



И ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Ф
В
Э ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На правах рукописи
2002–15

Кудрявцев Виктор Георгиевич

**ДЕМПФИРОВАНИЕ
СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ
В УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРАХ
ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА**

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная
техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино 2002

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г.Протвино).

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук С.В. Иванов (ИФВЭ, Протвино).

Официальные оппоненты: доктор технических наук В.И. Каминский (МИФИ, Москва), доктор физико-математических наук В.И. Котов (ИФВЭ, Протвино).

Ведущая организация – Институт ядерных исследований РАН (г. Москва).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2002 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, г. Протвино Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Повышение интенсивности ускоренных пучков — актуальная проблема физики и техники ускорителей заряженных частиц. Это не только постоянное требование экспериментов в области физики высоких энергий, но и при использовании ускорителей в прикладных целях. Например, проект “Ускорительно-накопительный комплекс ИФВЭ на энергию 3000 ГэВ” предусматривал сооружение протонного синхротрона с интенсивностью пучка $6 \cdot 10^{14}$ прот./цикл. Инжектором должен был служить существующий протонный синхротрон У-70 с интенсивностью пучка, поднятой до уровня $5 \cdot 10^{13}$ прот./цикл.

Достижение высоких интенсивностей сопряжено со значительными трудностями. Так, одной из важных проблем является электромагнитное взаимодействие пучка с его внешним окружением — собственно вакуумной камерой с ее многочисленными неоднородностями (сильфоны, расширения, ступеньки) и присоединенным к камере физическим оборудованием (вакуумные боксы, измерительные датчики, установки для экспериментальных исследований).

Поля, возбуждаемые пучком в элементах камеры, могут вызывать продольные и поперечные неустойчивости пучка и, как следствие, ухудшение его качества, снижение интенсивности или полную потерю.

Важнейшими элементами вакуумной камеры протонного синхротрона являются резонаторы ускоряющей системы. Один из их собственных видов колебаний (как правило, низший) является рабочим

и используется для ускорения пучка. Сопротивление связи резонатора с пучком на этом виде колебаний должно быть достаточно велико для обеспечения эффективного ускорения. Как следствие, и высшие типы колебаний (высшие моды) ускоряющих резонаторов могут иметь высокие добротности и заметные сопротивления связи с пучком. Это обуславливает их большую опасность с точки зрения обеспечения устойчивости пучка.

Кроме того, существуют режимы работы ускоряющей системы, когда она не используется в течение некоторой части ускорительного цикла. В этом случае рабочий тип колебаний пассивных резонаторов представляет особенно большую опасность для устойчивости пучка.

В силу названных причин проблема демпфирования собственных колебаний в ускоряющих резонаторах является актуальной при создании ускоряющей системы и ускорителя в целом.

Целью диссертационной работы является:

1. Численное и экспериментальное исследование высших мод и демпфирующих устройств в ускоряющих резонаторах УНК и станции перегруппировки пучка (СПГП) синхротрона У-70 ИФВЭ.

2. Разработка, стендовые испытания и введение в эксплуатацию системы демпфирования высших мод (продольных и поперечных) для ускоряющих резонаторов УНК и СПГП У-70.

3. Разработка, исследование и введение в эксплуатацию демпфера основного колебания для резонаторов СПГП на основе быстродействующих ВЧ-переключателей.

Научная новизна работы

1. Проведено численное исследование связи коаксиальных демпферов с цилиндрическим резонатором на основной и высших модах. Использовались два метода.

В *электростатическом* приближении определены параметры связи штыревого зонда с резонатором. На основе анализа конфигурации поля вблизи зонда найдена эффективная площадь зонда S_3 , определяющая ток смещения и степень связи резонатора с внешней нагрузкой. Величина S_3 суть физический аналог площади магнитной петли связи.

С помощью программы *электродинамического* анализа резонаторов сложной формы исследована система связанных объемов — цилиндрического резонатора и коаксиальной линии, настраиваемой в резонанс с основным колебанием E_{010} .

В результате этих расчетов, дополненных радиотехническими измерениями, определена эмпирическая зависимость S_3 от геометрии коаксиального узла связи. Сделана обоснованная оценка радиотехнических параметров коаксиального устройства связи (внешняя добротность, коэффициент связи, шунтирующая емкость и т.д.).

2. Проведены численные расчеты параметров связи коаксиальных демпферов с цилиндрическим резонатором непосредственно на частотах высших мод методом *реактивной нагрузки*. В численной модели использовался составной объем в виде резонатора и примыкающей к нему коаксиальной линии. Радиотехнические параметры устройства связи определены на основе расчета зависимости расстройки резонатора от величины реактивной нагрузки (длины линии).

3. Разработано техническое обоснование и выбрана система демпфирования продольных и поперечных высших мод для ускоряющих резонаторов синхротронов УНК и У-70 (СПГП) с высоким средним током пучка.

4. Разработан широкополосный демпфер высших мод с полосно-заграждающим фильтром основной частоты. Конструкция демпфера обеспечивает сильную связь резонатора с поглощающей нагрузкой в широкой полосе частот демпфируемых мод и эффективную отсечку ВЧ-токов на частоте рабочей моды, не подлежащей подавлению. Получено авторское свидетельство на изобретение.

5. Разработан, исследован и введен в эксплуатацию демпфер основного колебания резонансного типа с ВЧ-переключателем на рпн-диодах для резонаторов СПГП У-70. Определены условия оптимальной настройки демпфера, обеспечивающей минимальную токовую нагрузку на переключатель при заданном коэффициенте демпфирования. По результатам разработки получено авторское свидетельство на изобретение.

Практическая ценность работы

Разработана и экспериментально исследована система демпфирования высших мод (продольных и поперечных) для резонаторов ускоряющей системы УНК и СПГП синхротрона У-70.

Изготовлен полный комплект серийных образцов демпферов высших мод для резонаторов ускоряющей системы УНК и СПГП У-70.

Рабочие образцы демпферов установлены, испытаны и эксплуатируются на действующей СПГП У-70. С установленными демпферами продольные импедансы связи резонаторов в диапазоне частот 200–1500 МГц оказываются в несколько раз ниже пороговых значений. Это позволяет устранить взаимодействие резонаторов с пучком на высших модах и обеспечивает, тем самым, рабочие режимы СПГП в циклах У-70.

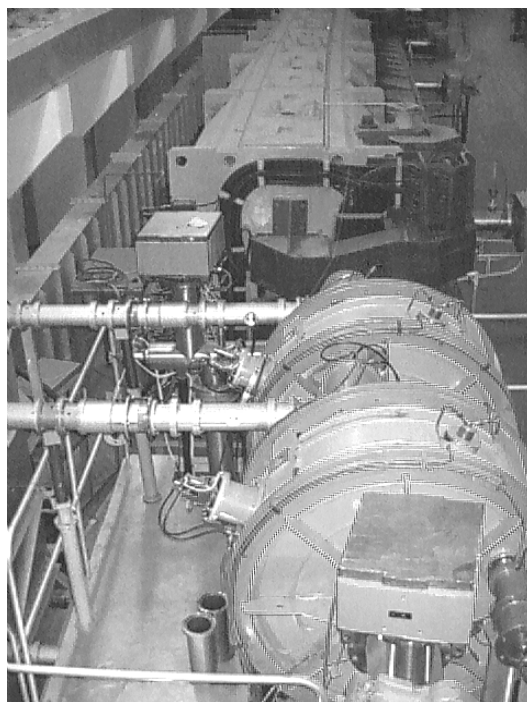


Рис. 1. Ускоряющий модуль СПГП в кольцевом зале синхротрона У-70.

Разработан, исследован и введен в эксплуатацию демпфер основного колебания для резонаторов ускоряющей системы СПГП синхротрона У-70 с быстродействующим ВЧ-переключателем. С помощью СПГП У-70, оснащенной демпферами высших мод и основного колебания, проведены успешные эксперименты по захвату пучка на частоту 200 МГц.

В настоящее время эта станция является штатной технологической системой и используется в сеансах У-70. При этом демпфер основного колебания применяется как дистанционно управляемый регулятор шунтового сопротивления резонатора. Общий вид ускоряющего модуля СПГП с установленной системой демпфирования показан на рис. 1.

СПГП применяется для контролируемого увеличения эмиттанса пучка перед переходом через критическую энергию и для улучшения структуры пучка при медленном выводе. Рис. 2 и 3 из обзорного доклада¹ демонстрируют такое использование станции. Из рис. 2 видно, что включение СПГП приводит к увеличению длины сгустков и уменьшению амплитуды квадрупольных колебаний после критической энергии. Рис. 3 показывает заметное улучшение временной структуры выведенного пучка при использовании СПГП.

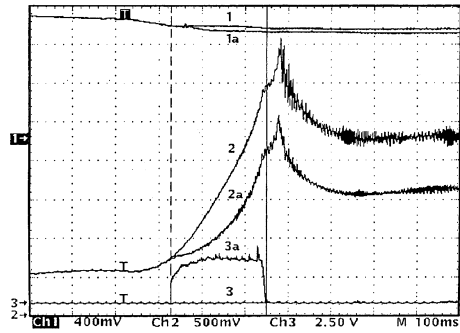


Рис. 2. Сигнал пикового детектора (2, 2а), обратно пропорциональный длине сгустка, и соответствующая огибающая напряжения 200 МГц на СПГП (3, 3а).

¹ О работе ускорителя У-70 и модернизации его систем. Сб. докладов 17-го Совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, т. 2, с. 236–243, 2000.

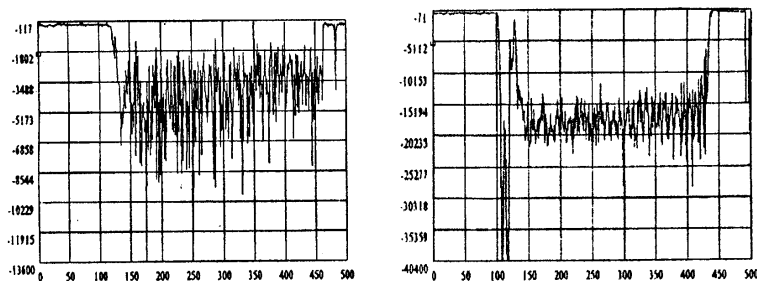


Рис. 3. Осциллограммы интенсивности пучка при медленном выводе. На левом рисунке СПГП отключена, а на правом используется в режиме фазового смещения.

На защиту выносятся следующие результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы:

1. Результаты численного и экспериментального исследования высших мод в ускоряющих резонаторах УНК и СПГП У-70.
2. Методика и результаты расчета параметров связи коаксиальных демпферов с цилиндрическим ускоряющим резонатором на основной и высших модах.
3. Разработка и экспериментальное исследование системы демпфирования высших мод (продольных и поперечных) для ускоряющих резонаторов УНК и СПГП У-70.
4. Разработка, исследование и введение в эксплуатацию демпфера рабочего колебания СПГП синхротрона У-70 на основе быстродействующих ВЧ-переключателей.

Апробация работы

Диссертация написана на основе работ, выполненных в ИФВЭ (г. Протвино) с 1979 по 2001 г. в рамках проекта “Ускорительно-накопительный комплекс на энергию 3000 ГэВ”. Основные результаты докладывались на 7–11-й, 13–16-й Российских совещаниях по ускорителям заряженных частиц, на Европейской конференции по ускорителям ЕРАС 92 (Берлин), на Международной конференции по ускорителям РАС 93 (Вашингтон), семинарах ИФВЭ и опубликованы в работах [1-15]. Ряд технических решений прошел патентную экспертизу и защищен авторскими свидетельствами [2,5].

Структура диссертации

Работа изложена на 134 страницах, состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 49 рисунков, 10 таблиц и список литературы из 99 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы работы. Изложена новизна результатов и практическая ценность работы. Перечислены положения, выносимые на защиту. Кратко представлено содержание работы по главам.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приведены определения продольного и поперечного импедансов связи пучка с вакуумной камерой. Дается краткое представление о пороговом характере неустойчивостей пучка в синхротроне. Импедансы связи и их пороговые значения — это основные параметры, необходимые для формулировки требований к системе демпфирования. Обсуждается роль систем демпфирования собственных колебаний ускоряющих резонаторов в общем комплексе мер по обеспечению устойчивости интенсивного пучка в синхротроне.

Проводится обзор методов демпфирования высших мод в ускоряющих резонаторах, отражающий **современное состояние вопроса**.

Для снижения импедансов связи резонаторов с пучком широкое применение находят *демпферы на основе коаксиальных линий* с согласованными нагрузками. Для связи с резонатором используется магнитная петля связи или штыревой (емкостной) зонд, ориентированные соответствующим образом.

Основным достоинством таких устройств является их широкополосность. При оптимальном выборе размещения на корпусе резонатора, размера и формы элемента связи одним демпфером можно подавить большое число паразитных мод. Недостатком подобных устройств является относительно небольшое демпфирование высших мод при разумных размерах элементов связи.

Очевидным усовершенствованием описанных устройств является так называемый *режекторный демпфер*, использующий полосно-заграждающий фильтр основной частоты. Обычно режекторный фильтр выполняется в виде коаксиального резонатора, настроенного на частоту основной моды и встроенного тем или иным способом в линию между элементом связи и нагрузкой. Высокое шунтовое сопротивление коаксиального резонатора включено последовательно с низкоомной (десятки Ом) поглощающей нагрузкой. Это обеспечивает высокую степень режекции токов основной частоты. Отсечку токов основной частоты можно осуществить также с помощью полуволнового шлейфа, включенного в линию параллельно нагрузке.

Для демпфирования высших мод в резонаторах широко используются *волноводные демпферы*. Они построены на основе волноводов различных сечений, прямоугольных или цилиндрических. Волны в таких волноводах не распространяются на частотах ниже критической. Токи высших мод резонатора возбуждают в волноводе волны различных типов, которые поглощаются в оконечной нагрузке. В то же время волна на частоте основной моды резонатора быстро затухает в запредельном волноводе, не достигая нагрузки.

Для волноводных демпферов характерно сочетание широкополосности и высокой степени подавления высших мод. К их недостаткам можно отнести большие габариты и сложность изготовления как волноводов, так и резонаторов с установочными фланцами.

Резонансные демпферы находят применение в том случае, когда число демпфируемых мод невелико, либо когда одну из мод необходимо особенно сильно подавить. Такой демпфер представляет собой низкодобротный резонатор, связанный с ускоряющим резонатором и настроенный на частоту одной из паразитных мод. Для реализации таких демпферов наиболее часто используются резонансные свойства длинных линий. Они выполняются, например, в виде четвертьволновых коаксиальных резонаторов, связанных с основным с помощью штыревого зонда. Достоинством резонансных демпферов является высокая степень демпфирования. К их недостаткам можно отнести узкополосность, а потому и необходимость точной настройки.

Для подавления высших мод в резонаторах часто используются *высокочастотные поглотители*, размещаемые в примыкающей вакуумной камере. Высшие моды, соответствующие верхней части спектра собственных частот, сильно провисают в камеру и могут быть подавлены там, например, ферритовыми поглотителями.

В обзоре рассмотрены и другие способы демпфирования, но основное внимание уделено методам, наиболее приемлемым для резонаторов УНК (СПГП У-70). На момент начала работ по разработке системы демпфирования (1979 г.) подходы к решению этой проблемы для интенсивного протонного синхротрона были не столь очевидны. Поэтому многие технические решения были приняты самостоятельно и независимо. Они лишь позже нашли подтверждение в мировой практике.

Во второй главе приведены краткое техническое описание ускоряющего модуля и параметры рабочего вида колебаний. Проанализированы высшие моды резонаторов, которые могут дестабилизировать пучок в продольном и поперечном направлениях. Проведен расчет пороговых импедансов связи для УНК и синхротрона У-70. Определены параметры высших мод (импедансы связи с пучком и т.д.) и сформулированы требования к системе демпфирования.

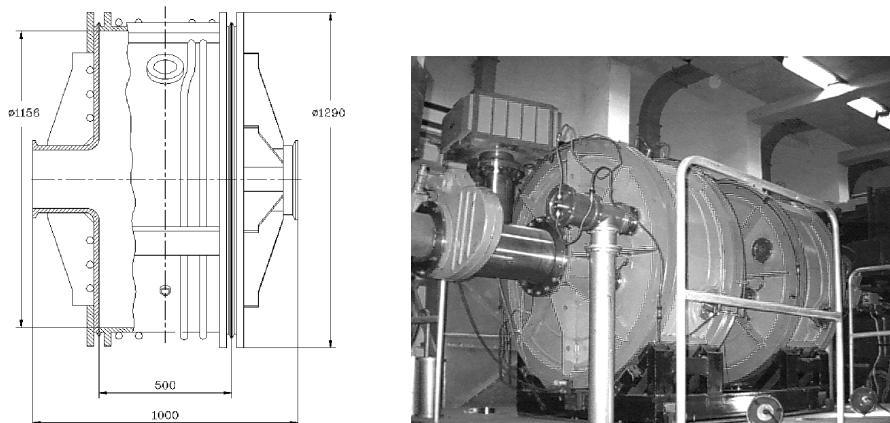


Рис. 4. Резонатор ускоряющей системы УНК и СПГП У-70.

Модуль ускоряющей системы УНК включает в себя два медных цилиндрических резонатора с рабочим видом колебаний E_{010} и частотой 200 МГц. Схематичное изображение конструкции и основные размеры резонатора показаны на рис. 4.

При разработке системы демпфирования необходимо принять во внимание высшие моды двух типов:

1. Аксиально-симметричные E -моды без вариаций по азимуту (монопольные моды). Они имеют продольную составляющую $E_z \neq 0$ в приосевой зоне и существенно влияют на продольную устойчивость пучка. Такие моды характеризуются продольным (монопольным) импедансом связи. В замкнутом цилиндрическом резонаторе это моды вида E_{0np} .

2. Аксиально-несимметричные E -моды с одной вариацией по азимуту (дипольные моды). Они имеют поперечный градиент поля $\partial E_z / \partial r \neq 0$ в приосевой зоне. Такие моды характеризуются поперечным (дипольным) импедансом связи. В замкнутом цилиндрическом резонаторе это моды вида E_{1np} .

Особенностью мод E_{1np} является их поляризационное (поворотное) вырождение, которое является следствием симметрии вращения цилиндрического резонатора. Это принято во внимание при разработке системы демпфирования.

При расчете порогов неустойчивостей использовались результаты обычной теории продольных и поперечных когерентных неустойчивостей (см., например, препринты ИФВЭ 84-211 и 94-110). В диссертации приводятся необходимые соотношения и некоторые элементы методики расчета.

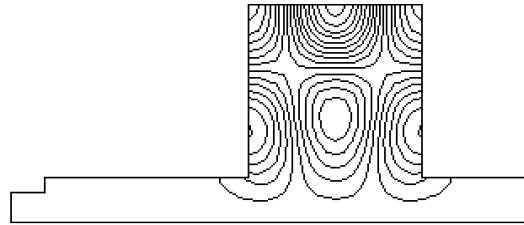
Для УНК минимум порога приведенного продольного импеданса связи $|Z_k/k|$ находится вблизи частоты 400 МГц и составляет примерно 0,4 Ом на резонатор. Далее порог возрастает почти линейно до 0,9 Ом на частоте 1500 МГц. В диапазоне частот 200–1500 МГц пороговые величины продольных импедансов связи $|Z_k/k|$ для синхротрона У-70 как минимум в 20 раз выше.²

²Здесь $k = \omega/\omega_s$, $\omega_s/2\pi$ – частота обращения пучка. В УНК частота обращения 14,4 кГц, а в синхротроне У-70 она в 14 раз выше, около 200 кГц.

Расчеты порогов поперечных неустойчивостей для УНК показали, что в диапазоне частот 300–1500 МГц порог возрастает примерно линейно от 2 до 7 МОм/м. Для синхротрона У-70 в области частот до 300 МГц величина порога составляет 8 МОм/м. На более высоких частотах порог возрастает прямо пропорционально частоте. Так, для низшего аксиально-несимметричного типа колебания E_{110} (частота 315 МГц) порог превышает 35 МОм/м. В то же время все колебания вида E_{1np} резонаторов СПГП У-70 имеют поперечные импедансы не более 15 МОм/м и находятся заметно ниже порога.

Для того, чтобы сформулировать требования к системе демпфирования, необходимо определить импедансы связи резонаторов на частотах высших мод и сравнить их с пороговыми значениями. Предварительные расчеты импедансов связи проводились в приближении замкнутого цилиндрического резонатора. Частоты и составляющие поля высших мод в цилиндрическом резонаторе хорошо известны. Поэтому несложно найти необходимые величины импеданса связи на резонансной частоте $R_{\text{ш}} \cdot |T|^2$, где $R_{\text{ш}}$ и $|T|$ — шунтовое сопротивление и модуль фактора пролетного времени.

Более точные расчеты продольных импедансов проводились с учетом влияния пролетных патрубков. Для этого использовалась программа анализа аксиально-симметричных резонаторов сложной формы PRUD-0, разработанная в ИФВЭ (препринт ИФВЭ 83-3). Для иллюстрации на рис. 5 показана топология поля и приведены параметры моды E_{022} .



E_{022} $f=763,0$ МГц $Q=75380$ $R_{\text{ш}}=4,04$ МОм $|T|=0,419$ $|Z_k/k|=13,8$ Ом

Рис. 5. Топология поля и расчетные параметры моды E_{022} ускоряющего резонатора.

Расчеты показали, что учет пролетных патрубков приводит к заметному снижению импедансов связи. Это позволяет ослабить требования к системе демпфирования. Наиболее высокие импедансы имеют пять мод в диапазоне до 800 МГц. Они легко идентифицируются как моды типа E_{0np} цилиндрического резонатора, поскольку конфигурация их полей не претерпела существенных изменений. Наибольшего демпфирования требуют моды E_{021} , E_{011} (примерно в 60–70 раз) и E_{020} , E_{022} (в 25–30 раз).

В диапазоне частот выше критической частоты патрубков (>960 МГц) импедансы связи имеют заметно более низкие значения по сравнению с замкнутым цилиндрическим резонатором.

Поперечные импедансы аксиально-несимметричных мод имеют наибольшие величины также в диапазоне до 800 МГц. Однако требуемая степень их демпфирования невелика, всего лишь в 2–8 раз.

По результатам расчета продольных и поперечных импедансов связи ускоряющих резонаторов и их пороговых значений для УНК и У-70 сделаны следующие выводы:

1. Высшие моды в начальной части частотного диапазона 300–800 МГц имеют наиболее высокие продольные и поперечные импедансы связи.

2. Аксиально-симметричные моды резонаторов требуют примерно в 10 раз более сильного демпфирования по сравнению с аксиально-несимметричными модами.

3. Резонаторы УНК на аксиально-симметричных модах требуются демпфировать в среднем в 1,5 раза сильнее, чем резонаторы СПГП У-70.

4. Поперечные импедансы аксиально-несимметричных мод резонаторов СПГП У-70 находятся ниже пороговых значений.

Третья глава посвящена численному и экспериментальному исследованию системы демпфирования и ее отдельных элементов. Приведены описания конструкций демпферов высших мод. Экспериментально определены характеристики высших мод и результаты их демпфирования.

Как указано выше, аксиально-симметричные моды низкочастотной части диапазона (до 800 МГц) имеют наиболее высокие им-

педансы связи. С точки зрения возможностей демпфирования эти моды можно разбить на три группы:

1. Моды E_{0n0} , которые не имеют вариаций по длине и поперечных (радиальных) компонент E -поля у цилиндрической стенки (обечайки) резонатора.

2. Моды E_{0np} с нечетным числом вариаций по длине, которые имеют пучность радиального E -поля у цилиндрической стенки в средней плоскости резонатора.

3. Моды E_{0np} с четным числом вариаций, которые имеют пучность радиального поля у цилиндрической стенки, но уже посередине между торцевой стенкой и средней плоскостью резонатора.

Общая схема размещения демпферов на резонаторах УНК показана на рис. 6.

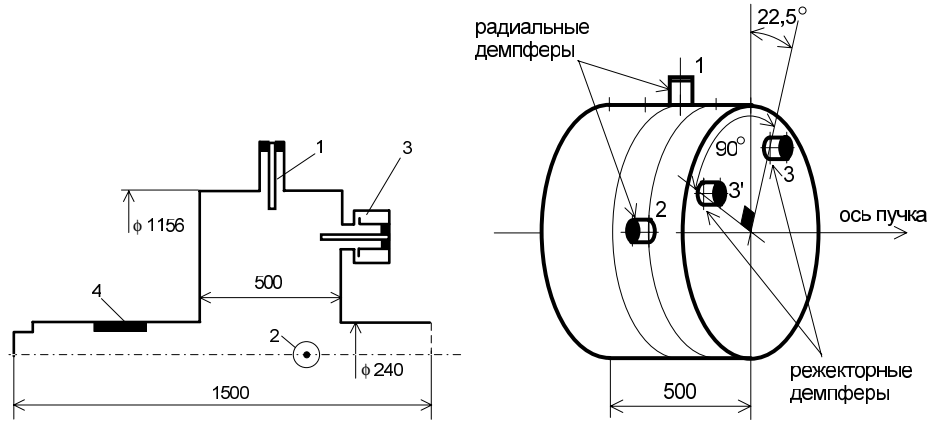


Рис. 6. Схема размещения демпферов на корпусе резонатора.

Для подавления аксиально-симметричных мод достаточно использовать три демпфера. Два из них (поз. 1, 2 на рис. 6) устанавливаются на цилиндрической и один на торцевой стенке (поз. 3). Демпферы, расположенные на цилиндрической стенке, находятся в местах пучностей радиального E -поля мод E_{0np} с четным и нечетным числом вариаций по длине (демпфер 1 посередине между торцевыми стенками, а демпфер 2 смещен от торцевой стенки на четверть

длины резонатора). Демпфер **З**, установленный на торцевой стенке, удален от оси резонатора и имеет связь со всеми аксиально-симметричными модами, в том числе и модами типа E_{0n0} .

Для подавления аксиально-несимметричных мод с различной поляризацией на торцевой стенке установлен еще один демпфер **З'**, смещенный по азимуту на угол 90° относительно первого. Это же учитывалось при выборе взаимной ориентации демпферов на торцевой и цилиндрической стенках.

Демпферы представляют собой отрезки коаксиальных линий. Они имеют на одном конце широкополосные поглощающие нагрузки, а на другом — емкостную связь с резонатором в виде штыревого зонда.

Расчеты параметров связи коаксиальных линий с цилиндрическим резонатором на основной моде E_{010} и высших модах проводились разными методами.

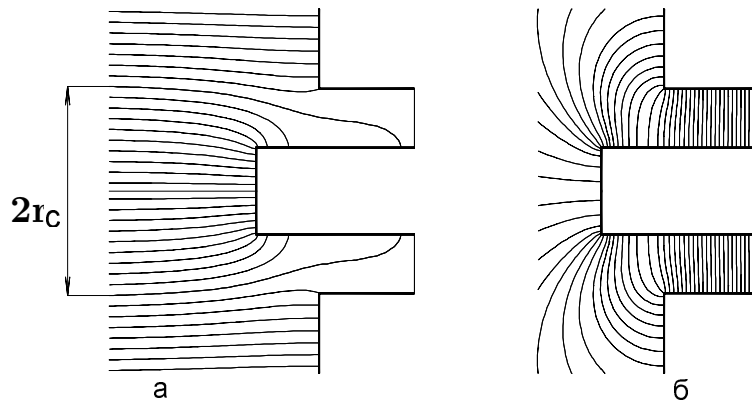


Рис. 7. Картина поля в области зонда, полученная при расчете емкости связи (а) и емкости зонда на ближнюю стенку (б).

В электростатическом приближении такой расчет выполнен с помощью программы, составленной для персональной ЭВМ. Определялись параметры, характеризующие степень связи линии с резонатором на основной моде E_{010} : внешняя добротность, коэффициент связи, емкость зонда на противоположную стенку, емкость зонда на ближнюю стенку. В программе реализовано численное решение

уравнения Лапласа относительно потенциала в цилиндрической системе координат с соответствующими граничными условиями. Программа позволяет строить силовые линии E -поля в расчетной области (рис. 7). По сути, находится поле плоского конденсатора, возмущенное на оси зондом.

В процессе расчетов определяется радиус круговой площадки r_c , через которую проходит ток смещения на зонд. Эта площадка ограничена крайними силовыми линиями, попадающими на зонд (жирные линии на рис. 7а). Она находится в плоскости, где возмущение поля уже невелико. Величина $S_3 = \pi r_c^2$ имеет физический смысл эффективной площади зонда. Зная величину невозмущенного E -поля на оси зонда и S_3 , легко найти ток смещения зонда $I_3 = j\omega\epsilon_0 E_3 S_3$. Это позволяет сделать оценку связи линии с резонатором и параметры демпфирования.

С помощью программы электродинамического анализа резонаторов сложной формы исследована система связанных объемов — цилиндрического резонатора и коаксиальной линии, настраиваемой в резонанс с основным колебанием E_{010} . Необходимые радиотехнические характеристики определялись путем расчета частот связи системы связанных контуров.

Результаты электростатических и электродинамических расчетов совпали с высокой точностью.

Указанные методы, дополненные радиотехническими измерениями, позволили установить эмпирическую зависимость эффективной площади зонда от геометрии коаксиального узла связи. Получены также эмпирические формулы для внешней добротности и емкости связи коаксиальной линии с цилиндрическим резонатором на основной моде E_{010} . Расчетные значения внешней добротности отличаются от измеренных не более чем на 7%.

С помощью выражения для эффективной площади зонда сделана оценка связи линии с резонатором по величине тока смещения на высших модах. При этом полагалось, что размеры зонда невелики и поле резонатора в месте его расположения примерно однородно.

Проведены численные расчеты параметров связи коаксиальных демпферов с цилиндрическим резонатором непосредственно на ча-

стотах высших мод методом реактивной нагрузки. В численной модели рассматривался сложный объем, состоящий из резонатора и примыкающей к нему коаксиальной линии, разомкнутой на конце. Рассчитывалась зависимость расстройки резонатора от величины реактивной нагрузки (длины линии) на высших модах. Обработка численных результатов проводилась с помощью выражений, вытекающих из эквивалентной схемы связи резонатора с отрезком разомкнутой линии. Эти выражения имеют простой вид и наглядную графическую интерпретацию.

Результаты численных расчетов дали хорошее совпадение с результатами последующих измерений для мод низкочастотной части диапазона. Эти моды имеют наиболее высокие импедансы связи.

Проведенные расчеты использовались для определения параметров связи и демпфирования для коаксиальных линий, представляющих практический интерес. Исследовались коаксиалы с размерами $50 \leq d_2 \leq 110$ мм, $22 \leq d_1 \leq 48$ мм, $d_2/d_1 \simeq 2 - 4$, где d_2 и d_1 – диаметры внешнего и внутреннего проводников коаксиала.

На основе проведенных исследований разработаны и изготовлены демпферы высших мод.

На торцевой стенке резонатора установлены режекторные демпферы. Они имеют связь со всеми E -модами, в том числе и с рабочей. Моды типа E_{0n0} , не имеющие вариаций по длине, подавляются только этими демпферами.

Конструкция демпфера и его общий вид показаны на рис. 8.

Для отсечки токов основной моды используется коаксиальный режекторный резонатор. Своим емкостным зазором он встроен в разрыв внешнего проводника линии и настроен на основную частоту 200 МГц.

Высокое шунтовое сопротивление коаксиального резонатора (200 кОм) включено последовательно с низкоомной нагрузкой (50 Ом), за счет чего обеспечивается высокая степень режекции токов основной частоты.

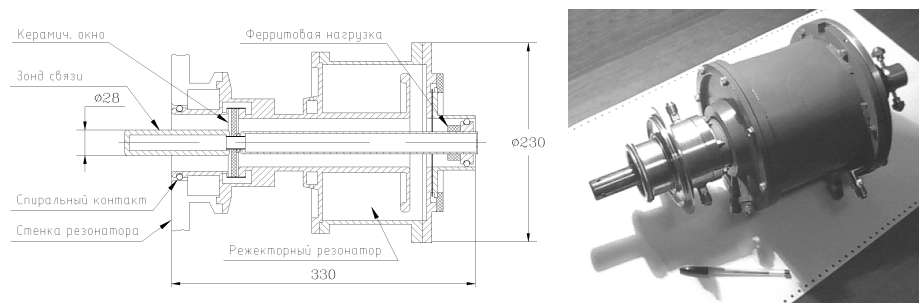


Рис. 8. Режекторный демпфер.

Коэффициент передачи на основной частоте составляет примерно -65 дБ, в то время как в полосе пропускания он не превышает -2 дБ.

Вакуумно-плотный керамический изолятор выполнен на основе керамики 22ХС из окиси алюминия. Внутренний и внешний металлические каркасы изолятора изготовлены из ковара. Зонд связи, внутренний проводник режекторного резонатора и металлические каркасы изолятора охлаждаются водой.

В качестве поглощающей нагрузки используется кольцевой сердечник из феррита марки 600 НН. Нагрузка обеспечивает коэффициент стоячей волны в линии не более 2 в полосе частот 300–1500 МГц.

На цилиндрической стенке резонатора установлены два демпфера, имеющие зондовую связь с радиальными составляющими E -поля высших мод, — так называемые радиальные демпферы. Конструкция и общий вид радиального демпфера показаны на рис. 9.

Один из демпферов установлен в средней плоскости, а другой смещен от торцевой стенки на четверть длины резонатора. Связь с полем основной моды у радиального демпфера практически отсутствует. Поэтому он содержит только коаксиальную линию, которая на одном конце имеет зонд связи с резонатором, а на другом — ферритовую поглощающую нагрузку. Вакуумно-плотный изолятор не используется, и ферритовая нагрузка оказывается в вакуумном объеме. Влияние феррита на вакуум при стендовых испытаниях и в действующей СПГП замечено не было.

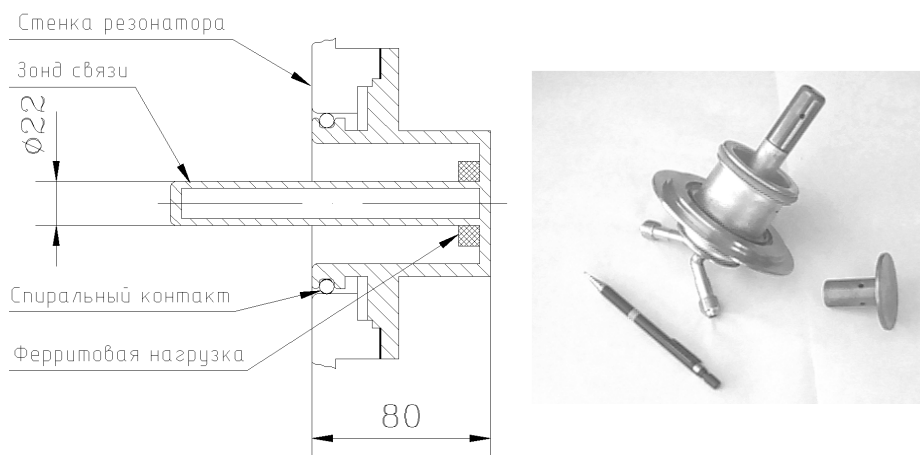


Рис. 9. Радиальный демпфер.

Опыт показал, что на участках коаксиалов, находящихся в вакууме, может возникать резонансный высокочастотный разряд (РВР). Подавление РВР достигалось после обработки (очистки) поверхности резонаторов тлеющим разрядом в среде аргона.

Исследование высших мод и системы демпфирования осуществлялось в диапазоне частот 200–1500 МГц. При исследованиях проводилась идентификация высших мод, измерение их частот и добротностей, собственной и нагруженной (с демпферами). Все резонансы наблюдались визуально с помощью панорамных измерителей Р4–11 (200–1000 МГц) и Р4–23 (1000–1500 МГц).

Степень демпфирования оценивалась по изменению добротности высших мод и по ослаблению мощности, проходящей через резонатор, включенный по проходной схеме. Добротности измерялись методом передачи по ширине полосы резонансной кривой. Импедансы связи аксиально-симметричных мод до и после демпфирования показаны в виде диаграммы на рис. 10. Там же для сравнения приводится и пороговая кривая импедансов связи в пересчете на один резонатор. Видно, что требуемая степень демпфирования достигнута.

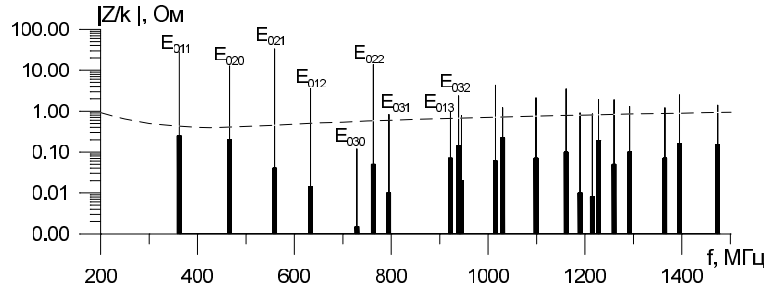


Рис. 10. Диаграмма продольных импедансов высших мод: тонкие линии — без демпферов, жирные — с демпферами; пунктир — пороговая кривая импедансов связи.

Частоты высших мод сильно (на 5 МГц и более) отличаются от частот радиогармоник тока пучка ($f = n \cdot 200$ МГц, $n=1, 2, 3, \dots$). Поэтому мощность, выделяемая в нагрузках демпферов, невелика и не превышает 5 Вт. Нагрузки рассчитаны на тепловыделение в несколько десятков ватт.

Аналогичные измерения проводились для аксиально-несимметричных мод. Сначала с помощью диэлектрических и металлических возмущающих тел исследовалось поле вблизи оси резонатора, проверялось отсутствие поля E_z собственно на оси. Затем определялось число вариаций продольного поля по длине в приосевой зоне. С помощью зондов, вводимых через отверстия в стенке резонатора, определялось число вариаций по азимуту.

Как указывалось, одним из свойств аксиально-несимметричных мод E_{1np} является их поляризационное вырождение. Каждой собственной частоте мод E_{1np} соответствуют две возможные поляризации поля с азимутальными распределениями, пропорциональными $\cos \varphi$ или $\sin \varphi$.

Для эффективного демпфирования аксиально-несимметричных мод необходимо, чтобы каждая из них была связана, как минимум, с парой демпферов, разнесенных по азимуту на угол около 90° . Этому условию удовлетворяет схема расположения демпферов, показанная на рис. 6.

Проводился опыт по демпфированию высших мод с помощью ферритовых поглотителей в патрубках, примыкающих к резонатору. Поглотитель (поз. 4 на рис. 6) размещался достаточно далеко от торцевой стенки резонатора, так чтобы провисание поля основной моды E_{010} не сказывалось на ее добротности. Четыре бруска феррита размером $20 \times 10 \times 120$ мм³ крепились симметрично на стенке патрубка. Установлено, что на частотах выше критической частоты патрубков (960 МГц) ферритовый поглотитель обеспечивает необходимое демпфирование и без помощи коаксиальных демпферов. При необходимости этот способ можно использовать для дополнительного демпфирования этих мод.

Исследовалось влияние внешних устройств (перестраивателей частоты, вводов мощности с мостом деления) на систему демпфирования. Внешние устройства вносят дополнительные потери и несколько усиливают эффект демпфирования.

Четвертая глава посвящена разработке демпфера основного колебания с быстродействующим ВЧ-переключателем для ускоряющих резонаторов СПГП У-70.

С 1985 года в синхротроне У-70 ИФВЭ установлена и эксплуатируется станция перегруппировки пучка (СПГП) на частоту 200 МГц. Она разработана в рамках проекта УНК. В основу СПГП положен ускоряющий модуль УНК, состоящий из двух цилиндрических резонаторов с рабочим видом колебаний E_{010} .

Основной вид колебаний пассивных резонаторов СПГП может послужить причиной продольной неустойчивости пучка в цикле ускорения У-70. Величина допустимого импеданса связи, рассчитанная по известным методикам для интенсивности $5 \cdot 10^{13}$ прот./цикл, составляет примерно 40 кОм. Поскольку эффективный шунтовой импеданс пары резонаторов СПГП равен 9,4 МОм, то требуется его уменьшение (демпфирование резонаторов) примерно в 250 раз.

Отключение и включение демпферов должно производиться за время, меньшее времени развития самогруппировки пучка из-за взаимодействия с резонаторами СПГП на частоте 200 МГц. Время развития самогруппировки на резонаторах СПГП с учетом их подгрузки вводами мощности составляет $\tau \simeq 0,1$ мс.

Таким образом, для резонаторов СПГП требуется быстродействующий демпфер основного колебания, синхронизованный с работой ВЧ-генератора станции и циклом ускорителя. Быстродействие коммутатора демпфера должно быть не хуже 0,1 мс.

Этому условию удовлетворяют ВЧ-коммутаторы на основе полупроводниковых элементов — рpn-диодов, которые обладают достаточно высокими мощностными характеристиками.

В главе обоснована принципиальная схема устройства, в основу которой положен резонансный тип демпфера. Он позволяет достичь необходимой степени демпфирования при существенно меньшей связи с резонатором. Благодаря этому заметно снижены токовые нагрузки на ВЧ-коммутатор демпфера, что упрощает его конструкцию и делает работу более надежной.

В данном устройстве демпфирование ускоряющего резонатора обеспечивается за счет связи с низкодобротным коаксиальным резонатором через трансформирующий отрезок коаксиальной линии длиной $l \simeq n \cdot \lambda/4$, $n = 1, 3, 5...$ В зазор коаксиального резонатора параллельно включен блок рpn-диодов, образующих ВЧ-переключатель.

Образец конструкции резонатора с диодным переключателем и его общий вид показаны на рис. 11. Собственно переключатель на рpn-диодах показан на рис. 12.

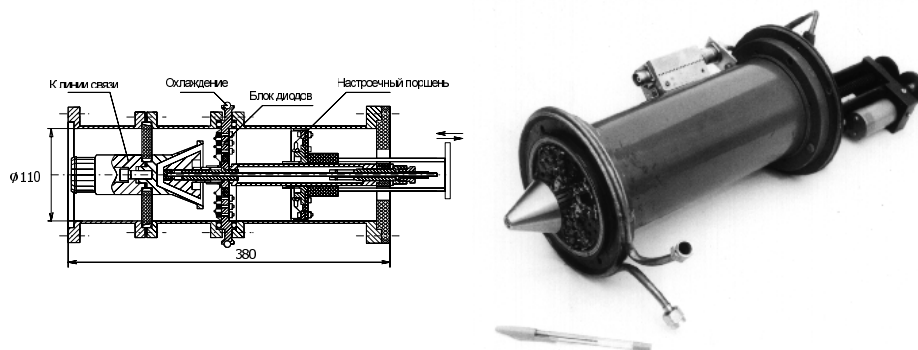


Рис. 11. Резонатор демпфера основного колебания с переключателем на рpn-диодах.



Рис. 12. Общий вид переключателя на pin-диодах.

Когда диоды заперты, высокое (по сравнению с волновым сопротивлением линии) шунтовое сопротивление коаксиального резонатора трансформируется в существенно более низкое сопротивление, нагружающее основной резонатор. Это обеспечивает его эффективное демпфирование.

При отпирании диодов (условие короткого замыкания на конце линии) основной резонатор нагружен на высокое сопротивление, и демпфирование снимается. При этом потери в устройстве незначительны и определяются в основном прямым ВЧ-сопротивлением диодов и током короткого замыкания через них. Коаксиальный резонатор настроен на рабочую частоту с учетом собственной емкости запертых диодов. Его индуктивная часть представляет собой короткозамкнутый отрезок линии переменной длины $l < \lambda/4$. Настройка резонатора осуществляется дистанционно перемещением короткозамыкающего поршня.

Шунтовое сопротивление и добротность этого резонатора зависят от величины обратного напряжения на диодах и могут регулироваться.

Добротность вторичного контура выбрана так, чтобы обеспечить необходимое демпфирование при минимальной связи между контурами.

Известно, что система связанных контуров может иметь одночастотную или двухчастотную (двугорбую) резонансную характеристику в зависимости от степени связи контуров и добротности вторичного контура. Близкой к оптимальной является настройка, при которой система контуров имеет одночастотный резонанс на границе его перехода в двухчастотный.

Из этого условия определялись добротность вторичного контура, коэффициент трансформации узла связи и прочие параметры при

заданном коэффициенте демпфирования. Это позволило определить основные параметры демпфера в двух режимах работы СПГП, а именно:

1. Ток рpn-диодного ВЧ-переключателя в режиме группировки на частоте 200 МГц, когда в резонаторы подается мощность от ВЧ-генератора СПГП.

2. Напряжение, наведенное пучком на рpn-диодах переключателя в режиме демпфирования пассивных резонаторов СПГП при ускорении пучка в У-70.

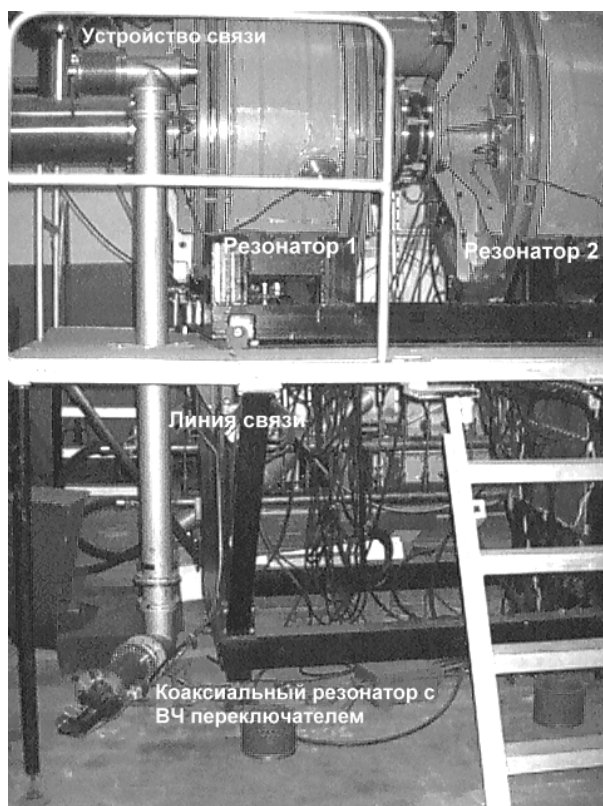


Рис. 13. Демпфер основного колебания.

Диоды чувствительны к облучению. Поэтому длина линии выбрана такой, что коаксиальный резонатор с рпн-диодами находится на нижнем уровне кольцевого зала У-70. При этом существенно снижаются радиационные нагрузки на диоды.

Демпфер основного колебания, установленный на СПГП У-70, показан на рис. 13.

В настоящее время СПГП используется для контролируемого увеличения продольного эмиттанса пучка У-70. Для этого перед критической энергией на резонаторах формируется ВЧ напряжение с амплитудой 50–70 кВ от генератора СПГП на частоте 200 МГц (рис. 2). Поэтому на время около 200 мс демпфирование резонаторов снимается путем подачи в рпн-диодный переключатель импульса прямого управляющего тока.

Кроме того, СПГП используется для улучшения структуры пучка при его медленном выводе на физические установки (рис. 3). Для этого на плато магнитного поля перед выводом пучка на резонаторы подается ВЧ-напряжение с амплитудой $\simeq 300$ кВ. На все это время демпфирование также снимается путем подачи управляющего сигнала на переключатель.

Используются также режимы работы без подачи импульса внешнего ВЧ-генератора. Демпфирование резонаторов снимается на время в несколько десятков миллисекунд, и они возбуждаются током сгруппированного пучка.

Таким образом, демпфер основного колебания применяется, по сути, как дистанционно управляемый регулятор шунтового сопротивления резонатора.

Исследовалось взаимодействие пучка У-70 с резонаторами СПГП. Проверялась эффективность демпфера основного колебания. Для этого наблюдался сигнал с пикового детектора, на вход которого поступает напряжение, наведенное пучком на пикап-электроде. Пиковый сигнал обратно пропорционален длине сгустков.

При выключенном демпфировании прохождение гармоник частоты обращения через полосу пропускания резонатора вызывает резкие спады пиковой кривой и, соответственно, рост продольного эмиттанса пучка (рис. 14а). На рис. 14б сильное демпфирование

включено перед прохождением последнего резонанса (время 700 мс). В результате этот резонанс подавлен, и последняя ступенька на пиковой кривой уже отсутствует.

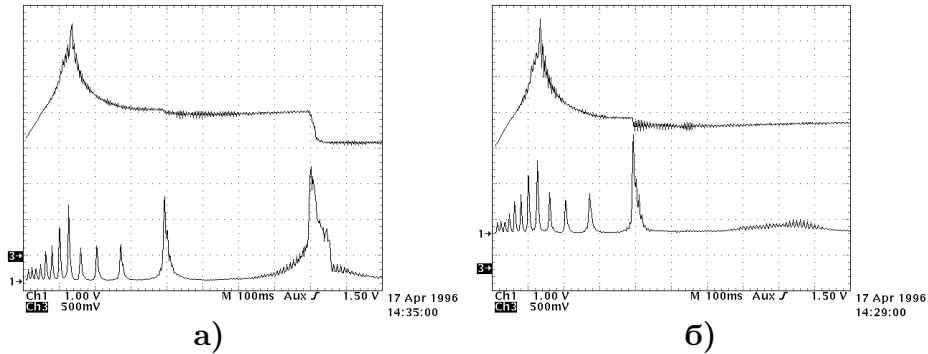


Рис. 14. Пиковые кривые (верхний луч) и осциллограммы напряжения, наведенного на резонаторе (нижний луч).

Экспериментально определены пороги неустойчивостей сгруппированного пучка, взаимодействующего с резонатором. Использовалась возможность плавного изменения шунтового сопротивления резонатора в некоторых пределах за счет изменения обратного напряжения смещения на рип-диодах ВЧ-переключателя. В качестве порогового принимался импеданс резонатора, при котором лишь в одном из 5–10 циклов ускорения (в результате разброса от цикла к циклу эмиттанса и интенсивности пучка) возникали едва заметные искажения пиковой кривой. Полученные значения импедансов достаточно хорошо соответствуют рассчитанным по известным методикам, особенно при больших энергиях ($\gamma > 20$). Некоторые расхождения, как и ожидалось, имели место в районе критической энергии.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

1. Проведено численное и экспериментальное исследование высших мод ускоряющего резонатора УНК и станции перегруппировки пучка (СПГП) синхротрона У-70 ИФВЭ, которые могут дестабили-

зировать пучок в продольном и поперечном направлении. Исследованы все аксиально-симметричные и несимметричные высшие моды ускоряющего резонатора в диапазоне 200–1500 МГц.

2. Разработана методика численного расчета параметров связи коаксиальных демпферов с цилиндрическим резонатором, осуществляемой с помощью штыревого зонда. В результате численных расчетов и дополнительных измерений получены эмпирические формулы, позволяющие оценивать степень связи коаксиальных устройств с резонатором на основной и высших модах.

3. Разработана и экспериментально исследована система демпфирования высших мод (продольных и поперечных) для резонаторов ускоряющей системы УНК и СПГП У-70.

Изготовлен полный комплект серийных образцов демпферов высших мод для резонаторов ускоряющей системы УНК и СПГП У-70.

Проведен цикл радиотехнических измерений параметров демпфирования на моделях резонаторов в 1/5 натуральной величины, на полномасштабных макетах и серийных образцах ускоряющих резонаторов. Демпферы испытаны на специальном ВЧ-стенде при рабочем напряжении ускоряющей системы 800 кВ/зазор.

Рабочие образцы демпферов установлены, испытаны и эксплуатируются на действующей СПГП У-70. С установленными демпферами продольные импедансы связи резонаторов в диапазоне 200–1500 МГц оказываются в несколько раз ниже пороговых значений. Это подавляет взаимодействие резонаторов с пучком на высших модах и обеспечивает тем самым рабочие режимы СПГП в циклах У-70.

4. Разработан, исследован и введен в эксплуатацию демпфер основного колебания для резонаторов ускоряющей системы СПГП У-70 с быстродействующим ВЧ-переключателем. Эта станция используется для контролируемого увеличения продольного эмиттанса пучка перед критической энергией и для улучшения структуры пучка при медленном выводе. При этом демпфер основного колебания применяется как дистанционно управляемый регулятор шунтового сопротивления резонатора.

С помощью СПГП У-70, оснащенной демпферами высших мод и основного колебания, были проведены успешные эксперименты по захвату пучка в режим УНК.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Список литературы

- [1] Б.К. Шембель, Э.Н. Бутряков, Э.А. Дудковский, В.В. Екимов, В.В. Каталев, И.А. Квашонкин, Б.В. Корзов, **В.Г. Кудрявцев**, С.А. Кузнецов, П.П. Степанов, И.И. Сулыгин, Г.Д. Тихонов, Н.А. Харечкин, И.М. Шалашов, О.А. Вальднер, Э.С. Масунов, С.В. Иванов. *Разработка ускоряющей системы УНК*. Труды 7-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1981, т. 2, с. 11–14.
- [2] Б.К. Шембель, В.В. Каталев, **В.Г. Кудрявцев**, И.И. Сулыгин. *Демпфер колебаний высших мод в ускоряющем резонаторе*. Авторское свидетельство № 984077, М. Кл. Н 05 Н 7/02, БИ № 47, 1982, с. 281.
- [3] В.В. Каталев, С.С. Ковалев, Б.В. Корзов, **В.Г. Кудрявцев**, И.И. Сулыгин, Б.К. Шембель, И.М. Шалашов, О.А. Вальднер, Ю.К. Майоров, Э.С. Масунов. *Разработка и исследование ускоряющей системы УНК*. Труды 8-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1983, т. 1, с. 138–142.
- [4] Э.Н. Бутряков, М.И. Войчицкий, А.А. Длиннов, Э.А. Дудковский, В.В. Каталев, И.А. Квашонкин, С.С. Ковалев, Б.В. Корзов, **В.Г. Кудрявцев**, С.А. Кузнецов, К.Г. Мирзоев, В.В. Поляков, В.Г. Рогозинский, И.И. Сулыгин, А.Ю. Тюленев, И.Г. Уманский, Б.К. Шембель. *Разработка и исследование высокочастотной системы УНК*. Труды 9-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1985, т. 1, с. 127–129.
- [5] **В.Г. Кудрявцев**, И.И. Сулыгин, Б.К. Шембель. *Устройство для шунтирования ускоряющего резонатора*. Авторское свидетельство № 1163796, М. Кл. Н 05 Н 7/00, БИ № 5, 1986, с. 263.
- [6] Э.Н. Бутряков, Г.Г. Гуров, В.В. Каталев, С.С. Ковалев, Б.В. Корзов, **В.Г. Кудрявцев**, В.В. Поляков, И.В. Сергеев, И.И. Сулыгин, Б.К. Шембель. *Результаты наладки мощной ВЧ системы станции перегруппировки пучка синхротрона У-70 на частоту ускоряющего поля УНК*. Труды 10-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1987, т. 1, с. 193–196.

- [7] В.В. Каталев, **В.Г. Кудрявцев**, И.И. Сулыгин, Б.К. Шембель. *Система демпфирования колебаний высших мод в ускоряющем модуле УНК*. ЖТФ, т. 57, вып. 11, с. 2135–2141, 1987; Препринт ИФВЭ 86-97, Серпухов, 1986.
- [8] О.В. Буянов, Г.Г. Гуров, И.М. Жуков, В.В. Каталев, Л.А. Ким, В.В. Комаров, **В.Г. Кудрявцев**, С.А. Кузнецов, О.П. Лебедев, А.Ю. Мало-вицкий, А.А. Матюшин, В.В. Минин, В.И. Момот, В.В. Поляков, О.В. Стрюков, И.И. Сулыгин, Н.И. Балалыкин, Г.И. Сидоров. *Исследование станции перегруппировки пучка протонного синхротрона У-70 на частоту ускоряющего поля УНК*. Труды 11-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1989, т. 1, с. 211–213.
- [9] V.V. Katalev, S.S. Kovalev, **V.G. Kudriavtsev**, I.I. Sulygin. *The 200 MHz Accelerating Structure for UNK*. Proc. of EPAC-92, Berlin, 1992, v. 2, pp. 1197–1199.
- [10] В.В. Каталев, **В.Г. Кудрявцев**, С.В. Сергеев, И.И. Сулыгин. *Демпфер основного колебания для станции перегруппировки пучка синхротрона У-70*. Труды 13-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, т. 2, с. 356, 1993.
- [11] **В.Г. Кудрявцев**. *Исследование зонда связи коаксиального фидера с цилиндрическим резонатором*. Труды 13-го Совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, т. 2, с. 384, 1993.
- [12] V. Katalev, **V. Kudryavtsev**, I. Sulygin. *Higher Order Mode Damping System in the UNK RF Cavity*. Proc. of USPAC, Washington, 1993, vol. 2, pp. 916–917.
- [13] В.В. Каталев, **В.Г. Кудрявцев**, И.И. Сулыгин. *Демпфирование аксиально-несимметричных типов колебаний в ускоряющих резонаторах УНК*. Труды 14-го Совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, т. 1, с. 129–132, 1994.
- [14] С.В. Иванов, В.В. Каталев, **В.Г. Кудрявцев**, А.Ю. Мало-вицкий, И.И. Сулыгин. *Исследование взаимодействия пучка синхротрона У-70 с ускоряющими резонаторами станции перегруппировки пучка*. Труды 15-го Совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, т. 2, с. 224–227, 1997.
- [15] С.В. Иванов, В.В. Каталев, **В.Г. Кудрявцев**. *Исследование экранирующей свойств лайнера вакуумной камеры УНК*. Труды 16-го Совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, т. 2, с. 24–27, 1999.

Рукопись поступила 27 апреля 2002 года

В.Г. Кудрявцев.

Демпфирование собственных колебаний в ускоряющих резонаторах протонного синхротрона.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 13.05.2002. Формат $60 \times 84/16$. Офсетная печать.

Печ.л. 1.73. Уч.-изд.л. 1.5. Тираж 100. Заказ 86. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

