ϕ при $f_2^{max} = 29,7$ МГц и $f_3^{max} = 29,5$ МГц. Такая корректировка формы частотной программы в сторону уменьшения производной df/dt приводит к повышению интенсивности до 8,5 раз и продвижению в область более высоких значений U_ϕ .

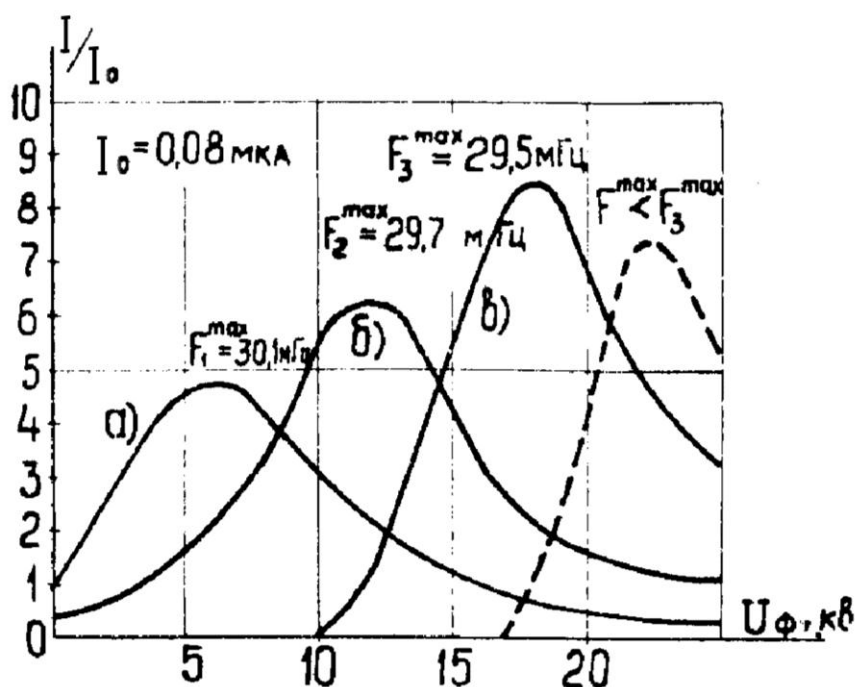


Рис. 7.25. Зависимость интенсивности выведенного пучка от величины фокусирующего напряжения

Значение $f_3^{\max} = 29,5$ МГц является оптимальным. Дальнейшее уменьшение f^{\max} и увеличение U_ϕ приводит уже к меньшим значениям интенсивности пучка. Это может быть объяснено тем обстоятельством, что при больших значениях U_ϕ и, следовательно, при больших величинах радиальной составляющей электростатического поля в центральной области имеет место несогласованность формы частотной программы и зависимости частоты обращения протона от радиуса.

Полностью идентичное (рис. 7.25) семейство зависимостей интенсивности пучка синхроциклотрона от напряжения фокусирующего электрода получается и для случая корректировки частотной программы путем изменения величины магнитного поля B . На рис. 7.26 приведена зависимость относительной интенсивности внутреннего пучка I/I_0 , измеренная на радиусе 293 см, от величины магнитного поля синхроциклотрона при настройке U_ϕ на оптимум для каждого данного значения поля. Здесь же показано значение оптимальной величины напряжения на фокусирующем электроде, при котором было получено соответствующее значение интенсивности. Значение интенсивности $I_0 = 0,27$ мкА получается при $U_\phi = 0$, $U_{cm} = -2$ кВ, $B_0 = 1,928$ Т, $f_1^{\max} = 30,1$ МГц. На этом же рисунке показано изменение интенсивности внутреннего пучка синхроциклотрона при $U_\phi = 0$. Видно, что при отсутствии фокусирующего напряжения интенсивность внутреннего пучка в широких пределах не зависит от вели-

чины магнитного поля и, следовательно, от производной df/dt на начальном этапе ускорения.

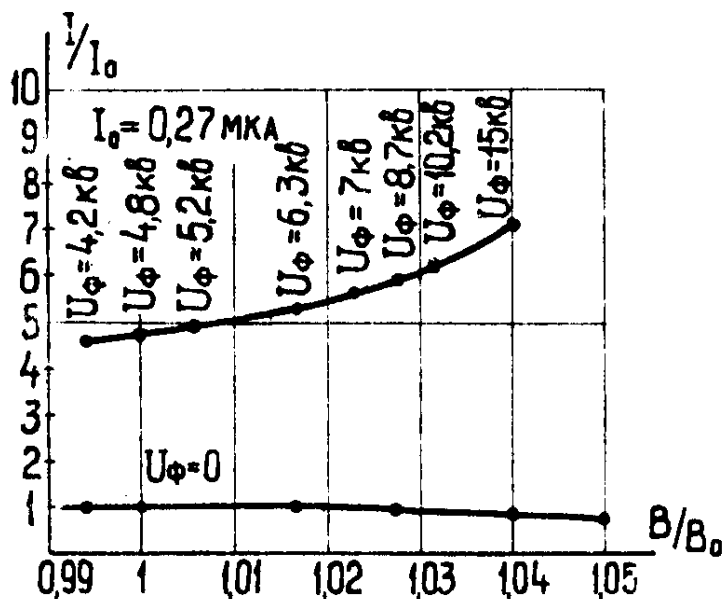


Рис. 7.26. Зависимость интенсивности внутреннего пучка от величины индукции магнитного поля

Влияние электростатического поля на захват

Для того чтобы детально понять причину повышения интенсивности за счет коррекции частотной программы, было произведено экспериментальное исследование процесса захвата. Определение частотных границ диапазона захвата при различных режимах работы ускорителя производилось методом задержки включения ВЧ-генератора и измерения происходящего при этом уменьшения интенсивности пучка синхроциклотрона.

Остановимся подробнее на зависимостях кривых б и в (рис. 7.25). Обращает на себя внимание тот факт, что при отсутствии напряжения на фокусирующем электроде ($U_\phi = 0$) величина интенсивности синхроциклотрона становится либо меньше I_0 , либо полностью равна 0. Так, например, при $f_2^{\max} = 29,7$ МГц интенсивность выведенного пучка I становится равной $0,4I_0$. Такое уменьшение интенсивности происходит за счет обрезания интервала захвата, т. к. в программе генератора $f(t)$ при $f_2^{\max} = 29,7$ МГц отсутствует часть необходимых частот для перекрытия всего диапазона захвата.

При $f_3^{\max} = 29,5$ МГц и $U_\phi = 0$ интенсивность ускорителя равна нулю, т. к. в программе ВЧ-генератора полностью отсутствуют необходимые для захвата значения частот.

При подаче напряжения на фокусирующий электрод ($U_\phi \neq 0$) граничные частоты диапазона захвата определяются не только величиной

магнитного поля ускорителя, но и радиальной составляющей электрического поля, образованного фокусирующей системой. При увеличении U_ϕ диапазон захвата сдвигается в сторону более низких частот, и тогда становится возможным получение интенсивности. Так, например, на рис. 7.25 (кривая *в*) видно, что при $f_3^{\max} = 29,5$ МГц появление отличной от нуля интенсивности становится возможным лишь при напряжении на фокусирующем электроде ≥ 10 кВ.

Таким образом, увеличение интенсивности и возможность продвижения в область больших значений U_ϕ при коррекции частотной программы, как отмечалось выше, действительно связано с согласованием как по начальным частотам захвата, так и по величине производной в диапазоне захвата. В пользу этого утверждения говорит также следующий экспериментальный факт. Величина интенсивности синхроциклотрона изменяется в зависимости от того, находится ли область захвата на плоской части вершины импульса фокусирующего электрода или же на одном из его склонов при одной и той же величине мгновенного значения напряжения, соответствующего середине диапазона захвата f_0 . Так, при расположении области захвата на переднем фронте импульса $U_\phi(t)$ интенсивность увеличивается на 10–15 %, а при работе на заднем фронте примерно настолько же падает по сравнению с расположением захвата на плоской части вершины импульса. Увеличение интенсивности на переднем фронте связано, по-видимому, с дальнейшей оптимизацией закона изменения $f(t)$ в районе диапазона захвата за счет изменения во времени амплитуды $U_\phi(t)$.

В ноябре 1978 года интенсивность выведенного пучка синхроциклотрона ПИЯФ была доведена до 1 мкА, а внутреннего пучка – до 3,5 мкА, при этом число протонов, ускоряемых за один цикл, достигло величины $4 \cdot 10^{11}$ в импульсе, что находится на уровне интенсивностей, запланированных при реконструкции синхроциклотронов ЦЕРН и Колумбийского университета.

Достигнутое увеличение интенсивности нельзя считать предельно возможным для данного метода фокусировки. Продвижение в область более высоких интенсивностей, по-видимому, возможно за счет дальнейшей оптимизации геометрии электродов и подбора более оптимального соотношения между формой спада магнитного поля в центральной области и формой начальной части частотной программы.

При рассмотрении перспектив использования данной схемы на других синхроциклотронах следует учитывать тот факт, что синхроциклотрон ПИЯФ из-за высокой предельной энергии 1 ГэВ и связанной с этим большой сложностью ВЧ-системы имеет относительно малую величину амплитуды ускоряющего напряжения (8–10 кВ). Кроме того, ускорение протонов

до энергии 1 ГэВ требует большего времени ускорения (~ в 1,8 раза), чем, например, синхроциклотрон ЦЕРН или Дубны. По этой причине частота модуляции составляет всего 50 Гц.

Использование предложенной схемы на синхроциклотронах с более высоким ускоряющим напряжением (~ 15 кВ) и частотой повторения ~ 150 Гц может, по-видимому, обеспечить интенсивность внутреннего пучка на уровне 10–20 мкА. На устройство фокусирующей системы было получено авторское свидетельство [12].

Заметим также, что продолжение программы по дальнейшему увеличению интенсивности пучка синхроциклотрона ПИЯФ было признано нецелесообразным. При увеличении интенсивности выведенного пучка больше 1 мкА и, следовательно, увеличении радиационной нагрузки на оборудование и персонал пришлось бы переходить на использование дистанционных манипуляторов при обслуживании систем синхроциклотрона.

7.4. Система стабилизации тока в магнитных элементах трактов транспортировки пучков и система компьютерного управления (комплекс систем стабилизации КСС-3)

Блок-схема КСС-3

В ускорителях заряженных частиц с постоянным магнитным полем типа циклотрон, синхроциклотрон и т. п. значительную долю электротехнического оборудования составляют источники стабилизированного питания постоянным током как самих обмоток ускорителя, так и электромагнитов и линз для трактов транспортировки его пучков [16–18].

На синхроциклотроне ПИЯФ все магнитные элементы (МЭ) трактов транспортировки пучков запитаны от электромашинных агрегатов постоянного тока, которые с 1970 года и до сих пор находятся в непрерывной эксплуатации.

В настоящее время для реализации 8 направлений пучков используется 76 МЭ, питаемых от 43 генераторов постоянного тока с 43 системами стабилизации (СС). Тракты транспортировки пучков komponуются из квадрупольных линз типов МЛ-17, 10К-50, 20К-25, 20К-25А, 20К-50 и электромагнитов СП-35, СП-40Б, СП-53, СП-56, СП-57, СП-72. Используются также нестандартные МЭ в качестве магнитов-корректоров горизонтального и вертикального отклонений пучка, выполненные на основе полупроводниковых источников постоянного тока, управляемых по принципу широтно-импульсной модуляции.

Так как переход на современные источники питания, адаптированные к ЭВМ, например, ИСТ (Россия), PS (Словакия) и т. п. требует значительных материальных затрат, то представляет интерес опыт модернизации электромашинных СС с целью улучшения их эксплуатационных характеристик и полной автоматизации с возможностью управления и контроля через терминалы автоматизированной системы управления (АСУ) ускорителя [19], в том числе через стандартные средства Интернета.

Настоящий раздел посвящен третьей модернизации – КСС-3 и включает описание подсистемы АСУ синхроциклотрона ПИЯФ, предназначенной для контроля и управления СС токов в магнитах и линзах трактов транспортировки заряженных пучков ускорителя. КСС-3 управляется и контролируется как в ручном режиме, так и по локальной сети с использованием ПК [20–24].

Функциональная блок-схема одной из 43-х СС приведена на рис. 7.27. Остальные СС подключены к общим магистральным цепям управления и контроля аналогичным образом.

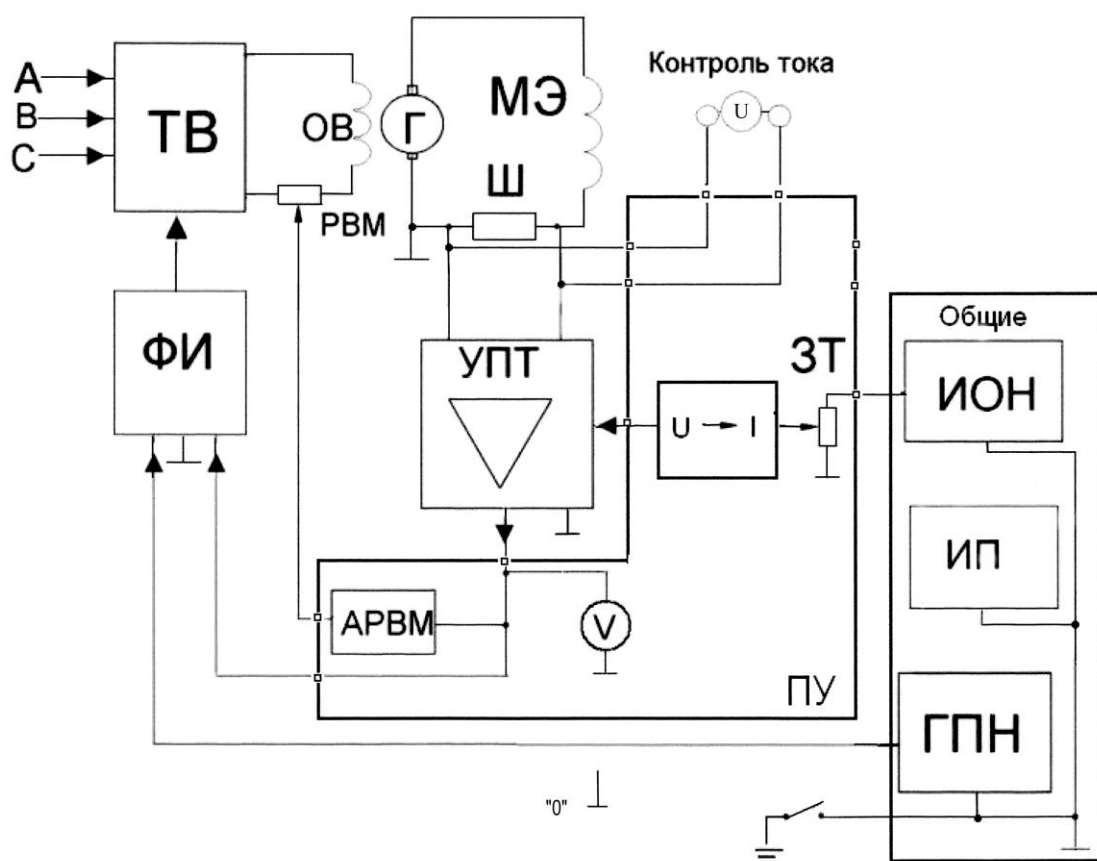


Рис. 7.27. Блок-схема одной из СС (в ручном режиме управления)

Каждая из СС выполнена по обычной схеме авторегулирования с обратной связью (ОС) по величине тока, питающего МЭ, и включает в себя следующие основные блоки:

МЭ – магнитный элемент (поворотный электромагнит, фокусирующая линза, соленоид и т. п.);

Г – генератор постоянного тока электромашинного агрегата, к которому подключается МЭ;

ПУ – пульт ручного управления и контроля за СС;

ОВ – обмотка возбуждения генератора Г;

ТВ – управляемый трехфазный тиристорный выпрямитель для питания ОВ;

Л – схема управления работой ТВ;

РВМ – реостат для независимой регулировки величины тока возбуждения;

АРВМ – блок автоматического управления приводом РВМ;

УБС – устройство блокировки сигнализации;

БЗ – блок защиты;

Ш – токовый шунт, используемый в качестве датчика ОС;

УПТ – усилитель сигнала ошибки (усилитель постоянного тока);

U – напряжение шунта;

ΔU – вольтметр, контролирующий выходное напряжение УП (сигнал рассогласования);

ЗТ – задатчик величины стабилизируемого тока в МЭ (многооборотный потенциометр типа «Гелипот» – в режиме ручного управления, ЦАП – в режиме автоматического управления);

V – вольтметр, контролирующий выходной сигнал УПТ;

МП – микропроцессор.

Все СС объединены в единый комплекс и постоянно подсоединены к общим магистральным шинам питания, управления и контроля. Общими блоками для всех СС являются:

ГПН – источник пилообразного трехфазного напряжения 50 Гц для фазоимпульсного управления ТВ;

ИОН – источник высокостабильного опорного напряжения;

ИП – источники питания полупроводниковой аппаратуры, релейных и сигнальных элементов, БЗ, стойки крейтов КАМАК для автоматизированного управления и т. п.

ФИ – блок формирования импульсов.

При построении КСС-3 сохранены идеология и функциональная структура КСС-2, описанная в [23], при этом большинство блоков модифицированы и переведены на новую элементную базу.

Технические характеристики схемы КСС-3

1. В зависимости от типа и характеристик МЭ:
 - максимальные токи I_{\max} МЭ 62–1 560 А;
 - максимальные напряжения U_{\max} МЭ 30–220 В;
 - постоянная времени t МЭ 0,1–3 с;
 - диапазон регулирования тока 100 % (от 0 до I_{\max}).
2. В зависимости от типа и характеристик генераторов Г:
 - максимальные токи I_{\max} генератора Г 91,5–5 800 А;
 - максимальные напряжения U_{\max} Г 65–220 В;
 - максимальные токи I_{\max} ОВ 3,56–70 А;
 - максимальные напряжения U_{\max} ОВ 115–500 В;
 - постоянная времени T ОВ 0,1–0,3 с.
3. Максимальное напряжение отвода шунта $U_{\text{ш}}$ 2,2 В.
4. Напряжение ИОН $U_{\text{он}}$ +2,35 В.
5. Диапазон преобразователя ($U-I$) 0–4,4 мА.
6. Сопротивление нагрузки преобразователя ($U-I$) 499 Ом.
7. Динамический диапазон выходного напряжения УПТ ± 10 В.
8. Коэффициент усиления УПТ на постоянном токе $\approx 50\,000$.
9. Частота среза коэффициента усиления УПТ 1,3 Гц.
10. Диапазон ГПН ± 10 В.
11. Угол включения ТВ 90° .
12. Чувствительность астатической цепи РВМ (АРВМ) $\pm 0,5$ В.
13. Напряжения: УПТ ± 12 В; ГПН и платы ТВ ± 12 В; ПУ +24 В.
14. Относительная ошибка стабилизации тока 10^{-3} – 10^{-4} .

Принцип работы КСС-3

Все СС работают в режиме как ручного, так и автоматизированного управления и контроля. Ручное управление системами осуществляется с ПУ, размещенных в общих монтажных стойках в измерительном зале корпуса синхроциклотрона. Там же находится крейт с необходимой аппаратурой связи и контроля для работы в автоматическом режиме с использованием ПК и институтской сети связи.

При ручном управлении при помощи ПУ производится: включение – выключение СС, выбор и переключение полярности, установка и регулировка величины тока в МЭ, а также контроль величины напряжения на шунте и контроль выходного напряжения УПТ (вольтметр V).

В ручном режиме (рис. 7.27) для каждой из СС на вход УПТ поступает напряжение с шунта и часть опорного напряжения от эталонного ИОН, величина которого определяется ЗТ. В качестве ЗТ используется многооборотный потенциометр типа ППМЛ, расположенный в ПУ. Сиг-

нал рассогласования между этими напряжениями (сигнал ошибки) увеличивается УПТ и через схему управления ФИ подается на вход управляемого ТВ, осуществляющего авторегулировку тока возбуждения генератора Г и, следовательно, тока в МЭ.

Астатизм системы достигается за счет введения второй цепи ОС по знаку рассогласования (знаку ошибки). При напряжении $\pm 0,5$ В на выходе УПТ включается дополнительная цепь ОС с выхода УПТ через блок АРВМ к приводу РВМ. В зависимости от знака ошибки производится перемещение движка РВМ в сторону отработки статической ошибки рассогласования. Отключение привода реостата происходит в момент, когда выходное напряжение УПТ становится равным нулю. Такое гистерезисное автоуправление используется не только для ограничения величины статической ошибки, но и для автоматического вывода системы на плато стабилизации при включении или перенастройке величины стабилизируемого тока.

При инвертировании полярности тока питания в МЭ синхронно изменяется полярность тока в ОБ и полярность входного сигнала ОС на входе УПТ. Соответствующие коммутирующие элементы (контакторы и реле) на схеме не показаны.

Величина напряжения ОС с шунта при номинальном токе стабилизации $I_{\text{ном.}}$ в МЭ – 2,2 В. Схема сравнения напряжений опоры и шунта позволяет перекрыть весь диапазон стабилизируемых токов $0-I_{\text{ном.}}$ при сохранении величины абсолютной ошибки стабилизации. Точковый шунт имеет несколько отводов, переключением которых можно компенсировать уменьшение напряжения ОС при переходе к величинам стабилизируемых токов $\leq 0,5I_{\text{ном.}}$, уменьшая тем самым относительную ошибку стабилизации. Переключение отводов шунта производится через однофазные тиристорные переключатели с централизованного пульта коммутации и питания систем электроэнергией.

Описание блоков КСС-3

При конструировании КСС-3 особое внимание было обращено на повышение надежности эксплуатации, т. к. выход из строя одной из СС приводит к остановке работы синхроциклотрона на физический эксперимент.

Все блоки комплекса стандартизированы и конструктивно выполнены в модульном исполнении, позволяющем быстро производить их замену. Объединение СС в единый комплекс с использованием общих блоков питания, управления и контроля позволило снизить количество аппаратуры и повысить надежность эксплуатации. Все общие блоки дублированы и имеют резервное переключение.

Ниже приведено краткое описание отдельных устройств, входящих в КСС-3.

Усилитель постоянного тока – УПТ

В цепи ОС для усиления сигнала рассогласования применен УПТ, выполненный по схеме дифференциального усилителя постоянного тока на основе интегральной микросхемы мА А725.

С целью упрощения обслуживания и взаимозаменяемости блоков все УПТ стандартизированы по коэффициентам усиления и частотной коррекции. Коэффициент усиления – $5 \cdot 10^3$. Полоса пропускания УПТ ограничена частотой 1 кГц, а ниже частоты среза 0,3 Гц осуществлен подъем коэффициента усиления 6 дБ на октаву. На нулевой частоте УПТ имеет коэффициент усиления, близкий к паспортному значению микросхемы, $\approx 50 \cdot 10^3$.

С целью максимизации коэффициента соотношения сигнал – шум на измерительном входе микросхемы все УПТ, выполненные в блочном исполнении, располагаются непосредственно на шунтах. Для устранения влияния наводок, ВЧ- и импульсных помех опорный вход микросхемы УПТ защищен LC-фильтром и преобразователем $I-U$ опорного тока в опорное напряжение. Коэффициент преобразования равен 0,5 В/мА, а входное эквивалентное сопротивление на постоянном токе близко к нулю. С этой же целью нулевой провод (\perp) для всех систем выполнен в виде изолированной шины сечением 5 мм² и заземлен только в одной точке K (рис. 7.27). Такая компоновка УПТ позволила обойтись без применения экранированных проводов в подводящих цепях, несмотря на значительную удаленность отдельных элементов СС друг от друга.

Выход УПТ контролируется ноль-прибором визуального контроля, сигнализирующим о нахождении системы в пределах плато стабилизации.

Тиристорный выпрямитель – ТВ

Предназначен для питания ОВ генераторов Г, соответствующих СС. Ток питания – 10–20 А, напряжение питания – 115–500 В. ТВ представляет собой сетевой (3×50 Гц) источник тока, управляемый фазоимпульсным способом. Величина тока ТВ регулируется за счет смещения фазы подачи поджигающих тиристоры импульсов.

Формирование этих импульсов происходит в блоке ФИ в моменты сравнения выходного напряжения УПТ с трехфазным пилообразным напряжением, вырабатываемым в общем блоке ГПН. Все СС работают вблизи фазового угла включения $\pi/2$, где коэффициент усиления (преобразования) ТВ имеет максимальное значение независимо от заданной величины стабилизируемых в МЭ токов, т. е. при постоянном значении выходного напряжения ТВ и соответствующем положении движка бал-

ластного РВМ, что достигается введением второй цепи ОС и блоком автоматического управления приводом АРВМ.

Для питания ТВ используются трехфазные анодные трансформаторы соответствующего номинала. Так как все СС объединены в единый комплекс и имеют один рабочий ГПН, то все анодные трансформаторы сфазированы одинаковым образом (АВС).

Пульт управления – ПУ

Предназначен для управления СС в ручном режиме. Выполненные в виде отдельных блоков, ПУ всех СС скомпонованы в общей стойке и территориально находятся в измерительном зале синхроциклотрона, что позволяет физикам-экспериментаторам вмешиваться в режим работы СС. Все ПУ взаимозаменяемы.

В ручном режиме с ПУ возможно осуществлять следующие операции: включение – выключение СС, выбор и переключение полярности, установку величины регулируемого тока.

Для визуального контроля выведены сигналы готовности СС к включению (наличие электропитания, охлаждающей воды, отсутствие постоянного заземления и т. п.), а также сигналы аварийного отключения при возрастании тока $\geq I_{\max}$ при аварийном заземлении и т. п. На ПУ находится также вольтметр V для контроля выхода УПТ и клеммы U для подключения выносного измерителя к шунту.

ПУ является также общим коммутационным узлом для подключения всех остальных модулей (блоков) КСС-3 к магистральным шинам общих блоков питания и контроля, в том числе ЭВМ. Логическая схема коммутации ПУ, схема УБС выполнены без использования электромеханических реле на высокопороговых микросхемах серии 561, транзисторах и светодиодах и исключают аварийную ситуацию при любых неправильных операциях ручного управления.

Блок защиты – БЗ

Так как все СС объединены в единый комплекс и постоянно кондуктивно соединены с общей нулевой шиной, то особое внимание было уделено предупреждению аварийных ситуаций при постороннем (случайном) заземлении любой из цепей СС.

Особенное значение приобретают случаи такого заземления токоведущих проводов питания МЭ. Разветвленная сеть шинопроводов от машин-генераторов Г к МЭ, расположенным в разных корпусах на расстоянии 200–500 м, наличие переключающих пунктов, конструкция токовых шунтов с отводами, переключаемыми силовыми тиристорами, наличие металлического вакуумного канала для проводки пучков, проходящего

через зазоры электромагнитов и фокусирующих линз в непосредственной близости от их обмоток питания, наличие многочисленных реле протока системы водоохлаждения и т. п. существенно увеличивают вероятность попадания посторонней «земли» на шинопроводы МЭ. Происходит это главным образом в периоды остановок ускорителя при перемонтаже вакуумного тракта, профилактических и других работах вблизи МЭ.

Следует отличать случаи постороннего заземления той части шинопровода МЭ, которая находится под потенциалом питания МЭ генератором Г, и той части со стороны шунта, которая находится под нулевым потенциалом. В первом случае постороннее заземление закорачивает выход генератора питания Г, приводя к аварийному короткому заземлению. Во втором случае заземление приводит к ухудшению качества стабилизации и ухудшению соотношения сигнал – шум из-за появления паразитных токов в общем нулевом проводе, оказывающемся заземленным в двух разных точках. Следует указать, что постороннее заземление любой из неработающих СС в любой точке шинопровода также приводит к ухудшению качества стабилизации работающих систем.

КСС-3 снабжен системой защиты, которая запрещает включать или осуществляет аварийное отключение СС в первом случае, а также позволяет проконтролировать отсутствие постороннего заземления во втором случае. При наличии посторонней «земли» в КСС появляются звуковые или световые сигналы. При размыкании общего ключа нулевой шины *K* весь КСС находится в подвешенном относительно «земли» состоянии.

Для быстрого обнаружения неисправностей в КСС-3 предусмотрен переносной блок настройки и проверки работоспособности отдельной СС. Блок выполнен в конструктивном модуле, соответствующем модулю ПУ, и подключается к СС вместо ПУ в соответствующую ячейку стойки ПУ. Блок снабжен необходимым набором приборов, переключателей, контрольных регуляторов и т. п., которые позволяют продиагностировать работоспособность отдельных блоков СС и быстро выявить причину неисправности в работе КСС.

Автоматизация КСС-3

КСС-3 включен в АСУ синхроциклотрона ПИЯФ и образует подсистему автоматизированного управления токами МЭ – АСУ КСС. Функциональное назначение АСУ КСС-3:

- автоматическое программное управление всеми СС, входящими в КСС-3;
- управление величинами стабилизируемых токов в МЭ;
- контроль текущих значений токов (через напряжение на шунте);

- отображение информации состояния СС на ПК центрального ПУ синхроциклотрона и ПК пользователя;
- накопление и статистическая обработка информации о функционировании СС;
- коррекция значений, вышедших из зоны допусков;
- контроль за состоянием отдельных блоков, входящих в КСС-3.

При переходе с ручного на автоматический режим работы структурная перестройка КСС заключается лишь в переключении ЗТ. В ручном режиме ЗТ является потенциометр ЗТ, находящийся в ПУ и подключенный к общему ИОН, а в автоматическом режиме – соответствующий микропроцессорный регулятор, расположенный в крейте. Изменяется также логика при командах: включение – выключение, изменение полярности и т. п.

Контроллер-стабилизатор тока в магнитных элементах

Для автоматического управления работой каждой СС комплекса работан микропроцессорный контроллер-стабилизатор тока (далее – контроллер) МЭ, подключаемый в контур управления вместо ручного ПУ. Контроллер имеет интерфейс RS485 для подключения к магистрали связи с компьютером верхнего уровня. Таким образом, создается автоматизированный комплекс, связывающий все СС с компьютером, выполняющим функции централизованного ПУ. К магистрали RS485 можно подключить до 127 контроллеров, имеющих адресуемый протокол обмена. Программа пульта имеет дистанционный доступ через стандартные средства Интернета. Это дает возможность реализовывать виртуальный центральный пульт дистанционного управления и контроля КСС на любом удаленном компьютере пользователя.

Для начала работы контроллера достаточно ввести значение полярности тока, величину рабочего напряжения на шунте и дать команду СТАРТ. Далее контроллер работает в автономном режиме. Для обмена информацией с ПК контроллер имеет 32-разрядный статусный регистр с информацией о текущем состоянии как самого контроллера, так и управляемой СС. Биты уточненного состояния помогают локализовать возможные неисправности в системе. В процессе работы ПК может читать текущее значение напряжения на шунте для визуализации работы контроллера. Контроллер имеет встроенную программную защиту от запрещенных операций (например, от попытки переключить полярность тока МЭ под питанием), что совместно с аппаратной защитой, встроенной в СС, и с программной защитой от некорректных операций в ПК повышает общую безопасность управления силовым оборудованием. Контроллер является линейным регулятором с апериодическим процессом

регулирования и интегральным накоплением сигнала рассогласования. Функциональная схема контроллера приведена на рис. 7.28.

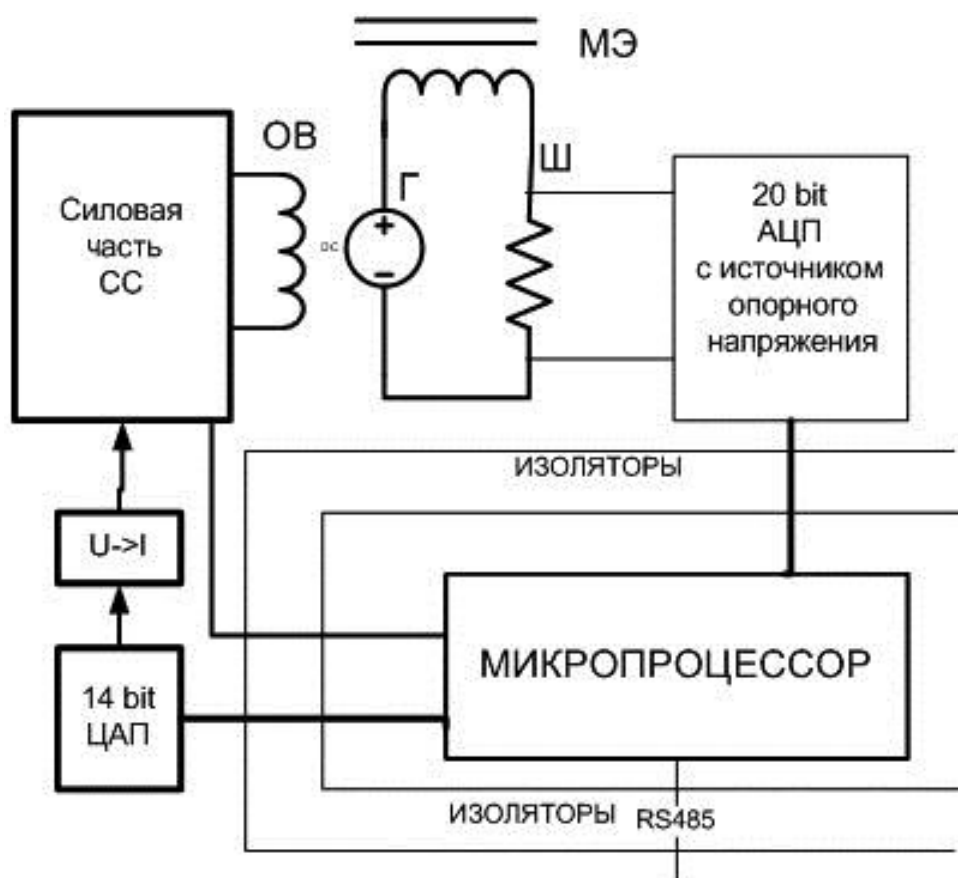


Рис. 7.28. Блок-схема места контроллера в СС

Особенностью реализации контроллера является полная электрическая изоляция измерительных и управляющих узлов друг от друга и от МП. Электрическая прочность изоляции – 1 000 В. Используются изолирующие *DC/DC*-преобразователи, быстрые интегральные изоляторы для внутренних логических сигналов и оптрона для обмена управляющими и статусными сигналами с СС. Изоляция узлов решает проблемы локализации аварийных ситуаций, полностью развязывает цепи заземлений и позволяет функциональным узлам находиться под разными потенциалами. Интерфейс RS485 также имеет изолированный выход на магистраль связи.

Узел аналого-цифрового преобразователя – АЦП

Узел АЦП находится под потенциалом шунта измерительной цепи МЭ. Входы АЦП подключены непосредственно к отводам шунта. Контроллер использует прямое значение напряжения на шунте в качестве опорной величины при стабилизации. Поэтому качество АЦП является основным параметром, определяющим итоговую точность управления.

АЦП обладает следующими параметрами:

- ширина канала – 5 мкВ (20-разрядный, шкала $\pm 2,5$ В);
- индивидуальный ИОН расположен непосредственно у выводов АЦП, долговременная нестабильность – не более $1,4 \cdot 10^{-5}$;
- встроенный в АЦП цифровой фильтр подавляет помеху на частоте 50 Гц не хуже 100 дБ;
- имеется режим самокалибровки нуля и полной шкалы по ИОН, включаемый по команде МП.

АЦП работает в режиме непрерывного измерения и выдает около 400 результатов в секунду. МП обслуживает АЦП в режиме прерываний и выполняет прием и усреднение данных. Таким образом, в распоряжении рабочей программы МП всегда имеются данные о напряжении на шунте.

Узел цифро-аналогового преобразователя – ЦАП

В контроллере используется 14-разрядный ЦАП. Выход ЦАП через преобразователь напряжение – ток со шкалой 0–5 мА на нагрузке до 700 Ом является источником управляющего токового сигнала для силовой части СС. Узел полностью гальванически изолирован, выходной токовый сигнал находится под потенциалом точки подключения в СС. Токовый выход имеет схему контроля на обрыв цепи, сигнал выдается в МП. Стабильность выходного сигнала достигается использованием индивидуального ИОН с параметрами, аналогичными источнику в АЦП. Следует отметить, что максимальная абсолютная погрешность примененных ИОН равна 1 мВ при номинале 2,5 В. Поэтому при замене контроллеров может потребоваться коррекция задаваемого U шунта в младшем знаке. Вследствие деградации парка измерительных приборов разработчик не смог измерить истинное отклонение выходных напряжений ИОН от паспортного номинала. Для 10 проверенных источников в первых трех знаках после запятой отклонение не выявлено.

Микропроцессор. Алгоритм работы контроллера

Основное состояние МП – ФОН. Контролируются сигналы состояния СС, считываются и усредняются данные с АЦП, сравниваются, если контроллер под током, с заданным значением напряжения на шунте, проверяется прием команды от управляющего ПК. Ввод команд от ПК происходит на уровне прерываний.

В состоянии УСТАНОВКА РАБОЧЕЙ ТОЧКИ МП система переходит при получении соответствующей команды от ПК. Сначала проверяются все сигналы состояния СС. Так как точная характеристика кривой

управляющий ток – напряжение шунта неизвестна, реализуется адаптивный алгоритм ввода тока управления с предварительным грубым вычислением границ зоны захвата для перехода в режим стабилизации. Контролируется появление сигнала на шунте и его возрастание по мере ввода тока управления. Приращение ЦАП = 4 разряда. Период его изменений задается таймером. Далее возможны 3 варианта:

1) введенный ток достиг нижней границы рабочей зоны, а напряжение на шунте не появилось. Фиксируется ошибка НЕТ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА;

2) введенный ток достиг верхней границы зоны, а напряжение на шунте не достигло заданного значения. Фиксируется ОШИБКА АП;

3) введенный ток находится в зоне, разница между напряжением на шунте и заданным значением меньше, чем ширина зоны захвата для стабилизации. МП переходит в режим СТАБИЛИЗАЦИЯ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ с изменением ЦАП на ± 1 разряд.

Центральный пульт управления КСС. Программное обеспечение

Пример рабочего окна программы управления КСС-3 приведен на рис. 7.29. Основные усилия при разработке были приложены к максимальному упрощению и обеспечению безопасности работы системы для пользователя, далекого от технических проблем автоматизации.

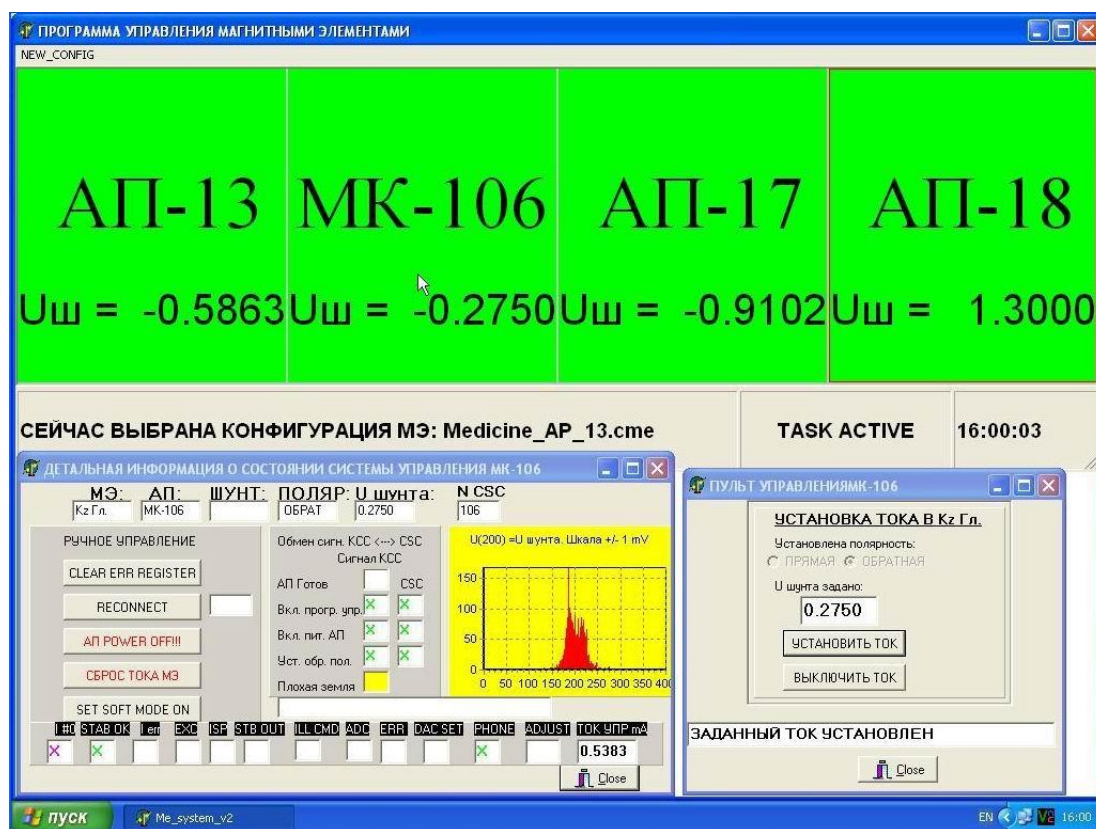


Рис. 7.29. Рабочие окна ПУ КСС-3

При запуске программы вызывается рабочая конфигурация МЭ, заранее подготовленная квалифицированным персоналом. Эта конфигурация отображается в виде таблицы с перечнем рабочих элементов и их текущим состоянием. Исходное состояние должно быть АП В СХЕМЕ. Для установки тока в любом элементе достаточно поместить указатель мыши на квадрат с данным МЭ и нажать правую кнопку. Откроется окно ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ ХХХХ, где ХХХХ – название выбранного МЭ (правый нижний угол). Нажатие кнопки УСТАНОВИТЬ ТОК запускает операцию. Процесс ввода тока виден, как и появление и изменение напряжения на шунте МЭ. По завершении ввода тока соответствующий элемент таблицы МЭ приобретает зеленую окраску. Когда вся система готова к работе, таблица полностью окрашивается в зеленый цвет.

При установке указателя мыши на квадрат с нужным МЭ и нажатии левой кнопки откроется окно ДЕТАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ (левая нижняя часть экрана). Здесь содержится вся информация о текущем состоянии выбранной СС. Для пользователя может представлять интерес гистограмма распределения сигналов на шунте в процессе работы. Она демонстрирует качество работы СС. При выходе из сеанса данные всех гистограмм запоминаются в файлах протоколов. Практика эксплуатации системы показала, что U шунта поддерживается с точностью не хуже ± 150 мкВ в течение нескольких суток.

Для поддержания длительной абсолютной стабильности U шунта программа иницирует 1 раз в час перекалибровку всех АЦП. Все события в системе фиксируются в файле протокола работы. Для выбора новой рабочей конфигурации следует использовать меню NEW. Появится весь список конфигураций, имеющийся в системе.

Отметим, что разработанная система КСС-3 полностью адаптирована также к режиму авторегулирования, что позволяет решать задачи многопараметрической оптимизации трактов пучков по одному или нескольким критериям качества: настройка тракта пучка по максимуму интенсивности, по положению центра тяжести пучка, по поперечному распределению плотности частиц и т. п.

В режиме оптимизации настраиваемого тракта к работе КСС-3 подключаются еще две подсистемы АСУ синхроциклотрона: подсистема управления измерителями профиля пучка (профилόμεтрами) и подсистема управления коллиматорами. В этом режиме выходные уровни ЗТ ЦАП для некоторых из СС устанавливаются по соответствующему алгоритму с учетом информации, получаемой с измерителей параметров пучка. В качестве профилόμεтров используются как координатно перемещаемые датчики – измерители интенсивности пучка, так и многопроволочные пропорциональные ионизационные камеры.

Режим авторегулирования позволяет также осуществлять программное изменение параметров пучка в течение эксперимента или облучения больных: изменение дозы, профиля, пространственное сканирование, коллимирование и т. п. Естественно, что скорость такого авторегулирования ограничена постоянной времени соответствующего МЭ.

В режиме авторегулирования может осуществляться также процесс гистерезисного перемагничивания МЭ и выход на плато заданной величины магнитного поля. Отметим, что использование в МЭ вместо шунтов датчиков-магнитометров, например, на принципе ЯМР затруднено (или практически невозможно) в условиях работы и эксплуатации синхроциклотрона: высокий уровень радиации в местах расположения МЭ, большие величины наводок ВЧ и 50 Гц от импульсно работающего генератора дуанта синхроциклотрона, отсутствие в зазорах МЭ места для расположения датчиков ЯМР из-за наличия вакуум-провода и др.

Описанная подсистема АСУ синхроциклотрона ПИЯФ КСС-3 обеспечивает как ручное, так и автоматизированное управление и контроль за всеми источниками стабилизированного питания МЭ трактов пучков, причем основные эксплуатационные параметры (стабильность, надежность, степень автоматизации и контроля) аналогичны параметрам для источников электропитания магнитов и линз современного уровня (типов ИСТ, PS EVPU и др.), несмотря на использование электромашинных агрегатов и токовых шунтов.

КСС-3 адаптирована к режиму авторегулирования, что позволяет проводить дальнейшее усовершенствование системы, когда тракты будут автоматически настраиваться по выбранному критерию качества пучка (интенсивность, плотность интенсивности, состав вторичных мезонных пучков и т. п.).

Объединение всех СС в единый комплекс значительно сокращает количество необходимой радиоаппаратуры за счет использования общих для всех систем блоков (ИОН, ГПН, блоков общего питания, защиты и т. п.). Требования к надежности работы этих блоков были повышены. Система централизованной диагностики и контроля, а также стандартизация всех радиотехнических блоков позволяют быстро находить неисправности и устранять их.

К недостаткам можно отнести особенность структурной схемы КСС-3, при которой силовые части всех систем питания кондуктивно связаны друг с другом общей «земляной» шиной (\perp). Наличие разветвленной «земляной» цепи, обладающей многочисленными емкостными и резистивными утечками через конструктивные элементы обмоток электромашинных агрегатов, токовых шунтов, обмоток МЭ и т. п. приводит к повышению уровня электромагнитных помех на входах УПТ.

Система прошла период опытной эксплуатации в течение двух лет. Выполнена некоторая коррекция, неизбежная при доводке сложных комплексов. Опыт эксплуатации показал высокую надежность и удобство использования системы.

Публикации

1. **Абросимов Н. К., Волченков В. А., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Коптев В. П., Круглов С. П., Микиртычьянц С. М., Малов Ю. А., Орицин Е. М., Рябов Г. А., Уваров Л. Н., Щербаков Г. В., Шевель Л. Ф.** Измерение времени жизни π^+ -мезона. Препринт ЛИЯФ 1073. Л., 1985. 50 с.
2. **Abrossimov N. K., Borukhovich G. Z., Laptev A. V., Marchenkov V. V., Petrov G. A., Shcherbakov O. A., Tuboltsev Y. V., Yurchenko V. I.** Neutron Time-of-Flight Spectrometer GNEIS at Gatchina 1 GeV Proton Synchrocyclotron // NIM. 1985. V. A242. P. 121–133.
3. **Абросимов Н. К., Десятериков Р. П., Котов А. Г., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Чернов Н. Н.** Система увеличения длительности импульса протонного пучка синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР. Препринт ЛИЯФ 1. Л., 1972. 22 с.
4. **Абросимов Н. К., Котов А. Г., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Чернов Н. Н., Юрченко В. И.** Совмещенная система для увеличения длительности и быстрого сброса протонного пучка синхроциклотрона // Тр. III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1973. Т. 2. С. 94–98.
5. Способ уменьшения потерь частиц в синхроциклотроне при использовании временной растяжки пучка с помощью С-электрода: а. с. № 497934 с приоритетом от 03.01.1974 / **Н. К. Абросимов, А. В. Куликов, Г. Ф. Михеев, Н. Н. Чернов.**
6. **Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Котов А. Г., Михеев Г. Ф., Покровский А. С., Рябов Г. А., Сандлер Б. З., Чернов Н. Н.** Система временной растяжки пучка синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР // Методические и прикладные работы ЛИЯФ: сб. Л., 1988. С. 177–179.
7. Устройство для растяжки во времени пучка синхроциклотрона: а. с. № 370901 с приоритетом от 20.07.1972 / **А. В. Куликов, Н. Н. Чернов.**
8. **Абросимов Н. К., Волченков В. А., Гордеев В. А., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Коптев В. П., Круглов С. П., Микиртычьянц С. М., Рябов Г. А., Щербаков Г. В.** Подпороговое рождение K^+ -мезонов при взаимодействии протонов с энергией 1 ГэВ с ядрами С, Al, Cu и Pb. Препринт ЛИЯФ 704. Л., 1981. 25 с.
9. **Абросимов Н. К., Волченков В. А., Гордеев В. А., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Коптев В. П., Круглов С. П., Микиртычьянц С. М., Рябов Г. А., Щербаков Г. В.** Пучки π^- - и μ -мезонов низких энергий на синхроциклотроне ЛИЯФ АН СССР // Тр. VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1983. Т. 2. С. 90–93.

10. **Абросимов Н. К., Борухович Г. З., Каминкер Д. М., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Петров Г. А., Чернов Н. Н.** Гатчинский нейтронный спектрометр на базе синхроциклотрона ФТИ (ГНЕЙС) // Нейтронная физика: материалы Всесоюзного совещания. Киев: Наукова думка, 1972. Ч. II. С. 188.
11. **Абросимов Н. К., Борухович Г. З., Куликов А. В., Левицкий Л. А., Михеев Г. Ф., Петров Г. А., Чернов Н. Н., Юрченко В. И.** Нейтронный спектрометр по времени пролета на базе синхроциклотрона ЛИЯФ им. Б. П. Константинова АН СССР // Нейтронная физика: материалы 3-й Всесоюзной конф. по нейтронной физике. М., 1976. Ч. 6. С. 221–226.
12. Фокусирующее устройство синхроциклотрона: а. с. № 743243 с приоритетом от 15.12.1977 / **Н. К. Абросимов, А. В. Куликов, Г. Ф. Михеев.** Бюл. № 23, 1980. С. 341.
13. **Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А.** Увеличение интенсивности пучка синхроциклотрона ЛИЯФ им. Б. П. Константинова АН СССР за счет улучшения электростатической фокусировки в центральной области // Тр. VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1979. Т. I. С. 277–280.
14. **Абросимов Н. К., Асташин В. В., Дмитриев С. П., Котов А. Г., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Покровский А. С., Рябов Г. А.** Повышение интенсивности пучка синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР. Препринт ЛИЯФ 463. Л., 1979. 33 с.
15. **Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Котов А. Г., Михеев Г. Ф., Покровский А. С., Рябов Г. А., Сандлер Б. З.** Увеличение интенсивности пучка синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР за счет улучшения электростатической фокусировки в центральной области // Методические и прикладные работы ЛИЯФ: сб. Л., 1988. С. 175–177.
16. **Абросимов Н. К., Дмитриев С. П., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Куликов А. В., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А.** Реконструкция тракта протонного пучка синхроциклотрона ЛИЯФ // Тр. IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. Т. 1. С. 348–352.
17. **Абросимов Н. К., Герасимов А. М., Дмитриев А. М., Елисеев В. А., Иванов Е. М., Коровина Л. А., Крышень Л. М., Михеев Г. Ф., Перский М. С., Рябов Г. А.** Реконструкция протонного тракта главного зала синхроциклотрона ЛИЯФ // Методические и прикладные работы ЛИЯФ: сб. Л., 1988. С. 182–183.
18. **Абросимов Н. К., Михеев Г. Ф., Петров И. А., Решетников Д. В., Рябов Г. А.** Коррекция положения пучка на синхроциклотроне на 1 ГэВ. Препринт ЛИЯФ 1168. Л., 1986. 18 с.
19. **Герасимов А. М., Куликов А. В., Михеев Г. Ф.** Автоматизированная система управления синхроциклотрона // Управляемые системы и машины (УСИМ). Киев, 1978. Вып. 1. С. 116–119.

20. *Асташин В. В., Горкин Г. Н., Инжееватов В. Н., Куликов А. В., Михеев Г. Ф.* Комплекс систем стабилизации токов магнитов и линз трактов пучков синхроциклотрона на 1 ГэВ ЛИЯФ АН СССР // Материалы VII Всесоюзной школы по автоматизации научных исследований ЛИЯФ АН СССР. Л., 1974. С. 450–455.
21. *Асташин В. В., Горкин Г. Н., Инжееватов В. Н., Куликов А. В., Михеев Г. Ф.* Комплекс систем стабилизации токов в магнитных элементах транспортировки заряженных частиц синхроциклотрона на 1 ГэВ ЛИЯФ АН СССР. Препринт ЛИЯФ 108. Л., 1974. 16 с.
22. *Абросимов Н. К., Герасимов А. Н., Коровина Л. А., Крышень Л. М., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А.* Автоматизированная система управления трактами пучков на синхроциклотроне ЛИЯФ АН СССР // Тр. X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1987. Т. 2. С. 221–224.
23. *Абросимов Н. К., Васильев А. М., Герасимов А. М., Дмитриев С. П., Коровина Л. А., Крышень Л. М., Михеев Г. Ф., Новиков В. С., Покровский А. С., Рябов Г. А.* Автоматизированный комплекс систем стабилизированного питания магнитов и линз трактов пучков синхроциклотрона на 1 ГэВ ЛИЯФ АН СССР. Препринт ЛИЯФ 1522. Л., 1989. 22 с.
24. *Иванов Е. М., Михеев Г. Ф., Муратов В. Г., Новиков В. С., Покровский А. С., Соловей В. А.* Автоматизированная система управления трактами транспортировки заряженных пучков синхроциклотрона 1 000 МэВ ПИЯФ РАН. Сообщение ПИЯФ 2837. Гатчина, 2010. 22 с.

Послесловие

Как отмечалось, наиболее сложной проблемой при создании и запуске синхроциклотрона ПИЯФ была его ВЧ ускоряющая система, что являлось следствием предельно возможной для данного типа ускорителей энергии протонов 1 ГэВ.

Наладка и запуск ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона, ее модернизация и многолетняя эксплуатация при работе синхроциклотрона на физические и медицинские эксперименты выполнялись сотрудниками Ускорительного отдела, объединенными в коллектив Радиотехнической службы. В период запуска ускорителя служба насчитывала 30 сотрудников, в настоящее время она состоит из 8 человек.

После введения синхроциклотрона в постоянную эксплуатацию коллектив Радиотехнической службы осуществлял постоянный контроль за работой всех радиотехнических систем синхроциклотрона, а также проводил модернизацию и усовершенствование его ВЧ ускоряющей системы.

Инженерами разработаны и созданы заново практически все радиотехнические системы синхроциклотрона, в том числе и не предусмотренные первоначальным проектом: новая конструкция вариатора частоты, система ВЧ-питания дуанта (ВЧ-генератор и анодный манипулятор), система С-растяжки пучка, система генератора нейтронов (ГНЕЙС), система фокусировки ионного источника, система управления синхроциклотроном (СУФ), система автосмещения на дуант, профилометры и др. Большинство этих разработок защищены авторскими свидетельствами на изобретение.

Начальниками Радиотехнической службы в разные периоды были: **С. П. Дмитриев**, **Г. Ф. Михеев**, а в настоящее время – **А. С. Покровский**. В период наладки и запуска синхроциклотрона руководили работой службы по настройке ускоряющей системы заведующий Ускорительным отделом **Н. К. Абросимов**, главный инженер Ускорительного отдела **Н. Н. Чернов** и главный инженер Отделения физики высоких энергий **А. В. Куликов**, а позднее – заведующий Лабораторией физики и

техники ускорителей **Г. А. Рябов** и главный инженер ускорительного комплекса ПИЯФ, заведующий Ускорительным отделом **Е. М. Иванов**.

Все сотрудники Радиотехнической службы являются высококвалифицированными радиоинженерами и радиомеханиками, и каждый из них обладает навыком эксплуатации всего комплекса радиотехнического оборудования. Многие из них являются разработчиками радиотехнических систем, описанных в настоящей книге.

Кратко отметим конкретный вклад наиболее активных сотрудников, соавторов научных публикаций Н. К. Абросимова и, следовательно, соавторов настоящей книги.

Андрей Сергеевич Покровский – начальник Радиотехнической службы с 1986 года, руководитель всех видов работ по радиотехническим системам синхроциклотрона. Соавтор Н. К. Абросимова во многих научных публикациях.

Валерий Васильевич Асташин – заместитель начальника Радиотехнической службы, координатор всех эксплуатационных работ, разработчик КСС и системы фокусирующего электрода.

Арест Григорьевич Котов – ведущий инженер, старейший сотрудник Радиотехнической службы, проработавший около 50 лет и участвовавший в настройке и запуске синхроциклотрона. Разрабатывал систему С-растяжки, ГНЕЙС, ФЭ и др.

Анатолий Михайлович Васильев – ведущий инженер, занимался разработкой электронных схем и блоков многих систем синхроциклотрона, в том числе профилометров, КСС, стабилизации дозы протонного медицинского пучка, коллиматоров и др.

Владимир Иванович Юрченко – ведущий инженер, разработчик силовой части генератора сброса для системы ГНЕЙС, систем электропитания магнитов и др.

Виктор Сергеевич Новиков – ведущий инженер, разработчик КСС, в частности ее автоматизации с переходом на управление от ПК.

Геннадий Иванович Горкин – ведущий инженер, разработчик КСС, системы измерения магнитного поля синхроциклотрона на основе ЯМР и др.

Анатолий Михайлович Герасимов – ведущий инженер, пионер во внедрении компьютерной техники в ПИЯФ, разработчик системы управления синхроциклотроном и его автоматизации с использованием компьютеров.

Владимир Константинович Волков – начальник Вакуумно-технологической службы по обслуживанию вариатора и ВЧ-системы синхроциклотрона. Участвовал в конструировании нового вариатора, нового ВЧ-генератора и др.

Станислав Андреевич Королев – регулировщик радиоаппаратуры. Владея практически всеми смежными профессиями: механика, слесаря, токаря, электромонтажника и др., высококвалифицированно выполнял все монтажные радиотехнические работы. В Радиотехнической службе трудится больше 50 лет, со дня ее образования. Нет ни одного радиотехнического блока или устройства, которое не было бы смонтировано и настроено без его участия.

Галина Федоровна Ермоленко – старейшая сотрудница Радиотехнической службы, монтажница большинства радиотехнических плат, специалист высокой квалификации.

Дружный коллектив Радиотехнической службы работает под девизом, который запечатлен у них на плакате: *«Живи на работе и дома по закону Ома. Станет тяжело или плохо – вспомни правила Кирхгофа. Зарплата мала, и жена надоела – повтори уравнения Максвелла».*

Приношу всем сотрудникам службы благодарность за многолетнее сотрудничество, понимание и помощь в работе. Некоторые из них продолжают трудиться по сей день и кроме забот по эксплуатации систем синхроциклотрона занимаются разработкой и запуском нового ускорителя – изохронного циклотрона Ц-80, ускоряющего Н⁺-ионы до энергии 80 МэВ, и участвуют в создании нового проекта – медицинского комплекса в ПИЯФ на базе синхроциклотрона 1 ГэВ, циклотрона 80 МэВ и синхротрона 260 МэВ.

Помимо Радиотехнической службы в обслуживании синхроциклотрона принимают участие другие службы Ускорительного отдела.

Обслуживание механических частей ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона, вариатора частоты, дуанта, плакировок вакуумной камеры и другого оборудования квалифицированно осуществляет Вакуумно-технологическая служба Ускорительного отдела под руководством **Владимира Петровича Греся**.

При круглосуточной работе синхроциклотрона на физический эксперимент оперативную эксплуатацию радиотехнического оборудования осуществляет коллектив Службы управления синхроциклотроном под руководством **Игоря Алексеевича Петрова**. Старейшими начальниками смен операторов управления синхроциклотроном являются **Борис Ильич Журомский**, **Владимир Сергеевич Осипов**, **Валентин Анатольевич Хробостов**.

Многие радиотехнические системы синхроциклотрона тесно связаны с его энергетической системой. Электротехнической службой руководили **Евгений Николаевич Кузнецов**, **Борис Сергеевич Миропольский**. В настоящее время начальником этой службы является **Лев Анатольевич Сухоруков**.

Часть радиотехнического оборудования синхроциклотрона находится в радиационно-активной зоне. О безопасной работе сотрудников постоянно заботилась Служба радиационной безопасности синхроциклотрона под руководством **Юрия Тимофеевича Миронова**.



Сотрудники Радиотехнической и других служб вместе с Н. К. Абросимовым в главном зале синхроциклотрона ПИЯФ, у генератора для ускоряющей системы, 1999 год. *Справа налево:*

1-й ряд: инженер-технолог А. А. Тимофеев; заведующий Ускорительным отделом, заместитель директора ПИЯФ Н. К. Абросимов; техник 1-й категории С. Е. Миропольская; заместитель главного инженера синхроциклотрона Е. Н. Кузнецов; ведущий инженер В. А. Волченков; техник 1-й категории А. Б. Ахалая; начальник Службы эксплуатации В. С. Никитин; монтажник А. Н. Логунов; столяр Т. М. Рябинченков. 2-й ряд: старший научный сотрудник В. А. Елисеев; начальник Службы радиационной техники безопасности Ю. Т. Миронов; заместитель заведующего Ускорительным отделом Г. А. Рябов; мастер В. И. Кошелев; начальник Вакуумно-технологической службы В. П. Гресь. 3-й ряд: электромонтер А. П. Кямря; электромонтер В. И. Кузьмин; слесарь-механик Г. А. Карасев; инженер-технолог Ю. А. Нестеренко. 4-й ряд: старший научный сотрудник Г. Ф. Михеев; регулировщик радиоаппаратуры С. А. Королев; ведущий инженер А. Г. Котов

Всем сотрудникам этих служб эксплуатации синхроциклотрона приношу свою благодарность за многолетнее сотрудничество.

Успешная научно-техническая деятельность Радиотехнической службы во многом объясняется слаженной работой с другими службами комплекса синхроциклотрона. И это, несомненно, заслуга руководства Ускорительного отдела, в первую очередь – **Николая Константиновича Абросимова**.

Как было отмечено, в настоящее время заведующим Ускорительным отделом является **Евгений Михайлович Иванов** – главный инженер ускорительного комплекса ПИЯФ, а руководит научной программой заведующий Лабораторией физики и техники ускорителей **Герман Аркадьевич Рябов**.

Некоторые математические расчеты радиотехнических систем синхроциклотрона проводила ведущий инженер-математик **Нина Васильевна Шевякова** под руководством **Станислава Александровича Артамонова**. Она же занималась подготовкой настоящей публикации к печати. Подготовка материалов была проведена также многолетним секретарем Н. К. Абросимова – **Лидией Ивановной Авериной**. Она же является оформителем всех наших научно-технических публикаций за все годы работы в Ускорительном отделе.

Г. Ф. Михеев

Приложение

Хронология работ по разработке и модернизации основных систем синхроциклотрона ЛИЯФ

1956 г. – Решение правительства СССР о строительстве в Гатчине на базе ФТИ им. А. Ф. Иоффе крупнейшего в мире синхроциклотрона на энергию протонов 1 ГэВ.

1957 г. – Начало строительства зданий ускорительного комплекса в Орловой роще Гатчины силами военных стройбатов. Начало проектирования синхроциклотрона в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова.

1964 г. – Завершение постройки всех зданий под ускорительный комплекс.

1964–1965 гг. – Изготовление основного оборудования на заводе ЛЭЗ ЛЕО «Электросила» и в мастерских НИИЭФА.

1964 г. – Изготовление автоматизированной координатной системы для магнитных измерений на синхроциклотроне. Разработка ЯМР-магнитометра.

1964–1966 гг. – Измерение и формирование магнитного поля синхроциклотрона сотрудниками ЛИЯФ.

1966–1969 гг. – Работы по сборке и настройке ВЧ ускоряющей системы синхроциклотрона силами сотрудников ЛИЯФ.

1967 г. – Получение ускоренного протонного пучка 750 МэВ. Статья в газете «Правда» от 12 ноября 1967 г. «Есть пучок».

1969 г. – Получение проектной энергии пучка 1 ГэВ и вывод протонного пучка 0,3–0,4 мкА. Начало постоянной эксплуатации синхроциклотрона на физический эксперимент. Доклад о запуске синхроциклотрона ЛИЯФ на VII Международной конференции в Ереване.

1970 г. – Разработка системы управления синхроциклотроном (СУФ). Завершение работ по системе вывода пучка из ускоряющей камеры. Ввод синхроциклотрона ЛИЯФ в постоянную эксплуатацию 4 000–6 000 часов в год.

1972 г. – Ввод в эксплуатацию системы временной растяжки пучка с использованием С-электрода. Ввод в эксплуатацию импульсного дефлектора и начало создания нейтронного спектрометра ГНЕЙС.

1974 г. – Изготовление в мастерских ЛИЯФ и монтаж нового модернизированного вариатора частоты.

1975 г. – Создание совместно с ЦНИРРИ Минздрава СССР комплекса протонно-лучевой терапии. Предложен «гатчинский метод» облучения протонами «напролет». Начало работ на нейтронном спектрометре ГНЕЙС, предназначенном для исследования взаимодействия нейтронов с атомным ядром. Создание установки ИРИС для исследования короткоживущих нейтронно-дефицитных ядер.

1976 г. – Введение информационно-измерительной системы на синхроциклотроне для контроля и управления работой тракта транспортировки пучков.

1977 г. – Осуществление программы повышения интенсивности протонного пучка. Разработка нового ионного источника с трехэлектродной фокусирующей системой. Опубликование статьи Н. К. Абросимова «Проект ускорительного комплекса и исследование на нем» в журнале «Успехи физических наук» (УФН. 1977. Т. 121, № 4. С. 733).

1979 г. – Введение в эксплуатацию нового ионного источника с трехэлектродной системой фокусировки. Повышение интенсивности синхроциклотрона в 3–4 раза и получение 1 мкА выведенного пучка. Введение в эксплуатацию устройства для регулировки и оптимизации амплитудной программы ускоряющего напряжения синхроциклотрона.

1980 г. – Введение в эксплуатацию μ -мезонного канала для получения π^\pm -, μ^\pm - и K -мезонов.

1982 г. – Разработка полупроводникового профилометра для диагностики выведенного протонного пучка.

1986 г. – Решение Министерства промышленности и науки РФ о присвоении синхроциклотрону статуса уникальной установки Российской Федерации.

1987 г. – Вывод из синхроциклотрона второго протонного пучка для медицинских целей.

1989 г. – Введение в эксплуатацию автоматизированного комплекса систем питания магнитов трактов пучков КСС-2.

1992 г. – Начало работ по проектированию изохронного циклотрона Ц-80. Доклад на XXIII Международной конференции в Ванкувере (Канада) «Гатчинский изохронный циклотрон».

2009 г. – Получение на синхроциклотроне пучка нейтронов с энергетическим спектром атмосферного излучения.

2010 г. – Разработка и введение в эксплуатацию автоматизированной системы управления трактами пучков синхроциклотрона с использованием ПК.

Патенты и авторские свидетельства

1. Высокочастотная система синхроциклотрона: а. с. № 291655 с приоритетом от 02.08.1969 / Г. А. Зейтленок, Д. И. Егоров, И. Ф. Малышев, Ф. А. Розенкранц, И. М. Ройфе, Е. В. Середенко.
2. Опора ротора вариатора частоты синхроциклотрона: а. с. № 300969 с приоритетом от 02.08.1969 / И. Ф. Малышев, В. И. Перегуд.
3. Модулятор синхроциклотрона: а. с. № 533272 с приоритетом от 07.10.1980 / В. А. Алексеев, А. А. Глазов, И. В. Тузов.
4. Способ протонной терапии: а. с. № 1080604 / Г. А. Алхазов, С. Л. Белостоцкий, А. А. Воробьев.
5. Устройство связи генераторной лампы с резонансной системой синхроциклотрона: а. с. № 270131 с приоритетом от 28.04.1969 / **Н. К. Абросимов**, С. Н. Дмитриев, **Г. Ф. Михеев**, А. В. Куликов, Е. В. Середенко, Н. Н. Чернов. Бюл. № 16, 1970. С. 62.
6. Устройство для растяжки во времени пучка синхроциклотрона: а. с. № 370901 с приоритетом от 20.07.1972 / А. В. Куликов, Н. Н. Чернов.
7. Устройство для регулирования и оптимизации амплитудной программы ускоряющего напряжения синхроциклотрона: а. с. № 475948 с приоритетом от 17.09.1973 / **Н. К. Абросимов**, А. В. Куликов, **Г. Ф. Михеев**. Бюл. № 27, 1979. С. 227.
8. Способ уменьшения потерь части в синхроциклотроне при использовании временной растяжки пучка с помощью С-электрода: а. с. № 497934 с приоритетом от 03.01.1974 / **Н. К. Абросимов**, А. В. Куликов, **Г. Ф. Михеев**, Н. Н. Чернов.
9. Фокусирующее устройство синхроциклотрона: а. с. № 743243 с приоритетом от 15.12.1977 / **Н. К. Абросимов**, А. В. Куликов, **Г. Ф. Михеев**. Бюл. № 23, 1980. С. 341.
10. Способ формирования импульса вторичных частиц на внутренних мишенях синхроциклотрона: а. с. № 997593 с приоритетом от 14.04.1981 / **Н. К. Абросимов**, А. В. Куликов, **Г. Ф. Михеев**.
11. Устройство для измерения профилей пучков ускорителей заряженных частиц: а. с. № 1101009 с приоритетом от 30.06.1982 / **Н. К. Абросимов**, А. В. Куликов, **Г. Ф. Михеев**.
12. Нейтронный генератор с энергетическим спектром нейтронов, повторяющим спектр атмосферного нейтронного излучения: пат. на полезную модель № 80641 с приоритетом от 04.08.2008 / **Н. К. Абросимов**, Е. М. Иванов, **Г. Ф. Михеев**, Г. А. Рябов, О. А. Щербаков. Бюл. № 4, 2009. С. 213.

Оглавление

От составителя	5
От научного редактора	7
<i>Н. Н. Чернов.</i> Памяти Николая Константиновича Абросимова	7
<i>Г. А. Рябов.</i> Его любили и уважали	10
<i>Г. Ф. Михеев.</i> Краткая биография Николая Константиновича Абросимова	12
Введение	17
Глава 1 Этап строительства и запуска синхроциклотрона ПИЯФ. Программа развития ускорительного комплекса	31
1.1. История вопроса	31
1.2. Крупнейшие синхроциклотроны мира	32
1.3. Программа физических исследований на синхроциклотроне ПИЯФ	38
1.4. Этап строительства и запуска синхроциклотрона ПИЯФ	41
1.5. Программа усовершенствования синхроциклотрона ПИЯФ и развитие его экспериментальной базы	46
Публикации	49
Глава 2 Современное состояние ускорительного комплекса ПИЯФ	50
2.1. Комплекс зданий синхроциклотрона ПИЯФ, размещение оборудования и радиационная защита	51
2.2. Пучки синхроциклотрона ПИЯФ	57
2.3. Экспериментальные комплексы и установки на синхроциклотроне ПИЯФ	67
Публикации	88
Глава 3 Основные сведения из теории резонансных циклических ускорителей с постоянным магнитным полем	92
3.1. Виды циклических ускорителей	92

3.2. Частотная программа синхроциклотрона с учетом изменения магнитного поля вдоль радиуса	114
3.3. Синхротронные колебания. Сепаратриса	117
Рекомендуемая литература	124

Глава 4

Необходимые сведения из радиотехники для расчета параметров высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ	125
4.1. Резонансный контур	125
4.2. Радиотехнические системы с распределенными параметрами	134
4.3. Расчет потерь высокочастотной мощности	157
Рекомендуемая литература	162

Глава 5

Высокочастотная ускоряющая система синхроциклотрона ПИЯФ	163
5.1. Структурные схемы высокочастотных ускоряющих систем крупнейших синхроциклотронов мира	163
5.2. Основные требования к высокочастотной ускоряющей системе синхроциклотрона ПИЯФ	169
5.3. Дуантная система синхроциклотрона ПИЯФ	172
5.4. Вариаторы частоты синхроциклотрона ПИЯФ	183
5.5. Наладка высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ	202
5.6. Высокочастотный генератор синхроциклотрона ПИЯФ. Разработка системы связи генератора с ускоряющей системой	211
5.7. Получение протонного пучка с энергией 750 МэВ	217
5.8. Получение протонного пучка с энергией 1 ГэВ	219
Публикации	222

Глава 6

Модернизация высокочастотной ускоряющей системы и других радиотехнических систем синхроциклотрона ПИЯФ	223
6.1. Цели и задачи модернизации	223
6.2. Конструктивные изменения, внесенные в систему дуант – камера	224
6.3. Новая конструкция вариаторов частоты	225
6.4. Контроль за тепловыми деформациями в конструкции вариатора частоты	242
6.5. Система защиты ускоряющей системы от высокочастотных пробоев	244
6.6. Оптимизация частотной программы синхроциклотрона ПИЯФ ...	247
6.7. Оптимизация амплитудной программы синхроциклотрона ПИЯФ	254

6.8. Другие усовершенствования высокочастотной ускоряющей системы синхроциклотрона ПИЯФ	259
6.9. Система управления синхроциклотроном ПИЯФ (СУФ)	260
Публикации	265
Глава 7	
Разработка и создание новых систем для комплекса синхроциклотрона ПИЯФ	267
7.1. Система увеличения длительности импульса протонного пучка синхроциклотрона ПИЯФ (система временной растяжки)	267
7.2. Импульсный нейтронный пучок синхроциклотрона ПИЯФ. Система однооборотного сброса протонов на внутреннюю мишень	282
7.3. Система увеличения интенсивности пучка синхроциклотрона ПИЯФ	293
7.4. Система стабилизации тока в магнитных элементах трактов транспортировки пучков и система компьютерного управления (комплекс систем стабилизации КСС-3)	312
Публикации	326
Послесловие	329
Приложение	334
Оглавление	337

Н. К. Абросимов, Г. Ф. Михеев

**РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
СИНХРОЦИКЛОТРОНА
ПЕТЕРБУРГСКОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

Редактор *Г. А. Рябов*

Отпечатано в типографии ФГБУ «ПИЯФ»
188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща
Зак. 341, тир. 100, уч.-изд. л. 20,0; 03.12.2012 г.
Формат бумаги 60x84 1/16. Печать офсетная