

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ**

**Московский инженерно-физический институт
(государственный университет)**

В.И. Каминский В.А. Сенюков Н.П. Собенин

**ВЫСШИЕ ТИПЫ ВОЛН В ЭЛЕМЕНТАХ
УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР**

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологи» в качестве
учебного пособия для студентов высших учебных заведений*

Москва 2002

УДК 621.384.6(075)

ББК 22.386я7

К 18

Каминский В.И., Сеньюков В.А., Собенин Н.П. **Высшие типы волн в элементах ускоряющих структур:** Учебное пособие. М.: МИФИ, 2002. – 104 с.

Пособие содержит обзор параметров создаваемых и действующих ускорителей, в которых эффекты генерации пучком электромагнитных полей играют существенную роль. Рассмотрены количественные характеристики, описывающие взаимодействие пучка с ускоряющей системой и элементами вакуумной камеры. Приведены краткие описания программных пакетов, используемых для расчета электродинамических периодических и изолированных резонансных структур. Обсуждаются методы экспериментального исследования ускоряющих структур. Рассмотрены способы демпфирования волн высших типов, возбуждаемых в ускоряющих структурах циклических и линейных коллайдеров, работающих при нормальных температурах и в сверхпроводящем состоянии.

Учебное пособие предназначено для использования в курсах лекций «Ускорители заряженных частиц», «Ускоряющие структуры», «Электроника СВЧ» для студентов старших курсов, аспирантов, научных работников по специальности «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника», а также может быть полезно для специалистов по радиофизике, электродинамике.

Пособие подготовлено в рамках выполнения гранта Министерства образования России и Американского фонда гражданских исследований и развития для независимых государств бывшего Советского Союза (CRDF) «Научно-образовательный центр фундаментальных исследований материи в экстремальных состояниях» (грант М0-011-0).

Рецензент д-р физ.-мат. наук В.И. Шведунов

© Каминский В.И., Сеньюков В.А., Собенин Н.П., 2002
ISBN 5-7262-0443-3
© Московский инженерно-физический институт
(государственный университет), 2002

Редактор

Т.В. Волвенкова

Подписано в печать 20.11.2002.

Формат 60×84 1/16

Печ. л. 6,5

Уч.-изд. л. 6,5 Тираж 120 экз.

Изд. №

Заказ №

Московский инженерно-физический институт (государственный университет)

Типография МИФИ

115409, Москва, Каширское шоссе, 31

ВВЕДЕНИЕ

Развитие ускорительной техники в настоящее время направлено на разработку и создание уникальных ускорительных комплексов с рекордными величинами выходной энергии и интенсивности, предназначенных для решения фундаментальных задач физики элементарных частиц. Большинство действующих и сооружаемых ускорителей для фундаментальных исследований работает в режиме встречных пучков. Это обеспечивает высокую эффективность рождения вторичных частиц при столкновении ускоренных пучков. Крупнейшим создаваемым в CERN адронным коллайдером является ускоритель LHC (Large Hadron Collider) на энергию 7 ТэВ. Лептонные коллайдеры включают в себя установки со встречными пучками электронов и позитронов, и они могут быть как циклическими, так и линейными. При создании коллайдеров необходимо решать проблему обеспечения высокой светимости пучка за счет повышения его интенсивности и уменьшения эмиттанса в месте встречи.

Увеличение интенсивности пучка приводит к появлению эффектов, связанных с электромагнитным взаимодействием частиц как внутри пучка, так и с ускоряющей системой, элементами вакуумной камеры. Собственные поля частиц могут приводить к развитию когерентных и некогерентных неустойчивостей пучка, ограничивающих его интенсивность. Эти явления характерны как для циклических, так и для линейных ускорителей. В резонансных ускорителях существует целый ряд эффектов, связанных с принципом резонансного ускорения частиц, который приводит к генерации электромагнитных волн в широком диапазоне частот. Частицы, сгруппированные в сгустки, возбуждают в полостях, расположенных на траектории пучка, так называемые наведенные поля, имеющие как продольные, так и поперечные компоненты. Эти поля могут приводить к торможению пучка и его отклонению от равновесной траектории и потере. В циклических ускорителях к потерям энергии на возбуждение ВЧ полей добавляется синхротронное излучение, особенно существенное при ускорении электронов.

Уменьшение потерь энергии частиц достигается различными методами. Синхротронное излучение снижается с возрастанием

радиуса орбиты, и это обстоятельство в значительной степени определило развитие линейных коллайдеров легких частиц. На рабочем типе волны компенсация реактивной нагрузки пучком в ускоряющих секциях достигается с помощью качественной группировки пучка. Борьба с паразитными ВЧ полями, возбуждаемыми в канале ускорителя, осуществляется различными методами, обеспечивающими уменьшение взаимодействия пучка с вакуумной камерой и ускоряющими секциями не на рабочем типе волны. В элементах и узлах устанавливаются устройства, обеспечивающие поглощение ВЧ энергии, вводятся реактивные элементы, затрудняющие возбуждение полей на паразитных типах волн, используются системы автоматического регулирования с обратной связью по характеристикам пучка. Эти методы применяются для борьбы с полями, приводящими к потерям энергии пучка и смещению его от равновесной траектории. Значительное внимание уделяется исследованию и подавлению паразитных типов волн, возбуждаемых в ускоряющих структурах – волноводах и резонаторах.

Пучок заряженных частиц высокой энергии, проходящий через секцию не по оси, возбуждает асимметричные электромагнитные поля, наиболее опасными из которых являются поля дипольных типов, возбуждаемые на частотах вблизи рабочей частоты. Эти поля могут приводить к существенному увеличению эмиттанса пучка. Такая проблема существует также в ускорителях прикладного применения. Эффекты возбуждения наведенных полей могут быть разбиты на два типа. Первым типом являются эффекты с ближним действием, обусловленные полем, отклоняющим частицы, находящиеся в конечной части того же сгустка, что возбудил паразитное поле. Характерные времена составляют несколько пикосекунд. Наведенные поля второго типа имеют дальное действие и оказывают влияние на частицы, находящиеся в сгустках,двигающихся в структуре после сгустка, возбудившего наведенное поле. Оба эффекта могут приводить к увеличению эмиттанса пучка и его нестабильности.

Исследования, проводимые во многих ускорительных центрах, позволили разработать методы подавления короткодействующих и дальнедействующих наведенных полей. Уменьшение смещения частиц внутри сгустка достигается тщательной юстировкой пучка по отношению секции либо смещением частиц с гребня ускоряю-

шей волны, что приводит к существенному изменению частот высших мод и уменьшению их влияния на частицы сгустка. Основным подходом к решению проблемы подавления дальнедействующих полей является расстройка и/или поглощение возбуждаемых высших типов волн, отклоняющих пучок. Расстройка частот высших мод в ячейках осуществляется изменением размеров ячеек секции специальным образом. Это приводит к быстрому затуханию во времени наведенных полей и разрушению их когерентного взаимодействия. Поглощение может быть обеспечено несколькими методами. Так, в структуре DDS (Damped Detuned Structure), предложенной в SLAC (Стенфорд, США), в ячейках изготовлены небольшие щели связи со специальными коллекторными волноводами, проложенными вдоль структуры. Возбуждаемые паразитные поля из ячеек структуры выводятся в волноводы и поступают в поглощающие нагрузки, установленные на концах волноводов. Другим способом является покрытие краев диафрагм материалами с большими потерями. Такой метод предложен для установки SBLC (Гамбург, Германия). В установке КЕК (Япония) ячейки секции снабжены дроссельными фильтрами, обеспечивающими запертие в ячейке поля основного типа и вывод из нее полей высших типов. В ускорителе CLIC (CERN) энергия высших мод выводится в поглощающие нагрузки по четырем волноводам, связанным с каждой ячейкой через отверстия связи.

Предложенные методы не позволяют снизить короткодействующие наведенные поля, которые определяются радиусами отверстий в диафрагмах для пролета пучка и являются фиксированными для выбранной частоты ускоряющей моды. Поперечные наведенные поля примерно пропорциональны частоте в третьей степени, продольные поля – частоте во второй степени. Для увеличения ускоряющих градиентов в разрабатываемых коллайдерах идут по пути повышения частоты, поэтому возрастают также амплитуды возбуждаемых паразитных полей. Наиболее действенным способом снижения амплитуд короткодействующих полей является проведение пучка по оси структуры с микронной точностью для предотвращения возбуждения асимметричных полей. Эффективным путем обеспечения этого является детектирование дипольных полей, наведенных пучком, и их минимизация перемещением осей пучка и структуры относительно друг друга. Методика применения самой

ускоряющей структуры как датчика положения пучка предложена и разработана в ряде ускорительных центров. Преимущество такой методики по сравнению с использованием специальных датчиков положения пучка заключается в том, что полезный сигнал несет только полезную информацию о положении пучка по отношению к электрической оси структуры. Это исключает необходимость установки и центровки специального датчика по отношению к оси структуры с микронной точностью. Снижение паразитных полей внутри сгустка может быть достигнуто выбором специального закона распределения частиц в сгустке по продольной координате.

Разработка ускоряющих структур состоит из нескольких стадий. Расчет электродинамических характеристик, при реализации которых обеспечено ускорение пучка до заданной энергии. К ним относятся выявление физических процессов, приводящих к ухудшению качества пучка и развитию различного рода неустойчивостей, выработка рекомендаций по конструктивному выполнению ускоряющей структуры, при выполнении которых существенно снижается опасность развития неустойчивостей, полномасштабное экспериментальное исследование структуры с пучком. Рассмотрение процессов взаимодействия пучка с ускоряющей структурой может выполняться как расчетными, так и экспериментальными методами. При этом экспериментальное исследование может осуществляться с помощью моделирования на низком уровне мощности, либо при проведении измерений непосредственно на действующей установке. Результаты исследования являются основой создания эффективных ускоряющих структур, работающих как при нормальных температурах, так и в сверхпроводящем состоянии, в которых обеспечено эффективное подавление высших типов волн, возбуждаемых интенсивным пучком.

Основной целью пособия является знакомство читателя с развитиями в ускорительных центрах мира теоретическими и экспериментальными методами исследования высших типов волн в ускоряющих структурах и способами их подавления. Предполагается, что читатель знаком с основами теории и конструкции ускорителей заряженных частиц, устройствами сверхвысоких частот. Ряд излагаемых вопросов не рассматривался ранее в учебной литературе, и является доступным только в научных журналах и материалах конференций по ускорителям заряженных частиц.

Глава 1

ОБЗОР ДЕЙСТВУЮЩИХ И РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ниже приведен обзор действующих и разрабатываемых ускорителей заряженных частиц на высокие энергии. Ими являются как циклические, так и линейные ускорители. Большинство из рассмотренных установок является коллайдерами (столкновителями). Для исследования различных видов фундаментальных взаимодействий создаются «симметричные» коллайдеры, в которых обеспечивается столкновение частиц одного типа – протон-протонные, электрон-позитронные, и «несимметричные» коллайдеры, в которых взаимодействуют частицы различных типов, обладающие различными энергиями.

Ключевым параметром каждого коллайдера (циклического либо линейного), наряду с энергией в центре масс, является светимость:

$$L = \frac{f_{\text{повт}} n_{\text{ст}} N_{\text{ст}}^2}{4\pi\sigma_x \sigma_y}. \quad (1.1)$$

Здесь $f_{\text{повт}}$ – частота повторения импульсов ускорителя, $n_{\text{ст}}$ – число сгустков в импульсе, $N_{\text{ст}}$ – заряд сгустка, σ_x и σ_y – горизонтальный и вертикальный размер пучка в точке встречи. Светимость существенно ограничена мощностью электропитания $P_{\text{пит}}$, потребляемой из сети, полным коэффициентом полезного действия η преобразования $P_{\text{пит}}$ в мощность пучка, потерями энергии δ_n из-за потерь пучка в месте встречи (beamstrahlung) и нормализованного вертикального эмиттанса $\gamma\epsilon_y$:

$$L \propto \eta P_{\text{пит}} \sqrt{\frac{\delta_n}{\gamma\epsilon_y}}. \quad (1.2)$$

Потребление мощности из сети должно оставаться в разумных пределах, потери энергии пучка в месте встречи ограничены несколькими процентами, для того чтобы поддержать хорошее разрешение по энергии и малую остаточную активность в экспериментальной зоне. Таким образом, свободными параметрами, которые могут повысить светимость, являются КПД и эмиттанс. Это

справедливо для циклических и линейных машин. Оптимизации этих параметров уделяется значительное внимание.

Сделанный обзор не претендует на полноту, рассмотрены лишь некоторые ускорители с уникальными параметрами, его основной задачей является показ важнейших тенденций создания современных ускорителей для фундаментальных исследований и важной роли, которую играет разработка эффективных ускоряющих структур для таких машин.

1.1. Циклические коллайдеры

1.1.1. Протон-протонные коллайдеры

В настоящее время крупнейшим создаваемым коллайдером протонов является ускоритель LHC (Large Hadron Collider). Эта установка сооружается в CERN усилиями ряда стран, включая и Россию. Физический запуск коллайдера намечен на 2005 г. Ниже приведены параметры установки:

Конечная энергия пучка, ТэВ	7
Энергия инжекции, ТэВ	0,45
Длина кольца, м	26658
Поле в дипольных магнитах, Тл.....	8,33
Светимость, см ⁻² с ⁻¹	10 ³⁴
Время жизни накопленного пучка, ч.....	10
Число протонов на сгустке	1,1·10 ¹¹
Число сгустков в ускоряемом пучке	2808
Номинальное разделение сгустков, нс.....	25
Средний ток пучка, А	0,56
Нормированный эмиттанс, мк	3,75
Размер пучка в точке встречи пучков, мк.....	15,9
Внутренний диаметр обмотки магнита, мм.....	56
Потери энергии на оборот, кэВ	6,7
Мощность излучения пучка, кВт.....	3,8
Энергия, запасенная в пучке, МДж.....	350
Энергия, запасенная в магнитах, ГДж	11

ВЧ система работает на частоте 400,8 МГц. Ускоряющее напряжение составляет 16 МВ на пучок, что обеспечивает ускорение и сохранение сгруппированного пучка. Высокое значение тока пучка

потребовало выбора в качестве ускоряющих структур медных резонаторов с ниобиевым напылением, работающих в сверхпроводящем режиме. Шестнадцать резонаторов, содержащих по одной ячейке и имеющих большую апертуру, собраны в четыре модуля, по два на каждый пучок. Набор энергии в каждом резонаторе составляет 2 МВ. Питание резонаторов осуществляется от клистронов мощностью 330 кВт каждый. Для компенсации погрешностей инжекции предполагается установить дополнительную ВЧ систему, работающую на частоте 200,4 МГц и обеспечивающую демпфирование колебаний.

В России осуществляется разработка Ускорительно-накопительного комплекса (УНК), которая начата в 1983 г. Первоначально предполагалось создание двух ускорителей в одном тоннеле. Первый должен обеспечивать ускорение частиц с 70 до 400 ГэВ, второй, со сверхпроводящими магнитами, должен увеличивать энергию пучка до 3000 ГэВ. Пучки с энергией 400 и 3000 ГэВ сталкиваются в месте встречи, обеспечивая энергию взаимодействия в системе центра масс 2200 ГэВ.

Из-за финансовых проблем сооружение сверхпроводящей части комплекса приостановлено. В настоящее время ведутся работы по созданию ускорителя на энергию 600 ГэВ (УНК-600) с выводом пучка на неподвижную мишень. Ниже приведены основные параметры ускорителя УНК-600:

Конечная энергия, ГэВ	600
Энергия инжекции, ГэВ	65
Длина кольца, м	20772
Поле в дипольных магнитах, Тл.....	1
Время ускорения, с	20
Номер гармоники частоты обращения.....	13860
Частота ускоряющего поля, МГц	200
Полное ускоряющее напряжение, МВ.....	7
Число частиц в сгустке	$6 \cdot 10^{14}$
Средний ток пучка, А	1,4

ВЧ система УНК-600 состоит из 8 независимых ускоряющих блоков. Каждый блок включает два резонатора, подключенных к выходным плечам квадратурного моста, и источника ВЧ мощности, установленного вне тоннеля ускорителя. Каждый источник обеспечивает выходную мощность 800 кВт в непрерывном режиме по-

средством суммирования мощности четырех тетродных усилителей с помощью мостовых устройств.

1.1.2. Электрон-ионные коллайдеры

Интерес к коллайдерам различных типов частиц (электронов и тяжелых ионов, протонов и электронов) достаточно велик. В ускорительном центре DESY (Гамбург, Германия) рассматривается возможность модернизации кольца HERA (Hadron Electron Ring Accelerator) для обеспечения накопления ионов и столкновения их с пучками электронов либо позитронов, генерируемых в кольце HERA либо линейном ускорителе TESLA. Этот проект получил наименование THERA. В Брукхейвенской лаборатории (США) разрабатывается проект модернизации установки RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) для проведения экспериментов на встречных пучках протонов (ионов) и электронов. Установка EPIC (Electron Proton Intersection Collider) создается в Массачусетском технологическом институте (США). В табл. 1.1 приведены основные характеристики «несимметричных» коллайдеров.

Таблица 1.1

Параметр	Установка			
	THERA	EPIC	eRHIC	eRHIC
Тип ускорителя	Линейный ускоритель – кольцо	Линейный ускоритель – кольцо	Линейный ускоритель – кольцо	Кольцо – кольцо
Тип ионов	Протоны	Протоны	Протоны/ золото	Протоны/ золото
Светимость, 10^{32} , $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	0,41	21	4,6/0,36	3,5/0,86
Длина кольца, м	6355	500	3833	3833
Параметры пучка ионов				
Энергия, ГэВ/нк	1000	50	250/100	250/100
Число ионов в сгустке, 10^{11}	1,0	1,0	0,3/0,19	0,94/0,012
Средний ток, А	0,071	2,4	0,14/0,68	0,42/0,42
Параметры пучка электронов				
Энергия, ГэВ	250	5	10	10
Число электронов в сгустке, 10^{11}	0,2	0,11	0,3/0,3	0,26/0,81
Средний ток, А	0,000084	0,264	0,135/0,135	0,12/0,37

Ускоряющие системы построены на основе однозачерных резонаторов, число которых в кольце составляет от 5 до 8. Формы резонаторов оптимизированы с целью получения максимального шунтового сопротивления. Среди ряда причин потерь энергии и пучка в этих установках присутствует проблема возбуждения волн высших типов в ускоряющих структурах. Она особенно существенна при использовании сверхпроводящих ускоряющих структур. Потери на возбуждение паразитных полей с продольным компонентом электрического поля на оси могут достигать значительных величин. Так, в установке EPIC в каждом резонаторе генерируются поля мощностью около 8 кВт, большая часть этой мощности выходит из резонатора через отверстия для пролета пучка. В канале транспортировки пучка размещены устройства поглощения этой мощности.

1.1.3. Коллайдеры легких частиц

Циклические коллайдеры легких частиц являются наиболее многочисленной группой установок, созданных для решения задач фундаментальной физики. Их основная особенность связана с ускоряемым типом частиц. Электроны и позитроны, являясь легкими частицами, при движении в циклическом ускорителе имеют существенные потери на синхротронное излучение. Для снижения этих потерь диаметр установки желательно делать максимально большим. Так, выведенный из эксплуатации коллайдер LEP (Large Electron Positron) имеет диаметр около 10 км при энергии частиц (электронов и позитронов) около 100 ГэВ. В туннеле, где располагалась эта установка, монтируется коллайдер LHC.

В табл. 1.2 приведены параметры нескольких установок, часть которых функционирует продолжительное время и обеспечивает решение задач фундаментальной физики на промежуточных энергиях частиц.

Установки ВЭПП (Встречные электрон-позитронные пучки, Россия), DAPHNE (Италия), CESR (Cornell Electron-Positron Storage Ring, США) являются симметричными электрон-позитронным коллайдерами. Установки PEP-II (Positron Electron Project, США) и

КЕК (Япония) представляют собой асимметричные электрон-позитронные коллайдеры.

Таблица 1.2

Параметр	Установка						
	ВЭПП-4	DAPHNE	CESR	PEP-II		КЕК	
Тип частиц	e ⁻ , e ⁺	e ⁻ , e ⁺	e ⁻ , e ⁺	e ⁻	e ⁺	e ⁻	e ⁺
Конечная энергия, ГэВ	6,0	0,51	5,3	9,0	3,1	8,0	3,5
Длина кольца, м	366	98	468	2199	2199	3016	3016
Номер гармоники частоты обращения	222	120	780	3492	3492	5120	5120
Частота ускоряющего поля, МГц	181	368	500	476	476	508	508
Полное ускоряющее напряжение, МВ	5,0	0,25	12	5	14	8	20
Число частиц в сгустке, 10 ¹⁰	~1	~1	~1	6,0	2,8	3,3	1,4
Средний ток пучка, А	0,2	0,56	1	2,16	0,75	2,6	1,1
Светимость, 10 ³² см ⁻² с ⁻¹	1,5	1,0	17	30		100	

1.2. Линейные электрон-позитронные коллайдеры

Среди специалистов по ускорительной физике существует общее мнение, что после ЛНС линейные электрон-позитронные коллайдеры находятся на переднем крае продвижения в область все более высоких энергий частиц. Такие установки предназначены для исследования электрослабых взаимодействий элементарных

частиц. Энергия 0,5 ТэВ в системе центра масс является планируемым рубежом создаваемых установок. Ускорители должны быть созданы на основе как сверхпроводящих, так и структур, работающих при нормальной температуре.

Первым линейным электрон-позитронным коллайдером явилась установка SLC (Stanford Linear Collider). Она представляла собой известный двухмиллиный линейный ускоритель SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) с двумя дугообразными каналами проводки электронов и позитронов. Новое поколение разрабатываемых линейных коллайдеров должно обеспечить увеличение энергии частиц по сравнению с этой установкой в 5-10 раз, светимости – в 10^4 раз, уменьшение поперечных размеров пучка месте встречи – в 100 раз.

Разработка коллайдеров ведется по нескольким направлениям. В США, Японии, России развиваются концепции ускорителей, работающих в X -диапазоне частот, в Японии – разрабатывается установка S -диапазона, в DESY (Германия) создается сверхпроводящий ускоритель, работающий в L -диапазоне. В этом центре создан также проект коллайдера S -диапазона. Для дальнейшего продвижения в сторону более высоких энергий (3 ТэВ и выше) в CERN рассматриваются проекты ускорителей, работающих в K -диапазоне с использованием новых типов источников мощности. Основные параметры коллайдеров приведены в табл. 1.3. Ниже даны также краткие характеристики установок.

NLC (Next Linear Collider) и JLC (Japanese Linear Collider). Коллайдер с секциями, работающими в режиме бегущей волны при нормальной температуре на частоте существенно более высокой, чем в SLC, в котором она равна 2856 МГц. Это обеспечивает значительное сокращение длины установки. Для получения достаточного уровня мощности на входе ускоряющих секций планируется применить системы компрессии энергии электромагнитного поля.

TESLA (Teraelectronvolt Electron Superconducting Linear Accelerator). Два ускорителя коллайдера работают в L -диапазоне. Ускоряющие секции – сверхпроводящие резонаторы, возбуждаемые на виде колебаний π и состоящие из 9 ячеек. Отличительной особенностью установки является наличие двух демпфирующих колец с

большим радиусом, позволяющих накапливать пучки длительно-
 стью ~1мс, поступающие из сверхпроводящих секций.

Таблица.1.3

Коллайдер	Параметр							
	Энергия, ТэВ	Светимость, $10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	Рабочая частота, ГГц	Частота повторения, Гц	Длительность импульса, мкс	Градиент ускоряющего поля без пучка/с пучком, МВ/м	Длина ускорителя, км	Число секций
NLC1/ JLC(X)	0,5	25/ 20	11,4	150/ 120	0,23	70/ 54	12,6	6640
NLC1/ JLC(X)	1,0	25/ 30	11,4	100/ 120	0,23	70/ 54	25,8	13280
TESLA1	0,5	34	1,3	5	1315	23,4/ 23,4	30,0	19328
TESLA2	0,8	58	1,3	4	1315	35/ 35	30,0	19328
CLIC1	0,5	14,2	30,0	200	0,012	172/ 150	5,0	22466
CLIC2	3,0	10,3	30,0	100	0,012	172/ 150	27,5	134796
JLC(C)1	0,5	12,6	5,7	100	0,48	41,8/ 31,5	17,1	8712
JLC(C)2	1,0	25	5,7	100	0,48	41,8/ 31,5	30,3	17424
SBLC	0,5	2,2	3,0	50	2,8	21/ 17	33,0	5120
VLEPP	0,5	12,3	14,0	300	0,11	100/ 91	7,0	5600

CLIC (Compact Linear Collider) на энергию 3 ТэВ. Рассматривается установка на энергию выше 1 ТэВ. Ускоряющие секции должны работать на частоте 30 ГГц (*K*-диапазон) с нестандартными источниками мощности. Параллельно с основным каналом, содержащим ускоряющие секции, расположен вспомогательный канал с секциями, в которых двигается интенсивный сгруппированный пучок на относительно небольшую энергию. При прохождении секций вспомогательного канала пучок генерирует мощность, которая передается в секции основного канала и обеспечивает ускорение частиц. Применение такой системы восполняет отсутствие клистронных усилителей высокой мощности, работающих в *K*-диапазоне.

JLC (Japanese Linear Collider) *S*-диапазона. Разрабатываемая установка наиболее близка по рабочей частоте к *S*-диапазону, являющемуся традиционным для действующих коллайдеров, например, SLC. Ускоряющие секции выполнены на основе круглого диафрагмированного волновода, работающего в режиме бегущей волны.

SBLC (S-Band Linear Collider). Установка является логическим развитием действующего коллайдера SLC. Ускоряющие волноводы – круглые диафрагмированные волноводы *S*-диапазона со средним значением градиента ускоряющего поля. Секции работают в режиме бегущей волны. Подавление паразитных полей предполагается осуществить с помощью разработанных оригинальных методик. Предусмотрены два кольца демпфирования поперечных колебаний в пучке на энергии около 3 ТэВ. В настоящее время выполнение проекта прекращено из-за необходимости сосредоточения усилий на разработке коллайдера TESLA.

VLEPP (ВЛЭПП – Встречные линейные электрон-позитронные пучки). Ускоритель состоит из секций, работающих в *X*-диапазоне в режиме бегущей волны при нормальной температуре. Выбран высокий ускоряющий градиент, достигаемый с помощью применения системы накопления энергии ВЧ поля. Особенностью ускорителя является то, что в каждом ВЧ импульсе ускоряется только один сгусток. При этом отсутствует проблема подавления в секциях высших типов волн с дальнодействием. Работы прекращены из-за отсутствия финансирования.

Глава 2

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУРАХ

Ускоряющая структура является важнейшей составляющей частью любой ускорительной установки. Ее основная задача – эффективная передача энергии внешнего генератора ускоряемым частицам. Одновременно происходит обратный процесс - возбуждение пучком электромагнитных полей в самой структуре, причем поля возбуждаются не только на частоте основной ускоряющей моды, но и на модах колебаний, обладающих аксиальной симметрией и имеющих поляризацию. Эти моды называют также волнами высших типов (ВВТ) в противоположность ускоряющей волне, являющейся волной низшего типа. Воздействие этих колебаний на динамику пучка может приводить к потерям энергии частицами и развитию его продольных и поперечных неустойчивостей. Ниже рассмотрены основные типы ускоряющих структур, применяемых в резонансных ускорителях с интенсивными пучками, а также количественные характеристики, описывающие возбуждение пучком электромагнитных полей в секциях на основном и высших типах волн.

2.1. Ускоряющие структуры циклических и линейных коллайдеров

В циклических ускорителях протонов и ионов на высокие энергии применяются ускоряющие системы со стоячей волной, представляющие собой объемные резонаторы, в которых возбуждаются сильные продольные электрические поля между ускоряющими электродами (трубками дрейфа). Форма резонатора оптимизируется таким образом, чтобы обеспечить максимальную величину шунтового сопротивления на рабочей частоте. Основным или рабочим типом волны, на котором осуществляется ускорение частиц, является TM_{01} -тип (в другой записи E_{01} -тип). Применение этого аксиально-симметричного типа волны с одной вариацией поля по радиусу имеет ряд преимуществ, обеспечивающих конструктивное

удобство изготовления резонаторов, подключения к ним устройств ВЧ питания и фокусировки пучка, сопряжения с каналом транспортировки частиц. В конкретных реализациях форма резонатора может быть близкой к сферической (установка РЕР-II), цилиндрической (Ускорительно-накопительный комплекс), иметь более сложное поперечное сечение, но всегда является аксиально-симметричной. Развитие технологии создания СВЧ сверхпроводящих устройств обеспечило возможность создания и применения сверхпроводящих ускоряющих резонаторов. Такие структуры имеют высокую добротность при высоком значении шунтового сопротивления и позволяют работать с длинами импульсов до миллисекунды. Однако в них сложно размещать демпферы высших типов волн. В связи с этим для вывода энергии паразитных волн обычно используется канал для пролета пучка.

Для линейных ускорителей электронов общепринятой ускоряющей структурой является круглый диафрагмированный волновод (КДВ), работающий на TM_{01} -типе волны. Он представляет собой цилиндрический волновод с установленными в нем диафрагмами с отверстиями для пролета пучка и электромагнитной связи между отдельными ячейками, образуемыми двумя диафрагмами и цилиндрической поверхностью волновода. КДВ обладает достаточно высоким шунтовым сопротивлением, технологичностью изготовления.

КДВ является периодической структурой и характеризуется набегом фазы на ячейку на рабочей частоте, которая называется видом колебаний. Шунтовое сопротивление КДВ существенно зависит от вида колебаний и имеет пологий максимум вблизи видов колебаний $\pi/2$ и $2\pi/3$. Для ослабления эффекта обрыва импульса тока, а также уменьшения числа диафрагм на единицу длины предпочтительно часто отдается виду колебаний $2\pi/3$. Еще более экономичными в изготовлении являются структуры с видом колебаний от $3\pi/4$ до π , однако на этих видах колебаний настройка секций представляет значительную сложность, а также мала групповая скорость, определяющая увеличенное время заполнения структуры ВЧ мощностью. (Указанные сложности являются серьезными препятствиями при применении структур с большим фазовым сдвигом на ячейку.)

Принято различать КДВ с постоянным импедансом и постоянным градиентом ускоряющего поля. В первом случае геометрия ускоряющих ячеек является постоянной вдоль секции, во втором – размер отверстия в диафрагме уменьшается от ячейки к ячейке, что обеспечивает постоянную величину ускоряющего поля по длине структуры. Следует отметить, что секции с постоянным градиентом менее подвержены развитию обрыва импульса тока, так как переменная геометрия ячеек приводит к разбросу частот возбуждения в них первой дипольной моды и затруднению генерации этих паразитных полей, вызывающих смещение пучка от оси.

Для структур, используемых в коллайдерах, важнейшее значение имеет повышение их погонного шунтового сопротивления. Этого можно достичь, уменьшая ВЧ потери в стенках путем скругления внутренней поверхности ячеек. В результате погонное шунтовое сопротивление возрастает на 10 – 12%. Его дальнейшее повышение обеспечивается утолщением диафрагм вблизи пролетного отверстия, это позволяет увеличить шунтовое сопротивление примерно на 30%. Для увеличения групповой скорости в секции предусматриваются дополнительные элементы связи по магнитному полю в виде узких щелей в диафрагмах. При этом дисперсия структуры на основной волне становится отрицательной, что ведет к переконфигурации системы ВЧ питания по сравнению с системой питания КДВ. Указанные методы обеспечивают повышение шунтового сопротивления структур, но существенно усложняют их изготовление и настройку. В создаваемых линейных коллайдерах, предназначенных для работы в режиме бегущей волны (NLC, CLIC и др.), ячейки в секциях обычно имеют цилиндрическую форму. Вносимые конструктивные изменения (скругление места соединения диафрагмы с обечайкой, форма и размеры утолщения диафрагмы у отверстия связи и др.) направлены на подавление ВВТ, приводящих к развитию неустойчивостей динамики пучка в протяженном ускорителе.

Применение КДВ в режиме стоячей волны не эффективно, так как только на видах колебаний 0 и π шунтовое сопротивление структуры равно произведению шунтового сопротивления одной ячейки на число ячеек. На других видах колебаний шунтовое сопротивление вдвое меньше. Существенного повышения шунтового сопротивления можно добиться, применяя бипериодическую уско-

ряющую структуру (БУС). Такая структура состоит из ячеек двух типов – ускоряющих и связи. Ускоряющие ячейки имеют оптимизированную Ω -образную форму, обеспечивающую максимальное поле на оси структуры, ячейки связи имеют небольшой продольный размер. Сдвиг фазы на ячейку составляет $\pi/2$, сдвиг фазы между соседними ускоряющими ячейками равен π . Это позволяет совместить хорошее разделение с соседними видами колебаний, свойственное виду колебаний $\pi/2$, с максимальной эффективностью взаимодействия частиц с полем, характерной для вида колебаний π . Конструкция БУС сложнее КДВ, что является препятствием для ее применения в коллайдерах.

Существенной проблемой работы ускорителя на π -виде колебаний является равенство нулю групповой скорости и поэтому малое частотное разделение этого вида с соседними, что существенно усложняет возбуждение структуры, увеличивает требования к точности ее изготовления и настройки. Частотный интервал между видами колебаний определяется коэффициентом связи между ячейками и числом ячеек в секции. Для получения достаточного интервала, отделяющего частоту π -вида от соседних, число ячеек в секции должно быть невелико (не более 10), а добротность ячеек – максимально большой. Кроме того, возбуждающий генератор должен обладать высокой стабильностью частоты для сохранения генерации на рабочем виде на протяжении всего импульса. Выполнение всех указанных требований возможно в секции, работающей в сверхпроводящем режиме. Применение сверхпроводящих секций в линейном электрон-позитронном коллайдере рассматривается в установке TESLA. Ускоряющая секция состоит из 9 ячеек, каждая из них имеет оптимизированную форму со скругленными на периферии краями, электромагнитная связь между ячейками как на основном, так и ВВТ осуществляется через отверстия для пролета пучка.

Резонансная структура, работающая в режиме бегущей либо стоячей волны, может возбуждаться не только на нижнем типе волны, но также на других типах волн (модах). Это могут быть аксиально-симметричные типы волны TM_{0n} , обладающие n вариациями по радиусу, либо аксиально-несимметричные волны TM_{mn} , где m – число вариаций по азимуту, n – число вариаций по радиусу.

При $m=1$ волна имеет одну вариацию по азимуту и называется дипольной, при $m=2$ квадрупольной. Волны такого типа на оси структуры имеют нулевое электрическое поле, с удалением от оси продольное электрическое поле возрастает, это обуславливает смещение пучка от оси под действием мультипольных мод. Обычно к наибольшему смещению пучка приводит волна дипольного типа.

В периодических структурах, состоящих из цепочки ячеек, поля ВВТ, возбуждаемые в отдельных ячейках, могут оказывать при определенных условиях когерентное воздействие на пучок, приводящее к его неустойчивости. Исследование этих эффектов может осуществляться с использованием дисперсионных характеристик, соответствующих полосам пропускания структуры на ВВТ.

2.2. Количественные характеристики электромагнитных полей, возбуждаемых пучком

Пучок частиц, двигающийся в вакуумной камере, всегда имеет флуктуации плотности. При этом частицы будут взаимодействовать с ускоряющей структурой, являющейся частью вакуумной камеры, генерируя электромагнитные поля. Такие поля называют наведенными, или кильватерными (wake fields), так как они распространяются позади возбуждающих их частиц. Наиболее удачным представляется термин «наведенное поле», он будет использоваться при дальнейшем изложении. В спектре поля всегда присутствует гармоника, распространяющаяся в синхронизме с возмущением и при отсутствии затухания увеличивающая возмущение плотности. Это может приводить к существенным потерям энергии пучка и развитию неустойчивости. Для количественного описания эффектов, обусловленных взаимодействием пучка с камерой, вводится функция, характеризующая наведенное поле (wake function). В простейшем случае двух точечных зарядов q_1 и q_2 , двигающихся по оси камеры на расстоянии Δl друг за другом, эта функция равна нормированным на заряд q_2 потерям энергии второй частицы в поле, наведенном первой частицей:

$$W_e(\tau) = -\frac{1}{q_1 q_2} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{F}(r, z, t) d\vec{z} = -\frac{1}{q_2} \int_0^{\Delta z} E_z [z = \beta c(t - \tau), t] dz. \quad (2.1)$$

Здесь $\vec{F}(r, z, t)$ – сила, действующая на заряд q_2 , E_z – продольное электрическое поле, βc – скорость частиц, $\tau = \Delta l / \beta c$. В дальнейшем будем полагать $q_1 = q_2 = q$.

Наряду с функцией потерь в литературе используется другая количественная характеристика потерь энергии частицей – коэффициент потерь энергии k (loss factor). Он определяет потери энергии частицы, отнесенные к ее заряду q , и количественно совпадает с потенциалом потерь, определяемым выражением (2.1), когда поле возбуждается самой частицей:

$$k = -\frac{1}{q^2} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{F}(r, z, t) d\vec{z} = -\frac{1}{q} \int_0^{\Delta z} E_z[z = \beta c t, t] dz . \quad (2.2)$$

Применяя к выражению (2.1) преобразование Фурье по переменной τ , получим продольный импеданс связи:

$$F_{\tau}[W_e(\tau)] = -\frac{1}{2\pi q} \int_0^{\Delta z} dz \int_{-\infty}^{\infty} E_z[z = \beta c(t - \tau), t] e^{j\omega\tau} d\tau = Z_{cb}(\omega) . \quad (2.3)$$

Из частотного спектра электрического поля, наведенного первым зарядом в сечении $z=0$, получим:

$$Z_{cb}(\omega) = -\frac{1}{q} \int_0^{\Delta z} \tilde{E}_z(\omega) e^{jk_0 z / \beta} dz = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} . \quad (2.4)$$

Здесь $k_0 = \omega/c$ и $\tilde{E}_z(\omega)$ – спектр поля в точке $z=0$. Так как рассмотрение делается для точечного заряда, $I_z(t) = +q\beta c \delta(-\beta ct)$ и полный спектр тока $I(\omega) = q$. Уравнение (2.4) устанавливает связь между гармоникой потенциала $V(\omega)$, наведенной на расстоянии Δz , и током $I(\omega)$. В случае однородной камеры конфигурация поля не изменяется вдоль продольной оси, и отстающая частица движется в постоянном поле. Можно ввести продольный градиент потенциала потерь и погонное продольное сопротивление связи:

$$\frac{dW(\tau)}{dz} = -\frac{E_z(-\beta c\tau)}{q}, \quad Z(\omega) = -\frac{\tilde{E}_z(\omega)}{\beta c q} . \quad (2.5)$$

Функция потерь определяется как действительная функция времени и она записывается с помощью обратного преобразования Фурье ее спектра, т. е. импеданса:

$$W(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} [Z_R(\omega)\cos\omega\tau + Z_I(\omega)\sin\omega\tau]d\omega - \\ - j \int_{-\infty}^{\infty} [Z_R(\omega)\sin\omega\tau - Z_I(\omega)\cos\omega\tau]d\omega \quad (2.6)$$

Мнимая часть в выражении (2.6) равна нулю, поэтому действительная часть импеданса $Z_R(\omega)$ – четная функция частоты, а мнимая часть $Z_I(\omega)$ – нечетная функция. Из формулы (2.6), получим:

$$W(\tau) = 2 \int_0^{\infty} [Z_R(\omega)\cos\omega\tau + Z_I(\omega)\sin\omega\tau]d\omega \quad (2.7)$$

Для ультрарелятивистских частиц $\gamma \rightarrow \infty$ функция потерь отлична от нуля только позади частицы, т. е. при $\tau < 0$:

$$W(-\tau) = 2 \int_0^{\infty} [Z_R(\omega)\cos\omega\tau - Z_I(\omega)\sin\omega\tau]d\omega = 0 \quad (2.8)$$

Соотношение (2.7) можно записать в виде:

$$W(\tau) = 4 \int_0^{\infty} Z_R(\omega)\cos\omega\tau d\omega \quad (2.9)$$

Для $\tau \rightarrow 0$ формула (2.9) дает результат, вдвое превышающий величину функции потерь в выражении (2.6) при $\tau = 0$. Собственная функция потерь составляет половину предела, к которому стремится величина $W(\tau)$ при $\tau \rightarrow 0$. Это свойство называют "фундаментальной теоремой нагрузки пучком", и оно является следствием принципа причинности.

Значительный интерес для практики представляет расчет функции потерь в резонансных неоднородностях, которыми являются ускоряющие секции и различные полости. Эквивалентная схема резонатора на каком-либо типе волны вблизи резонансной частоты может быть представлена как параллельное соединение сопротивления (эффективного) $R_{ш.эфф}$, емкости C и индуктивности L . При

этом резонансная частота ω_0 и полное сопротивление Z рассчитываются с помощью соотношений:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad Z(\omega) = \frac{R_{\text{ш.эфф}}}{1 + jQ_{\text{н}}(\omega_0/\omega - \omega/\omega_0)}. \quad (2.10)$$

Здесь $Q_{\text{н}}$ – нагруженная добротность резонатора.

Эффективное шунтовое сопротивление записывается в виде:

$$R_{\text{ш.эфф}} = R_{\text{ш}} T^2 = \frac{\left| \int_0^g E_z e^{j\beta k_z z} dz \right|^2}{P_{\text{пот}}}, \quad (2.11)$$

где g – длина ускоряющих промежутков, k_z – волновое число, $P_{\text{пот}}$ – потери мощности в секции, T – пролетный фактор. Часто используется также понятие погонного шунтового сопротивления на длине секции $L_{\text{сек}}$:

$$r_{\text{ш}} = R_{\text{ш}} T^2 / L_{\text{сек}}. \quad (2.12)$$

При прохождении резонатора частица наводит в нем электромагнитные поля на резонансных частотах различных типов волн. Существенное влияние на величину потерь энергии оказывают каналы для пролета пучка (ионопроводы), присоединенные к резонансной полости. На частотах выше частоты отсечки ионопроводов энергия, излучаемая пучком, распространяется по ионопроводам в обе стороны от резонатора. При этом зависимость сопротивления резонатора от частоты, состоявшая из отдельных резонансных пиков на частотах видов колебаний, становится непрерывной кривой.

Функцию потерь получим, делая фурье-преобразование выражения для сопротивления резонатора (1.10). С учетом того, что $Q_{\text{н}} \gg 1$, соотношение будет иметь вид:

$$W(\tau) \cong \frac{\omega_0 R_{\text{ш.эфф}}}{2Q_{\text{н}}} e^{-\omega_0 \tau / 2Q_{\text{н}}} \left[\cos \omega_0 \tau - \frac{1}{2Q_{\text{н}}} \sin \omega \tau \right] \cong \frac{\omega_0 R_{\text{ш.эфф}}}{2Q_{\text{н}}} \cos \omega_0 \tau. \quad (2.13)$$

Функции потерь на резонансной частоте соответствует сопротивление:

$$Z(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\tau) e^{j\omega\tau} d\tau = \frac{\omega_0 R_{ш.эфф}}{4Q_H} \delta(\omega - \omega_0). \quad (2.14)$$

Полные потери энергии на этом сопротивлении для точечного заряда $q = |I_0(\omega)|$ определяются:

$$U = \int_{-\infty}^{\infty} |I_0(\omega)|^2 d\omega Z(\omega) d\omega = q^2 \frac{\omega_0 R_{ш.эфф}}{4Q_H}. \quad (2.15)$$

Выражения для коэффициента и функции потерь энергии записываются:

$$k = \frac{U}{q^2} = \frac{\omega_0 R_{ш.эфф}}{4Q_H}, \quad W(\tau) = 2k \cos \omega_0 \tau. \quad (2.16)$$

Проводя суммирование по всем n видам колебаний, возбуждаемым в резонаторе, получим полную функцию потерь $\bar{W}(\tau)$:

$$\bar{W}(\tau) = 2 \sum_n k_n \cos \omega_{0n} \tau. \quad (2.17)$$

Для частиц,двигающихся не по оси канала, вводятся количественные характеристики, описывающие действие электромагнитных полей на них. Основное влияние на частицы оказывают аксиально-несимметричные поля. В этом случае говорят о мультипольных потенциалах, возбуждаемых пучком, среди них низшим является дипольный потенциал. Функция потерь определяется интегрированием продольного электрического поля, возбуждаемого предшествующей частицей вдоль траектории второй частицы. Обе траектории могут лежать в разных плоскостях по отношению к оси структуры. Полная функция потерь представляет собой суперпозицию мультипольных функций, каждая из которых может быть рассчитана с помощью выражения (2.1).

Частица,двигающаяся за возбуждающей поле предшествующей частицей, помимо потерь энергии может смещаться в поперечном направлении под действием дефокусирующих компонентов поля. По аналогии с продольной функцией потерь (2.1) вводится поперечная функция потерь:

$$W_{\perp}(\tau) = -\frac{1}{q_1 q_2} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{F}_{\perp}(r, z, t) d\vec{z} = -\frac{1}{q_2} \int_0^{\Delta z} (\bar{E} + \vec{V} \times \bar{B}) d\vec{z}. \quad (2.18)$$

Здесь \vec{F}_\perp – поперечный компонент силы Лоренца, \vec{V} – скорость частицы, \vec{E}, \vec{B} – электрическое и магнитное поля вдоль траектории частицы.

Поперечный коэффициент потерь:

$$k_\perp = -\frac{1}{q^2} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{F}_\perp(r, z, t) d\vec{z} = -\frac{1}{q} \int_0^{\Delta z} (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) d\vec{z}. \quad (2.19)$$

Применяя к равенству (2.17) преобразование Фурье, получим поперечное сопротивление связи:

$$Z'_{\text{св}\perp}(\omega) = \frac{1}{r} \int_{-\infty}^{\infty} W_\perp e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (2.20)$$

Для количественной характеристики смещения частиц в поперечном направлении используется также понятие погонного поперечного шунтового сопротивления:

$$r_{\text{ш}\perp} = \frac{R_{\text{ш}\perp} T^2}{L_{\text{сек}}} = \frac{\left| \int_0^g \frac{1}{k_z} \frac{\partial E_z}{\partial r} e^{jk_z z} dz \right|^2}{P_{\text{пот}} L_{\text{сек}}}, \quad (2.21)$$

где $R_{\text{ш}\perp}$ – полное поперечное шунтовое сопротивление секции. $L_{\text{сек}}$ – длина ускоряющей секции.

Выражение, связывающее продольную и поперечную функции потерь, называется теоремой Панофского – Вентцеля и может быть получено, если рассмотреть их покомпонентные записи по координатам. Это дает следующее соотношение:

$$-\frac{1}{V} \frac{\partial}{\partial \tau} W_\perp(\tau) = \nabla_\perp W(\tau), \quad (2.22)$$

где ∇_\perp – поперечные компоненты градиента функции.

Выражение для продольного и поперечного сопротивлений связи имеет вид:

$$Z_{\text{св}\perp}(\omega) = \frac{1}{k_z} \nabla_\perp Z_{\text{св}}(\omega). \quad (2.23)$$

Аналогичная связь существует между продольным и поперечным шунтовыми сопротивлениями, как это видно из их определенных (2.11), (2.21).

Глава 3

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР

Разработка методов подавления нежелательных полей в ускоряющих структурах базируется на результатах исследования зависимостей резонансных частот и добротностей от геометрии ускоряющих ячеек, величины поперечного шунтового сопротивления структур на различных ВВТ. Ниже приводятся описания основных расчетных и экспериментальных методов исследования электродинамических структур, разработанные в ускорительных центрах мира, рассматриваются достоинства и недостатки обсуждаемых методов, указываются диапазоны их применимости и погрешности получаемых результатов.

3.1. Расчетные методы

В настоящее время в ускорительных центрах интенсивно ведутся расчетно-теоретические работы, направленные на создание математических методов и программного обеспечения для расчета электродинамических характеристик ускоряющих структур и элементов канала транспортировки пучка. Создаваемые пакеты прикладных программ отличаются большим разнообразием алгоритмов решения задачи и исследуемых объектов. Остановимся на некоторых из них, являющихся наиболее характерными.

Для расчета симметричных и несимметричных полей в аксиально-симметричных резонаторах создано несколько пакетов программ, реализующих разработанные аналитические методы. К ним относятся отечественные пакеты, такие как PARUS – 1M, PRUD – 0, а также зарубежные SUPERFISH, URMEL. Программа PRUD – 0, предназначенная для расчета характеристик периодических осесимметричных структур, разработана в ИФВЭ и используется при численном моделировании неоднородных элементов вакуумной камеры УНК. К сожалению, расчетная модель определяет характеристики лишь замкнутых резонирующих объемов, что позволяет

получать достоверные результаты на частотах, не превышающих частоту отсечки входного и выходного патрубков. Пакет программ PARUS – 1M, использующий метод сеток, не имеет ограничений на максимальную частоту и может применяться для расчетов резонаторов с патрубками, если выбрать расстояние между резонаторами достаточно большим.

Программный пакет SUPERFISH обеспечивает расчет электродинамических характеристик азимутально-симметричных типов волн в осесимметричных резонаторах. В программе использован метод конечных элементов на нерегулярной триангулярной сетке, что позволило с высокой точностью аппроксимировать границу области. Собственные значения определяются по нулю функции невязки при решении краевой задачи с кольцевым возбуждающим магнитным током в одном из узлов сетки. Относительная погрешность расчета резонансных частот лежит в пределах $10^{-3} - 10^{-2}$. К недостаткам программы следует отнести необходимость корректного выбора узла с кольцевым возбуждающим током, причем этот выбор зависит как от конфигурации резонатора, так и от распределения компонентов поля искомого типа волны.

Программа URMEL предназначена для расчета азимутально-неоднородных типов колебаний в осесимметричных резонаторах и разработана на основе метода конечных разностей. Систему линейных алгебраических уравнений, полученную при дискретизации исходных уравнений относительно радиального и аксиального компонентов магнитного поля, решают методом обратных итераций. Относительная погрешность расчета резонансных частот составляет $10^{-4} - 10^{-3}$.

Расчет характеристик резонансных объектов можно выполнить, используя метод решения краевой задачи для уравнений Максвелла во временном представлении. При решении задачи о возбуждении сгустком частиц резонатора сложной формы с патрубками удается задать граничные условия на открытой (не металлизированной) границе во входном и выходном патрубках. На таком подходе основаны созданные в CERN программы VCI и ABCI для расчета аксиально-симметричных и несимметричных типов волн. В этих пакетах используется конечно-разностная аппроксимация в двух пространственных измерениях.

Для расчетов характеристик резонансных и нерезонансных устройств разработан пакет HFSS, использующий решения уравнений Максвелла в частотной области, основанный на разбиении объема на тетрагональные ячейки. Программа позволяет рассчитывать основные характеристики объектов, а также дает наглядное представление структуры электромагнитных полей в исследуемых объемах.

В последние годы все более широкое распространение находит пакет прикладных программ MAFIA, обеспечивающий определение аксиально-несимметричных типов волн в устройствах с произвольной границей. Этот пакет является развитием программ UR-MEL, VCI. Возможность применения пакета обеспечивается повышением вычислительных мощностей современных ЭВМ. Для использования пакета на персональных ЭВМ разработана его версия, носящая название MWS.

Сравнение различных расчетных методов, проведенное на тестовой структуре – сферическом резонаторе – показало, что погрешность определения резонансной частоты составляет нескольких десятых процента при расчете программами SUPERFISH, UR-MEL и может достигать процента в расчете программами HFSS, MAFIA. Погрешность расчета добротности, как правило, составляет несколько единиц процента при использовании всех пакетов.

Достаточно удобным и эффективным для расчета характеристик электродинамических структур различного типа является метод эквивалентных схем. Резонансные полости представлены в виде контуров с сосредоточенными параметрами, отрезки волноводов – длинными линиями. Такая замена обеспечивает возможность применения радиотехнических методов расчета, разработанных для цепей с сосредоточенными параметрами. Учет нагрузки током ускоренного пучка осуществляется с помощью введения в эквивалентную схему генератора тока или электронной проводимости. При этом для релятивистского пучка электронная проводимость не зависит от полей, возбужденных в структуре сторонними генераторами. При расчете динамики пучка во время переходного процесса и группировки электронная проводимость зависит от полей в структуре. В связи с этим задача становится самосогласованной и для ее решения необходимо применение машинных методов.

Одновременный учет нескольких типов волн существенно усложняет анализ и делает его результаты не наглядными. В связи с этим эквивалентные схемы колебательных систем обычно строятся на исследуемом типе волны, которым может быть как нижний *TM*-тип, так и высший аксиально-несимметричный.

При применении метода эквивалентных схем резонансная ячейка рассматривается как резонансный контур, возбуждаемый на одной частоте. Колебания в структуре, состоящей из нескольких ячеек, описываются системой линейных уравнений, в которых напряжения (или токи) определяют амплитуды колебаний в ячейках. Эквивалентная схема ускоряющей структуры с коллекторными волноводами, предложенной и исследованной в SLAC, представлена на рис.3.1.

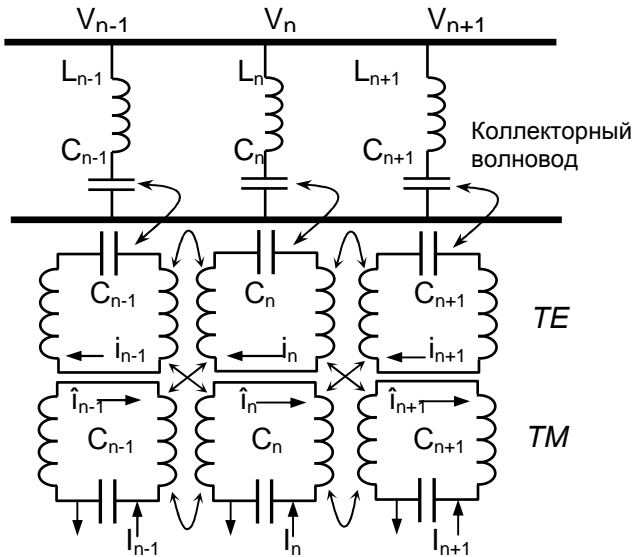


Рис. 3.1. Эквивалентная схема ускоряющей секции с коллекторным волноводом

Структура представляет собой круглый диафрагмированный волновод, в котором каждая ячейка связана со вспомогательными (двумя или четырьмя) коллекторными волноводами для вывода энергии ВВТ. Подробно такая структура будет описана в гл.5. Со-

ответствующие уравнения, описывающие эту структуру, имеют вид:

$$\begin{bmatrix} H - \frac{1}{f^2}I & H_x & 0 \\ H_x^T & \hat{H} - \frac{1}{f^2}I & -G \\ 0 & -G & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ \hat{a} \\ a \end{bmatrix} = \frac{1}{f^2} \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Здесь f – текущая частота, I – единичная матрица. Матрицы H , H_x , G и R – квадратные матрицы размерностью $N \times N$ (N – число ячеек). H и \hat{H} – описывают соответственно дипольные типы волн TE_{110} и TE_{111} , H_x – представляет перекрестную связь TE - и TM -колебаний, R – характеризует моду, распространяющуюся в коллекторном волноводе, G характеризует магнитную связь ячейки с коллекторным волноводом. Векторы a и \hat{a} являются нормированными токами в контурах ($a = i/\sqrt{C_n}$) для TM - и TE -цепей, A – нормированное напряжение в ячейке, b представляет возбуждение ячейки током пучка. Так, граничные условия на поверхности ячейки налагают условие распространения TM - и TE -компонентов в обоих направлениях, пучком возбуждаются поля только TM -типа. Энергия дипольной моды выводится в коллекторный волновод по электрическому компоненту поля через отверстия связи. Коллекторный волновод представлен периодической передающей линией.

Расчет характеристик наведенных полей включает решение уравнения (3.1) в диапазоне частот. Продольный импеданс на дипольных модах получается из суммирования напряжений в ячейках с соответствующей задержкой. Поперечный импеданс получается из продольного с помощью теоремы Панофского – Вентцеля. Мнимая часть преобразования Фурье зависимости импеданса от частоты является спектральной функцией $S(\omega)$. Этой характеристикой удобно пользоваться при анализе ускоряющих структур методом эквивалентных схем.

В ускоряющей структуре каждая ячейка связана с ближайшими соседними ячейками. Поэтому результирующая матрица является разреженной и симметричной в силу электромагнитной взаимно-

сти. Расчет спектральной функции включает решение системы линейных уравнений. На каждом шаге по частоте коэффициенты в матрице изменяются слабо.

Разработанные методы решения протестированы с помощью расчета огибающей функции наведенного поля отдельной ускоряющей структуры. Расчет одного варианта занимает несколько секунд. Примерное время расчета характеристик всей ускоряющей системы коллайдера составляет менее 4 ч, что вполне приемлемо.

3.2. Экспериментальные методы

3.2.1. Метод малых возмущений

Известно значительное число методов измерения ВЧ характеристик устройств, применяемых в приборах СВЧ и ускорителях заряженных частиц. В процессе исследования этих устройств основное внимание уделяется выяснению структуры электромагнитного поля в них, а также количественных характеристик, определяющих эффективность взаимодействия пучка частиц с полем. Измерение величины напряженности электрического поля, коллинеарного с направлением движения частиц, позволяет получить продольное шунтовое сопротивление. Определение изменения амплитуды продольного электрического поля по сечению канала служит основой для расчета поперечного шунтового сопротивления. Эти характеристики позволяют проанализировать продольную и поперечную устойчивость пучка и рассчитать его энергетические потери в неоднородностях камеры, в частности, в ускоряющих секциях. Таким образом, задача исследования элементов сводится к определению и изучению резонансов, соответствующих типам волн с продольным компонентом электрического поля (*TM*-типов).

Пучок возбуждает электромагнитные поля в ускоряющей структуре в широком диапазоне частот, поэтому измерения характеристик устройств должны проводиться в большой полосе частот. Пучок наиболее интенсивно генерирует колебания на частотах от сотен мегагерц до десятков и сотен гигагерц. Нижняя граница определяется резонансной частотой низшего типа колебаний, которым является ускоряющий тип в ускоряющих секциях. В существую-

щих и разрабатываемых циклических ускорителях эта частота составляет несколько сотен мегагерц. Для разрабатываемых линейных коллайдеров частота ускоряющих секций достигает 14 ГГц и даже 30 ГГц, поэтому для установок данного класса верхняя граница частот, на которых необходимо исследование полей, может существенно превышать 30 ГГц и доходить до 700 – 800 ГГц.

Исследования характеристик ускоряющих секций осложняются тем, что большинство из них имеет входной и выходной патрубки достаточно большого сечения для присоединения к ионопроводу. Так, сечение вакуумной камеры циклических ускорителей имеет форму эллипса с размером большей оси 70 – 100 мм. Это приводит к различиям характеристик неоднородностей на частотах ниже и выше критической частоты каналов для пролета пучка. На частотах ниже критической ускоряющая секция представляет собой резонатор с присоединенными к нему запердельными волноводами, оказывающими слабое влияние на характеристики неоднородности. На высоких частотах электромагнитные поля распространяются в обе стороны от ускоряющей структуры по ионопроводу и могут оказывать влияние на динамику пучка. Таким образом, геометрические размеры вакуумной камеры, присоединяемой к секции, обуславливают специфику исследования ее характеристик.

Методы измерения распределения и величины поля в исследуемом объекте различаются способами воздействия на электромагнитное поле и аппаратурной реализацией получаемого отклика. Наибольшее распространение нашел метод малых возмущений в виде двух модификаций – резонансных и нерезонансных возмущений. Процедура измерений состоит в том, что внутрь исследуемого объекта вводится малое диэлектрическое или металлическое тело и исследуется реакция объекта на возмущение полей, которое при этом происходит. В методе резонансных возмущений реакцией является сдвиг резонансной частоты объекта, в методе нерезонансных возмущений – изменение коэффициента отражения от объекта или коэффициента его передачи. Сдвиг резонансной частоты $\Delta f = f_0 - f$ связан с напряженностью электрического (E) и магнитного (H) полей в месте расположения тела соотношением:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{a_1 E^2 + b_1 H^2}{W_3}. \quad (3.2)$$

Здесь W_3 – полная электромагнитная энергия, запасенная в резонаторе, a_1, b_1 – формфакторы тела, зависящие от его формы и материала, f_0 – резонансная частота.

В методе нерезонансных возмущений определяется изменение коэффициента отражения от объекта ΔS_{11} или коэффициента передачи ΔS_{12} . Соотношение, связывающее эти величины с полями в точке расположения тела, имеет вид:

$$\left| \Delta \dot{S}_{ij} \right| = \frac{-a_2 E^2 + b_2 H^2}{P}, \quad (3.3)$$

где P – мощность падающей волны в тракте, a_2, b_2 – формфакторы тела.

При $i=j=1$ выражение (3.3) описывает изменение коэффициента отражения, при $i=1, j=2$ – изменение коэффициента передачи устройства.

Применение той или иной модификации метода зависит от параметров исследуемого элемента – его геометрии, материала стенок, наличия устройств связи с другими объектами.

При исследовании структуры на частотах ниже критической частоты подключенных ионопроводов предпочтительным является метод резонансных возмущений. В этом диапазоне исследуемый объект представляет собой объемный резонатор, связь которого с другими элементами через ионопровод мала. На частотах выше критической часть энергии распространяется от объекта по ионопроводу в обе стороны, рассеиваясь в его стенках. При значительной длине отрезков ионопровода, соединяющих неоднородности камеры, взаимная связь между ними может полностью отсутствовать из-за большого затухания энергии в стенках ионопровода и наличия специальных демпфирующих устройств. Вследствие этого для возбуждения в исследуемом объекте электромагнитных полей, совпадающих по структуре с полями в реальном устройстве, необходимо обеспечить хорошее согласование подводящих волноводов в полосе частот.

Повышение точности и ускорение процедуры измерений достигается в автоматизированных комплексах типа ШИПР и ПИРС. В первом комплексе реализуется метод малых резонансных возмущений. Исследуемый объект является элементом канала обратной связи, охватывающего вход и выход усилителя мощности. В системе обеспечивается генерация на рабочей частоте. Изменение частоты генерации при перемещении возмущающего тела внутри объекта дает информацию о величине поля в месте расположения тела. В комплексе ПИРС реализуется метод малых нерезонансных возмущений. Возбуждение исследуемого объекта осуществляется от высокостабильного генератора, регистрация коэффициента отражения – с помощью амплитудо-фазометра. Недостатком указанных автоматизированных комплексов является ограниченный диапазон рабочих частот, не позволяющий производить измерения характеристик устройств во всем интересующем диапазоне частот. Широкополосные измерительные комплексы, выпускаемые фирмой Hewlett Packard, обладают хорошими характеристиками, но имеют высокую стоимость. Устройства входа и выхода комплекса являются коаксиальными, поэтому для проведения измерений необходимо применение переходных элементов со стандартных коаксиальных устройств на конкретные конструктивные размеры исследуемого устройства. Переходные устройства должны обладать достаточной широкополосностью для обеспечения необходимой точности измерений. На рис. 3.2 представлена схема измерительного комплекса на базе широкополосного измерителя параметров многополюсников. Исследуемым устройством является ускоряющая секция. В каналах для пролета пучка устанавливаются поглощающие нагрузки либо подвижные короткозамыкающие поршни в зависимости от применяемой методики измерений. Перемещение возмущающего тела осуществляется с помощью шагового двигателя.

Следует отметить, что для измерения поля возможно применять тела различной формы и изготовленных из различных материалов. Тела из диэлектрических материалов обеспечивают измерение электрических составляющих поля и не возмущают магнитные компоненты поля. Для измерения продольной составляющей электрического поля возмущающее тело должно иметь форму эллипсоида вращения (или цилиндра), большая ось которого направлена вдоль исследуемого компонента поля, являющегося обычно про-

дольным. Если в месте измерения отсутствует магнитное поле для измерений можно применять металлическое тело, вносящее большее возмущение по сравнению с диэлектрическим.

Основной причиной систематической погрешности метода малых возмущений является неточность выполнения условия малости возмущающего тела. Критериями малости тела являются величина воздействия тела на компоненты поля, которые не подлежат измерению, и степень усреднения поля по занимаемому полем объему.

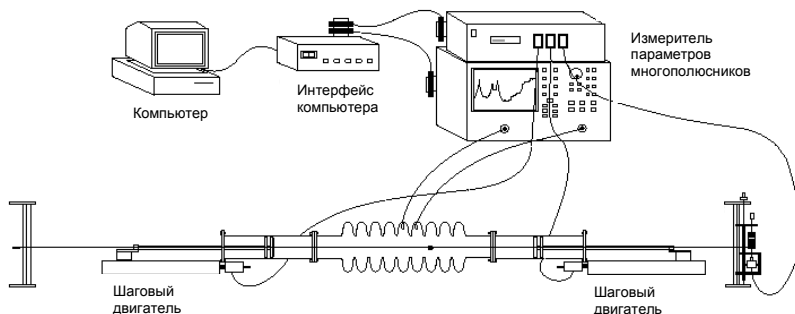


Рис. 3.2. Схема измерительной установки

Анализ погрешностей измерения напряженности поля с учетом систематических погрешностей показывает, что она составляет около 10%. В ошибку определения продольного шунтового сопротивления входит неточность вычисления интеграла поля вдоль оси, составляющая 3%. Общая погрешность измерения шунтового сопротивления обычно не превышает 12 – 14%.

3.2.2. Метод модельных измерений ВЧ характеристик устройств

В последние годы находит развитие и применение метод модельных измерений характеристик устройств с помощью исследования их переходных характеристик при передаче через исследуемую структуру видеоимпульсов с коротким фронтом.

Преимущество метода модельных измерений с коаксиальным проводником заключается в том, что он не требует использования ускоренного пучка при исследовании наведенных полей. В методе прохождение ускоренного пучка через структуру моделируется видеоимпульсом или СВЧ сигналом, передаваемым по проводнику, установленному на оси структуры либо параллельно ей на некотором расстоянии от оси. СВЧ сигнал возбуждает широкий спектр колебаний высших типов. Измерения искажений импульса на выходе структуры во временной области либо определение коэффициента передачи S_{21} в частотной области позволяют получить импеданс структуры на высших типах волн. Интегрируя импеданс по всем типам волн, можно получить коэффициент потерь энергии пучка.

Такие эксперименты неоднократно проводились для определения импеданса ускоряющих структур и других компонентов ускорителей. При установке проводника на оси структуры определялись продольные сопротивления структуры, при установке двух проводников симметрично относительно оси структуры на некотором расстоянии от ее оси осуществляются измерения поперечного сопротивления структуры. В качестве примера рассмотрим измерительную установку для исследования характеристик ускоряющей секции для NLC (рис.3.3).

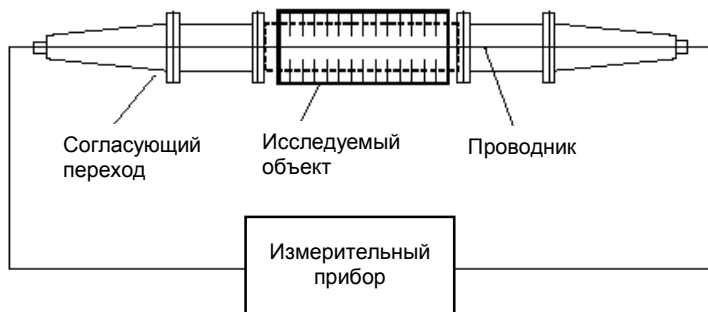


Рис. 3.3. Схема измерительной установки

Измерения проводились в частотной области. Определялись коэффициенты потерь энергии пучка на ряде дипольных мод, дающих наибольший вклад в наведенное поле. Эти измерения можно

проводить, применяя один либо два проводника, смещенных от оси. В измерительной установке использовался один проводник. С помощью измерителя параметров четырехполосников определяется коэффициент передачи S_{21} исследуемого устройства. Обеспечено тщательное согласование переходных элементов для уменьшения искажения и потерь сигналов.

Для упрощения подключения проводника выбран коаксиально-волноводный переход (рис.3.4). Такие переходы характеризуются широкой полосой пропускания, позволяющей проводить измерения в одной либо двух полосах пропускания исследуемой структуры. Первый адаптер является стандартным, второй – изготовлен применительно к геометрическим размерам коаксиальных передающих линий, подключаемых к исследуемой секции. Диаметр проводника выбран равным 0,25 мм. Для проводников меньшего диаметра возрастают потери в коаксиальном тракте, при большем диаметре возрастают искажения полей в исследуемой структуре. Адаптер, использованный для измерений характеристик на нижней дипольной моде, обладал полосой пропускания от 11 до 18 ГГц. Коэффициент отражения в этой полосе не хуже 0,001. Проводник может перемещаться в поперечном направлении с помощью небольшого изгиба согласующих секций. При этом в установке отсутствуют ВЧ неоднородности.

Измерения проводят в два этапа: с исследуемым объектом и в устройстве, состоящем только из узлов согласования. По результатам измерений рассчитываются коэффициенты потерь энергии пучка на основной и высших модах.

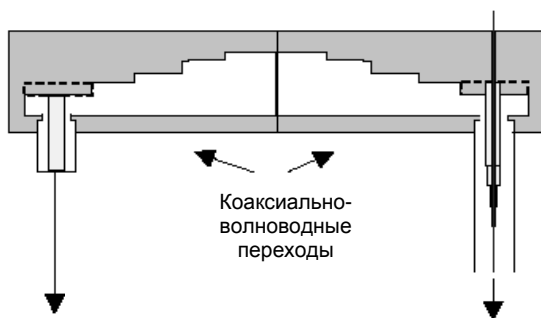


Рис.3.4. Коаксиально-волноводные переходы для подключения исследуемого объекта и измерительного прибора

Для определения возмущений, вносимых проводником, проведен электродинамический расчет характеристик структуры. Получены поля в структуре на нескольких резонансных модах. В качестве тестовой рассмотрена структура с коллекторными волноводами, содержащая 203 ячейки. Расчеты выполнены для одной из конечных ячеек этой структуры, представленной в виде периодической системы с ячейками цилиндрической формы. Расчет характеристик ячейки без проводника (рис.3.5,а) проводился для ее четверти: магнитная стенка в обеих плоскостях симметрии относительно продольной оси, электрическая стенка в одной плоскости симметрии и магнитная – в другой. Стенки считались идеально проводящими. Ячейка, содержащая проводник, не обладает симметрией относительно продольной оси, поэтому моделировалась половина ячейки с магнитной стенкой в плоскости симметрии (рис.3.5,б).

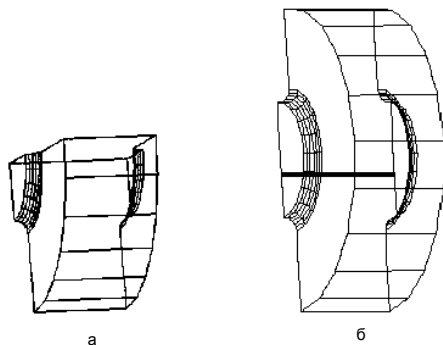


Рис. 3.5. Ячейка структуры: а – без проводника, б – с проводником, смещенным от оси

На рис.3.6 представлена дисперсионная диаграмма, полученная для 198-й ячейки структуры. Пунктирные линии показывают полосы пропускания и типы волн в невозмущенной структуре. Сплошные линии – дисперсионные диаграммы для ячейки, в которую введен идеально проводящий стержень диаметром 250 мк, смещенный от оси структуры на 1 мм параллельно ей. Рассчитаны характеристики на трех дипольных модах. На диаграмме показаны также синхронные моды для обоих расчетных вариантов.

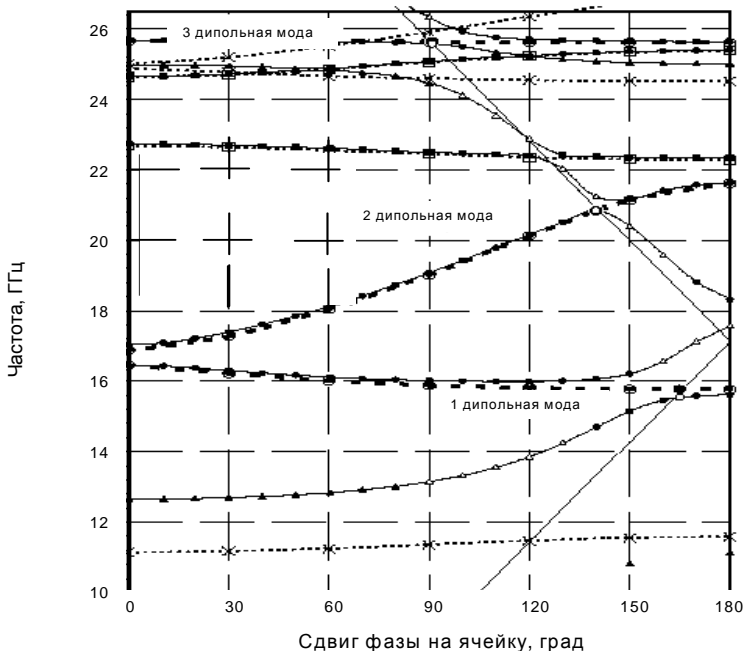


Рис. 3.6. Дисперсионная диаграмма секции: штриховые линии – секция без проводника, сплошные линии – секция с проводником, смещенным на 1 мм от оси

Коэффициент потерь энергии пучка в ячейке обычно получают, интегрируя продольное электрическое поле на оси структуры. Для дипольных мод поле имеет электрическую составляющую, которая пропорциональна радиальной координате r и измеряется по отношению к положению проводника, так же, как и в случае отсутствия проводника, а также составляющую, пропорциональную $1/r$. Вторая составляющая поля доминирует при малых смещениях проводника и становится пренебрежимо малой при больших смещениях проводника. Это дает возможность определить коэффициент потерь энергии пучка на высших модах, соответствующий отсутствию проводника, нормированием коэффициента потерь энергии на траектории, смещенной относительно оси структуры:

$$k_{\perp} = \frac{c}{\omega (x - x_{\text{пр}})^2 l_{\text{яч}}} k_{\parallel}. \quad (3.4)$$

Здесь c – скорость света, ω – круговая частота моды, $l_{\text{яч}}$ – длина ячейки, x – смещение от оси траектории, вдоль которой проводится интегрирование, $x_{\text{пр}}$ – смещение проводника от оси, k_{\parallel} – коэффициент потерь энергии, рассчитанный вдоль траектории, отстоящей от оси на расстояние x .

На рис.3.7 представлена зависимость коэффициента потерь энергии пучка на первой дипольной моде при $x_{\text{пр}}=1\text{мм}$ от расстояния пути интегрирования до проводника. На этом же рисунке приведен коэффициент потерь энергии пучка, рассчитанный для случая отсутствия проводника. Видно, что при больших расстояниях пути интегрирования коэффициент потерь энергии постоянен. Асимметрия k_{\perp} при положительном и отрицательном смещении пути интегрирования обусловлена асимметрией поля.

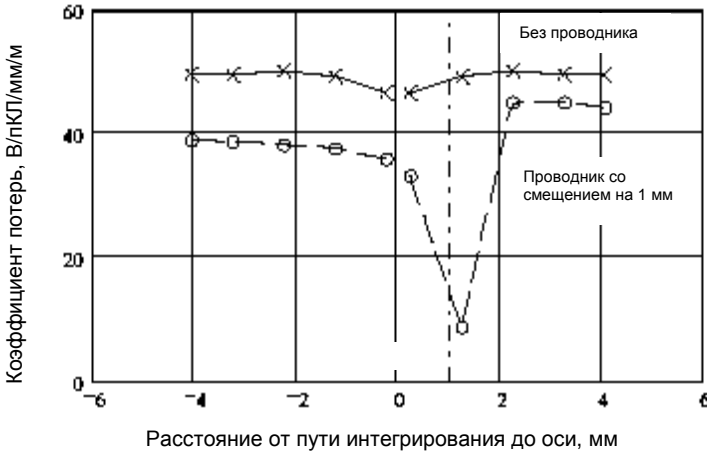


Рис. 3.7. Зависимость коэффициента потерь энергии на высших модах от поперечной координаты, (измерено с проводником диаметром 250 мк, смещенным на 1 мм от оси)

Изменение коэффициента потерь энергии пучка в дипольном поле при перемещении проводника иллюстрируется на рис.3.8. При приближении к оси структуры k_{\perp} становится равным соответствующему коэффициенту для структуры без возмущения (на рис.3.8 это горизонтальная линия).

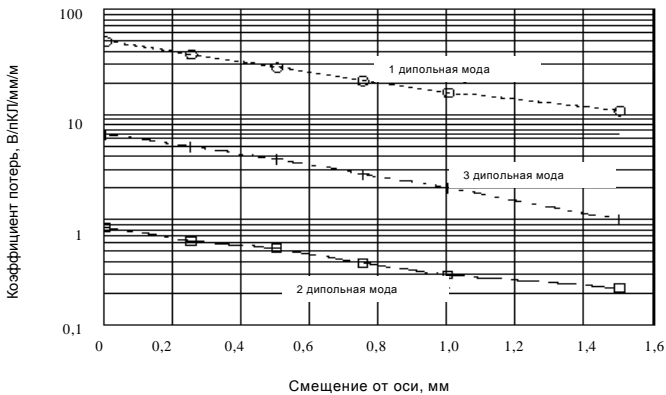


Рис.3.8. Зависимости коэффициента потерь энергии от смещения от оси для трех первых дипольных мод, (измерено с проводником в секции диаметром 250 мк)

Дипольные поля не возмущаются при расположении проводника на оси структуры. Определение частот дипольных мод и соответствующих коэффициентов потерь энергии можно осуществить, проводя измерения при нескольких положениях проводника в структуре и экстраполируя результаты измерений на нулевое смещение проводника от оси структуры.

3.2.3. Метод прямых измерений полей высших типов, возбуждаемых пучком

Метод непосредственных измерений потерь энергии и смещения пучка под воздействием полей ВВТ заключается в возбуждении исследуемой структуры коротким одиночным сгустком и в определении наведенных им полей по смещению и потерям энергии второго сгустка, проходящего через структуру непосредственно после первого. Данный метод исследований требует прецизионной диагностической аппаратуры. К такой категории измерительных комплексов относится установка ASSET (Accelerating Structure SET), созданная в SLAC и предназначенная для тестирования структур коллайдеров. В установке предусмотрена возможность применения двух сгустков – источника поля (drive charge) и тестового (witness charge). Первый сгусток является позитронным, вто-

рой – электронным. Энергия каждого сгустка 1,2 ГэВ, заряд около 3 нКл. Эти сгустки поочередно с небольшим интервалом времени между ними (несколько наносекунд) вводятся в исследуемую структуру. После прохождения структуры генерирующий сгусток отводится в поглотитель, тестовый – поступает в измерительную схему. По изменению траектории движения тестового сгустка можно получить информацию о величинах дипольных полей, которые оказали воздействие на него в исследуемой секции. Структурная схема установки приведена на рис.3.9. В качестве примера была рассмотрена структура, работающая на частоте 11,424 ГГц на виде колебаний $2\pi/3$. Эта структура предназначена для NLC.

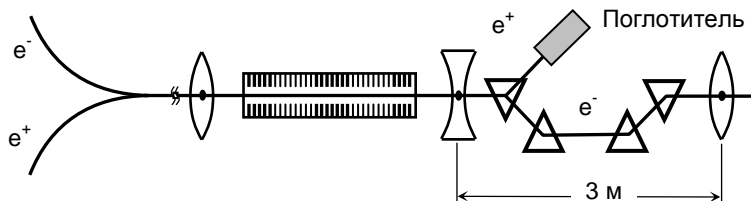


Рис. 3.9. Схема установки ASSET

Коллекторные волноводы позволяют получить сигналы от дипольных типов волн, возбуждаемых в структуре. Выведенные сигналы обрабатываются в установке, схема которой представлена на рис.3.10.

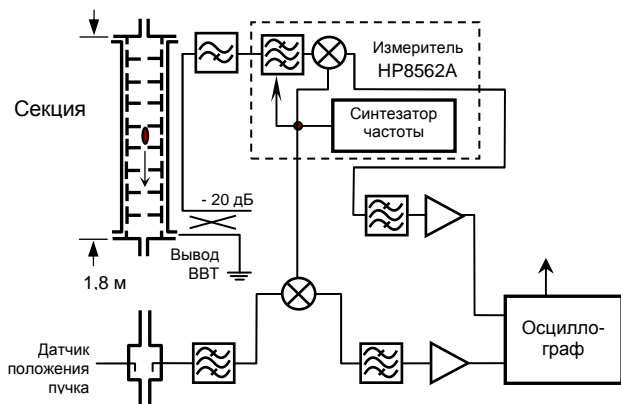


Рис. 3.10. Схема установки для исследования сигналов из коллекторных волноводов ускоряющей структуры

Установка обеспечивает возможность измерения зависимости генерируемой пучком мощности от частоты, либо определения зависимости амплитуды и фазы генерируемых полей от частоты. Во втором случае широкополосный сигнал с датчика положения пучка используется для получения опорной фазы. Измерение отклонения информационного пучка в установке ASSET дает уникальную возможность центрирования пучка по сигналам дипольных полей и подтверждает возможность достижения высокой точности центрирования секций с помощью измеренных дипольных полей.

Глава 4

МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ТИПОВ ВОЛН НА УСКОРЕННЫЙ ПУЧОК

Достижение эффективного подавления ВВТ в ускоряющих структурах является одной из важнейших задач, решаемых при разработке ускоряющих структур коллайдеров. Решение этой задачи осуществляется двумя основными способами – расстройкой параметров структур, затрудняющей возбуждение паразитных полей, и поглощением энергии этих полей в специальных демпферах. В главе рассмотрены общие подходы к методам подавления высших типов волн, реализующие указанные основные способы.

4.1. Характеристики дипольных полей

Для того чтобы избежать ухудшения эмиттанса, обусловленного короткодействующими и дальнедействующими полями ВВТ, заряд сгустка должен быть ограничен. Необходимо также обеспечивать повышение эффективности передачи мощности генератора в пучок: $\eta_{ВЧ} = qV / t_{сг} P_{вч}$ и эффективности использования импульса ВЧ мощности: $\eta_{зап} = m_{сг} t_{сг} / (\tau_{зап} + m_{сг} t_{сг})$. Здесь q – заряд сгустка, V – энергия, набираемая сгустком в резонаторе, $t_{сг}$ – длительность сгустка, $P_{вч}$ – ВЧ мощность, $m_{сг}$ – число сгустков в импульсе тока, $\tau_{зап}$ – время заполнения секции. В табл. 4.1 приведены численные величины этих параметров для ряда линейных коллайдеров.

Таблица 4.1

Установка	Параметр				
	$\tau_{\text{зап}}$, нс	$m_{\text{сг}}$	$t_{\text{сг}}$, нс	$\eta_{\text{ВЧ}}$	$\eta_{\text{зап}}$
NLC	100	90	1,4	0,55	0,56
TESLA	511500	1130	708	0,98	0,61
CLIC	12	50	1,0	0,73	0,81
JLC(C)	281	72	2,8	0,42	0,42
JLC(X)	110	85	1,4	0,54	0,52
SBLC	790	333	6		0,40

С другой стороны, должны приниматься во внимание многоступенчатые взаимодействия из-за дальнедействующих полей ВВТ. Взаимодействие пучка с монополюсной аксиально-симметричной (особенно основной) модой является важнейшим эффектом, проявляющимся на протяжении всей ускоряющей структуры. Учет и компенсация этого эффекта осуществляются на стадии изготовления реализацией допусков на размеры секций и их установку, а при эксплуатации – выбором законов изменения амплитуды и фазы ускоряющего поля во время ВЧ импульса. В противоположность этому возбуждение аксиально-несимметричных полей зависит в основном от смещения пучка от оси. Поперечные наведенные поля ответственны за увеличение эмиттанса пучка, их величина может контролироваться определенным изготовлением ячеек, точностью юстировки и центровки секции. Центровка секций применяется для уменьшения возбуждаемых пучком поперечных полей. Выбор конструкции и параметров ускоряющих секций обеспечивает демпфирование возбужденных полей с помощью расстройки секций на частотах паразитных колебаний и поглощения энергии этих колебаний в специальных элементах, включенных в конструкцию секции. Любой метод центровки ограничен прямолинейностью структуры, чувствительностью секции по возбуждению ВВТ, погрешностям инжекции, накоплением ошибок юстировки вдоль ускорителя.

Основной вклад в поперечное наведенное поле в ускоряющей секции вносят дипольные поля. Соответствующий потенциал наведенного поля описывается выражением (2.1), которое можно записать также следующим образом:

$$W_{\text{попер}}(\Delta l, r_1, \varphi_1, r_2, \varphi_2) = r_1 e_r(\varphi_1) w_{\text{попер}}(\Delta l). \quad (4.1)$$

Здесь $r_1, \varphi_1, r_2, \varphi_2$ – поперечные координаты заряда, возбуждающего поперечное поле, и заряда, находящегося под воздействием этого поля, Δl – расстояние между этими зарядами. Нормированная функция $w_{\text{попер}}(\Delta l)$ может быть разделена на резонансную часть $w_{\text{рез}}(\Delta l)$ и нерезонансную (широкополосную) $w_{\text{шир}}(\Delta l)$. Резонансная часть может быть записана следующим образом:

$$w_{\text{рез}}(\Delta l) = 2 \sum k_v \frac{c}{\omega_v} \sin\left(\frac{\omega_v}{c} \Delta l\right) \text{ при } \Delta l > 0 \text{ и } w_{\text{рез}}=0 \text{ при } \Delta l < 0. (4.2)$$

Обычно в уравнении учитывается также затухание колебаний с постоянной времени $\tau_v = 2Q_v/\omega_v$, где Q_v – добротность структуры на частоте ω_v .

Широкополосная часть потенциала наведенного поля отлична от нуля для колебаний, распространяющихся вдоль канала пролета пучка. Частота отсечки канала пролета пучка в два – три раза выше рабочей частоты, в секции запираются только моды с частотами ниже частоты отсечки канала, и они могут рассматриваться как недемпфируемые. Даже для высших мод скорость распространения энергии существенно ниже скорости света, поэтому время демпфирования существенно больше, чем $L_{\text{сек}}/c$ ($L_{\text{сек}}$ – длина секции). Таким образом, удобно использовать это описание (вместе с соответствующим компонентом продольного поля) для моделирования динамики пучка в структуре со слабым демпфированием паразитных колебаний. Для структур с сильным демпфированием функция $w_{\text{шир}}(\Delta l)$ может быть непосредственно рассчитана во временной области.

Требования к демпфированию распространяющихся наведенных полей, получаемые из расчетов динамики пучка, зависят от многих параметров, таких как заряд сгустка, ускоряющий градиент, фокусирующая сила, допустимое увеличение эмиттанса. Тем не менее, для большинства разрабатываемых установок могут быть получены грубые оценки необходимого демпфирования. Так, для CLIC и секций, работающих в X-диапазоне, поперечное наведенное поле должно быть уменьшено, по крайней мере, в 100 раз по сравнению с его максимальной величиной. Для структуры SBLC необходимый коэффициент подавления поперечного поля составляет десять, для

TESLA – достаточно двух. Сумма коэффициентов потерь энергии пучка на частоте f равна:

$$G(f) = \sum_{f_v < f} k_v ; H(f) = \sum_{f_v < f} \frac{c}{\omega_v} k_v . \quad (4.3)$$

Эти выражения иллюстрируют усредненные значения соответствующих параметров. На рис.4.1 показаны зависимости этих величин от частоты. Диаграмма получена для структуры с постоянным градиентом, состоящей из 180 ячеек, аналогичной шестиметровой ускоряющей секции КДВ SBLC.

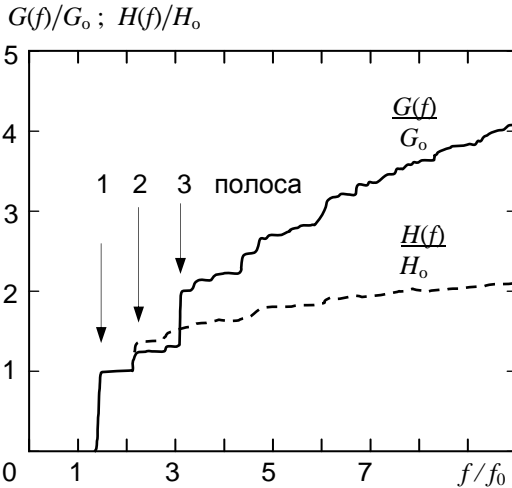


Рис.4.1. Зависимости коэффициентов потерь энергии от частоты

На частотах ниже $4f_0$ существует около десяти отдельных полос пропускания для отдельных ячеек в периодическом приближении. При этом высшие полосы пропускания частично перекрываются. Хотя эти области не идентичны различным ячейкам в структуре с плавным изменением размеров ячеек, имеется аналогия зависимостей для обеих конструкций. Более того, даже для аperiodической структуры можно присваивать модам соответствующие номера по полосам пропускания и структуре полей в них.

Первая ступень на рис. 4.1 при f/f_0 соответствует нижней области дипольных мод. Эта мода оказывает наибольшее влияние на ускоренный пучок, поэтому ее исследованию обычно уделяется наибольшее внимание. Абсолютные величины G_0 и H_0 зависят от точной формы ячеек, в первую очередь, от соотношения размера отверстия связи и длины волны, и могут быть грубо оценены следующими выражениями:

$$\frac{G_0}{L} = \frac{\sum k_v}{L} \approx \frac{80}{\epsilon_0 \lambda_0^4}; \quad \frac{H_0}{L} \approx \frac{\lambda_{\text{высш}}}{2\pi} \frac{G_0}{L} \approx \frac{9}{\epsilon_0 \lambda_0^3}. \quad (4.4)$$

Максимальное значение поперечного наведенного поля, которое в значительной степени определяется первой дипольной модой, приблизительно равно $2H_0$. Это дает область требований на подавление наведенных полей (табл. 4.2). В таблице последний столбец соответствует вкладу нижней дипольной моды.

Таблица 4.2

Установка	Параметр			
	L , м	N , 10^{10}	$\sum k_v/L$, В/см ³	Макс ($w_{\text{шир}}(\Delta l)/L$, В/см ²
NLC	1,8	0,3	$13 \cdot 10^{18}$	$80 \cdot 10^{15}$
TESLA	1	3,6	$810 \cdot 10^{12}$	$47 \cdot 10^{12}$
JLX-X	1,5	0,65	$13 \cdot 10^{18}$	$80 \cdot 10^{15}$
SBLC	6	1,1	$95 \cdot 10^{15}$	$2,1 \cdot 10^{15}$

Вклад второй, четвертой и пятой дипольных мод в нормированный коэффициент потерь энергии пучка на высших модах составляет лишь несколько процентов для каждой моды. В секциях с постоянным импедансом (таких, как CLIC) этот вклад определяется одной из мод, которая не может быть выведена из когерентности с другими модами. Только последовательная расстройка всех ячеек друг относительно друга обеспечивает уменьшение функции поперечного наведенного поля до уровня 1% и менее. Это уже достигнуто для ряда секций с постоянным градиентом. Значительные ступени размером более 10% существуют для 3-й области ($f/f_0=2,3$) и 6-й области ($f/f_0=3,2$) (см. рис.4.1). Для уменьшения соответствующих полей следует плавно изменять толщину диафрагм в ячейках, что увеличивает расстройку частот ячеек.

Влияние дипольных мод очень высоких полос (выше шестой полосы) пренебрежимо мало по двум причинам: время спада поля $\tau_d = 2Q/\omega$ уменьшается по закону $\omega^{-0.5}$ и спектральная плотность мощности в структуре имеет показатель спада, примерно изменяющийся по закону ω^{-3} . Первое обстоятельство особенно существенно для структур с демпфированием. Для секций без демпфирования, состоящих из 100 ячеек и более, рассеяние энергии в стенках и поток мощности из секции через отверстия для пролета пучка и щели связи не обеспечивают постоянную времени затухания равной либо менее t_{cr} . Второе обстоятельство проверяется прямыми расчетами. Так, для секции SBLC рассчитан поперечный наведенный потенциал в диапазоне частот до $10f_0$. Результаты расчета подтверждают приведенную выше зависимость спектральной плотности от частоты. Вклад мод в полосах пропускания выше шестой ($3,3f_0$) проявляется как стационарный шум со среднеквадратичной амплитудой $0,01 \cdot \max(w_{\text{попер}})$ для $\Delta l > 40\lambda$.

4.2. Демпфирование полей внутри сгустка

Снижение амплитуд короткодействующих полей достигается проведением пучка по оси структуры с микронной точностью для предотвращения возбуждения асимметричных полей. Этот метод является достаточно действенным, хотя требует значительных усилий по юстировке секций.

Эффективным для создания условий устойчивого ускорения пучка при одновременном подавлении поперечной неустойчивости пучка является метод с условным названием «автофазировка поперечных колебаний». Его обычно называют методом BNS по имени авторов (Балакин, Новохатский, Смирнов). Суть метода заключается в создании специального распределения энергии частиц внутри сгустка, при котором обеспечено подавление в конечной части сгустка колебаний, возбуждаемых частицами, двигающимися в начальной части сгустка.

Для вывода условий автофазировки поперечных колебаний рассматривается сгусток из N частиц, двигающихся вдоль оси x , на которые действует непрерывное фокусирующее поле, смещающее

частицы на величину x с силой $-kx$. Система уравнений для N частиц имеет вид:

$$\begin{aligned} x_0'' + \omega_0^2 &= f_0/m_0; \\ x_1'' + \omega_1^2 &= f_1/m_1; \\ &\dots\dots\dots \\ x_N'' + \omega_N^2 &= f_N/m_N. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Здесь $\omega_i^2 = k/m_i$, m_i – эффективная поперечная масса частицы, пропорциональная ее энергии, f_i – поперечная сила, действующая на частицу и связанная со взаимодействием сгустка с ускоряющей структурой:

$$f_i = q \sum_{k=0}^i g(x_i, x_k, z_i, z_k). \quad (4.6)$$

Здесь z_i – продольная координата частицы, $g(x_i, x_k, z_i, z_k)$ – функция, описывающая воздействие поперечного поля, возбуждаемого k -й частицей, отклоненной от оси на величину x_k , на i -ю частицу.

При малых поперечных отклонениях можно считать силу пропорциональной отклонению x_k от оси и не зависящей от координаты воздействующей частицы x_i :

$$g(x_i, x_k, z_i, z_k) \approx x_k \alpha(x_i - x_k), \quad (4.7)$$

$\alpha(x_i - x_k)$ зависит только от расстояния между частицами:

$$\begin{aligned} (x_i - x_k) &= e(i-k), \\ f_i &= q \sum_{k=0}^i x_k \alpha(x_i - x_k) = \sum_{k=0}^i x_k \alpha(i-k). \end{aligned} \quad (4.8)$$

Поскольку рассматриваются дипольные несимметричные моды, то их поперечное воздействие на заряд возрастает от головы к хвосту сгустка:

$$\alpha(i+1) > \alpha(i), \quad \alpha(0)=0, \quad i=0,1,\dots,n-1$$

Уравнения (4.5) приобретают вид:

$$\begin{aligned} x_0'' + \omega_0^2 &= 0; \\ x_1'' + \omega_1^2 &= (x_0 \alpha(1))/m_1; \\ &\dots\dots\dots \\ x_N'' + \omega_N^2 &= (x_0 \alpha(2) + x_1 \alpha(1))/m_2. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Используя полученные уравнения, можно найти условие, при выполнении которого все частицы сгустка движутся в поперечном направлении когерентно. Оно записывается в виде:

$$\omega_i^2 = \omega_0^2 + \sum_{k=0}^i \frac{\alpha(k)}{m_i} \quad (4.10)$$

Это условие, при котором сгусток взаимодействующих частиц, имеющих разную энергию продольного движения и, следовательно, разные частоты поперечных колебаний, в результате взаимодействия движется когерентно, фиксирует нелинейный закон изменения частоты от головы к хвосту сгустка. Выражение (4.10) называют условием автофазировки. В случае непрерывного распределения заряда вдоль сгустка суммирование заменяется интегрированием по элементарным сгусткам.

4.3. Демпфирование полей в промежутке времени между сгустками

Демпфирование полей в промежутке времени между сгустками означает, что время затухания колебаний равно, по крайней мере, времени следования сгустков. Это единственный метод уменьшения наведенных полей в структурах с постоянным импедансом (точнее – в структурах без расстройки частот ячеек на ВВТ). Он также используется в структурах с плавным изменением размеров для обеспечения, независимо от расстройки частот ячеек, полного подавления наведенных полей. С одной стороны, на модах высших порядков ν добротность должна быть не более $Q_\nu = t_{cr} \pi f_\nu / \ln d$ для обеспечения затухания поля в промежутке времени между сгустками t_{cr} с коэффициентом затухания d . С другой стороны, максимальное затухание ограничено скоростью распространения энергии и расстоянием между демпферами ВВТ. Следующие оценки основаны на простой модели распространения. Они допустимы, если длина затухания $v_\Delta Q_\nu / \pi f_\nu$ достаточно велика по сравнению с периодом ячейки. При наличии демпферов на концах секции добротность не может быть уменьшена ниже $Q = \omega_\nu \tau_\nu / 4$, где τ_ν – время заполнения секции волной высшего типа. Для секции с постоянным импедансом $\tau_\nu = L / v_{г\text{р}\nu}$, для секций с медленно изменяющимися раз-

мерами это время примерно равно $1/(f_{v+1}-f_v)$. Расчет добротности секции на запертых ВВТ, к сожалению, невозможен.

Только в TESLA расстояние между сгустками велико и требования к демпфированию выполняются. Оказывается достаточным применение двух устройств связи для отвода волн высших типов, установленных в каналах пролета пучка между секциями. Крайние ячейки секции оказываются расстроенными по отношению к другим ячейкам на дипольных модах, так как их размеры изменены для выравнивания поля вдоль секции на основном типе волны. Расстройка крайних ячеек, обусловленная отверстиями для пролета пучка, различная поляризация устройств связи в межсекционных промежутках, а также погрешности изготовления могут привести к появлению запертых типов волн с небольшой амплитудой и поляризацией, определяемой устройствами связи. Подробнее этот эффект рассмотрен в разделе 5.3.

Использование нескольких устройств демпфирования, расположенных вдоль секции, обеспечивает более существенное поглощение энергии ВВТ. Однако даже для устройств поглощения, обеспечивающих полный вывод из секции энергии паразитных полей, расстояние между демпферами не должно быть более, чем $L=2v_{гр} \cdot t_n / \ln d$. Это уравнение применимо для структуры с плавно изменяющимися размерами ячеек. Групповая скорость в секции $v_{гр}$ принимается примерно постоянной на длине L . Для линейных коллайдеров с малым расстоянием между сгустками демпферы должны размещаться через каждые несколько ячеек, для того чтобы обеспечить вывод энергии паразитных полей, возбуждающихся в первой полосе пропускания. Изготовление и настройка секций с большим числом специальных ячеек является сложной задачей, поэтому реальные демпферы имеют характеристики далекие от идеальных демпферов, которые должны располагаться в каждой ячейке и иметь хотя бы одну плоскость поляризации.

Резонатор, почти свободный от дипольных паразитных полей, оснащенный дроссельным выводом ВВТ, разработан для секций коллайдера JLC-S. Подробно такая структура рассмотрена в разделе 5.2.

Для ускоряющей структуры CLIC исследуются возможности полного демпфирования паразитных полей. Рассматривается

структура, каждая ячейка которой оснащена четырьмя устройствами связи с радиально подключаемыми волноводами, нагруженными на поглощающие нагрузки. Дифракты в такой структуре имеют так же по четыре радиальных щели. Конструкция этой усложняющей структуры также обсуждается в разделе 5.2.

4.4. Взаимная расстройка ячеек

Взаимодействие нескольких мод в узкой полосе частот может быть использовано для подавления наведенных полей с помощью расстройки. Если частотное разделение мод сравнимо с величиной $c/\Delta l$, сумма нормированных наведенных полей может быть записана:

$$w_{\text{попер}}(\Delta l) \approx \int F(\omega) \sin\left(\frac{\omega}{c} \Delta l\right) d\omega; \quad F(\omega) = 2k(\omega) \frac{c}{\omega} \frac{\partial n}{\partial \omega}(\omega). \quad (4.11)$$

Здесь k – параметр потерь, являющийся непрерывной функцией, $\partial n/\partial \omega$ – плотность мод. Если рассматривать вклад только одной полосы, то $F(\omega)$ – узкополосная функция с центром на частоте ω_0 . Огибающая $E(\Delta l)$ функции, характеризующей наведенное поле, может быть получена из фурье-преобразования $F(\omega - \omega_0)$. В области, составляющей несколько расстояний между сгустками, хорошее приближение для $w_{\text{попер}}(\Delta l)$ и $F(\omega)$ может быть получено из модели несвязанных колебаний, в которой параметры ω и k_v полного решения для связанных колебаний заменяются синхронными параметрами ω_{vc} и k_{vc} , рассчитываемыми для периодического приближения каждой отдельной ячейки. На больших расстояниях колебания становятся некогерентными и их фазы распределены произвольным образом. При этом средняя квадратичная амплитуда имеет вид:

$$\langle w_p \rangle(\Delta l) = \sqrt{2 \sum k_v^2 \exp(-\Delta l \omega_v / c Q_v)}. \quad (4.12)$$

В обычном КДВ $F(\omega)$ определяется геометрией ячейки, ее номером N , параметром потерь $\tau = 0,5 \ln(P_{\text{вх}}/P_{\text{вых}})$. Для хорошего приближения она линейно возрастает от $F(\omega_1) = F_1 \approx k_1/\omega_1$ до $F(\omega_N) = F_N \approx k_N/\omega_N$. Огибающая этой функции имеет вид:

$$\frac{E(\Delta l)}{E(0)} = \left| \frac{\sin(\Omega \Delta l)}{\Omega \Delta l} + i \cdot A \cdot \left(\frac{\sin(\Omega \Delta l)}{(\Omega \Delta l)^2} - \frac{\cos(\Omega \Delta l)}{\Omega \Delta l} \right) \right|. \quad (4.13)$$

Здесь $A=(F_N-F_1)/(F_1+F_N)$ и $\Omega=(\omega_N-\omega_1)/2c$. Обычно второй член пренебрежимо мал по сравнению с третьим. В соответствии с моделью наведенное поле первой дипольной моды для структуры SBLC ($(f_N-f_1)=320$ МГц, $F_1/F_N=1,38$) составляет менее 5% от максимального поля последующих сгустков. Расчет характеристик распространяющихся наведенных полей с помощью модели, не учитывающей потери в стенках, показывает, что поле спадает на расстоянии 120 м до величины ниже 5% от первоначального уровня, и становится некогерентным на 30% через 132 м.

Для настройки основной секции в NLC и JLC-X на основной моде и расстройки первой и нескольких дипольных мод используются три параметра: диаметр отверстия в диафрагме, толщина диафрагмы, радиус скругления отверстия в диафрагме. Диаметр диафрагмы определяет частоту первой дипольной моды. Изменение толщины диафрагмы применяется для обеспечения достаточной разности частот ω_{vc} третьей и шестой мод. Радиус скругления диафрагмы влияет, в основном, на частоту шестой дипольной моды. В противоположность структурам с постоянным импедансом распределение групповой скорости вдоль структуры настраивается не из требований к нему на основной моде, а исходя из необходимости обеспечения определенного закона $F(\omega)$. Одним из подходов является получение минимумов функции $E(\Delta l) \sim |\sin(\Omega \Delta l)/(\Omega \Delta l)|$ для последующих сгустков ($\Delta l = n t_{cr}/c$). Такой подход использует обрезанное распределение Гаусса:

$$F(\omega) \approx \exp(-0,5 \left(\frac{\omega - \omega_c}{\omega_\sigma} \right)^2) \quad \text{для } 2(\omega_v - \omega_c)/\Delta\omega, \quad (4.14)$$

где $\Delta\omega/\omega_c$ в значительной степени определяется параметром структуры $\tau = \ln(P_{вх}/P_{вых})$, и $\omega_\sigma/\Delta\omega$ выбирается таким образом, что огибающая функции для второго сгустка становится менее $0,01E(0)$. Расчеты для NLC, основанные на модели связанных осцилляторов, показывают, что огибающая испытывает подъем выше уровня 1% через расстояние 10 м. Чтобы проверить, что расстройка работает, как предполагалось, был исследован полномасштабный макет сек-

ции NLC на установке ASSET. Результаты измерений находятся в хорошем согласии с расчетом для начальных 60 см, на оставшейся части секции имеются поля, превышающие $0,01E(0)$, чего не должно быть в соответствии с расчетами. Это может быть объяснено относительным среднеквадратичным разбросом размеров ячеек $1,5 \cdot 10^{-4}$, который не учитывался в расчетной модели. На расстояниях, больших размера секции, совпадение расчетных и экспериментальных данных должно быть лучше, если использовать реальные значения добротности ячеек (4000), а не их рассчитанные величины (6500).

4.5. Взаимная расстройка секций

Функция, характеризующая наведенное поле в двух или большем числе ускоряющих секций, может быть добавлена к общей функции, если длина объединенных секций достаточно мала по сравнению с длиной волны бетатронных колебаний.

Систематическая расстройка нескольких секций ограничена допусками на изготовление. Для произвольно распределенных ошибок частоты с шириной среднеквадратичного отклонения $\langle \delta\omega \rangle$ эффективная поперечная функция наведенного поля может быть записана:

$$\frac{\langle w_{\text{попер}} \rangle}{\max(w_{\text{попер}})} \approx \frac{\Delta l}{c} \frac{\langle \delta\omega \rangle}{\sqrt{2MN}} \quad \text{для} \quad \frac{\Delta l}{c} \langle d\omega \rangle \ll 1. \quad (4.15)$$

Здесь M – число секций. Даже для одной секции трудно сохранить $\langle w_{\text{попер}} \rangle$ ниже требуемого уровня при реалистичных допусках на изготовление секций. Таким образом, систематическая расстройка от секции к секции не может рассматриваться как эффективное средство подавления наведенных полей в разрабатываемых коллайдерах.

Стохастическая расстройка частот с дисперсией $\delta\omega_{\mu}$ дает следующую огибающую:

$$\frac{1}{M} E_{\Sigma} \sum_{\mu=1}^M E_{\mu}(\Delta l) = E(\Delta l) \frac{1}{M} \operatorname{Re} \left\{ \sum_{\mu=1}^M \exp(i\delta\omega_{\mu} \Delta l / c) \right\}. \quad (4.16)$$

Если аргументы в экспоненциальной функции порядка $i\pi$ или более, то эффективная огибающая имеет вид $E(\Delta l)/\sqrt{2M}$. При стохастической расстройке секций ускорителя динамика пучка на протяжении многих длин волны бетатронных колебаний находится под воздействием случайных сил, поэтому «эффективная» величина M не может быть определена с помощью упрощенных расчетов.

4.6. Расстройка параметров ячеек и поглощение энергии волн высших типов

Возникновение когерентности наведенных полей в полностью расстроенных структурах может происходить в течение времени $\tau=L/c$, которое является малым по сравнению со временем заполнения структуры $\tau_{\text{зап}}$, и поэтому малым по сравнению с длительностью последовательности сгустков в большинстве разрабатываемых коллайдеров. Необходимо лишь небольшое добавочное демпфирование, составляющее величину порядка $Q_{\text{попер}}=\pi f_c \tau$, которое обеспечит подавление распространяющихся наведенных полей. Например, для структуры SBLC требуется величина $Q\sim 3000$. Для структуры DDS (Detuned Dumped Structure) коллайдера NLC добротность 1000 обеспечивает компенсацию полей, возникающих из-за неидеальности изготовления ячеек и центровки секций.

Для решения задачи методом «слабое поглощение несколькими демпферами» исследовано большое число вариантов геометрии устройств связи и поглотителей ВВТ. Благодаря существованию запертых волн, необходимо применение поглощающих ячеек внутри секции. Например, в структуре SBLC следует установить демпферы, по крайней мере, в трех частях секции таким образом, чтобы каждый из них располагался в области запирающей одной из опасных дипольных мод. К сожалению, даже установка поглощающей ячейки в области запирающей поля может оказаться неэффективной. Это происходит в случае расположения поглощающих ячеек с двумя волноводами, в которых могут распространяться только фундаментальные моды, в плоскости поляризации, не нарушающей дипольную симметрию. Для преодоления этого требуется применение все большего числа демпферов в ячейке, обеспечивающих нарушение

дипольной симметрии и использующих либо более двух волноводов, либо волноводы, которые обеспечивают передачу более одной моды. Другим недостатком специальных поглощающих ячеек является их взаимосвязь с расстройкой: слабое поглощение в нескольких ячейках требует оптимальной связи между ячейкой и волноводом, которая вносит существенное возмущение в нераспространяющиеся волны. Этот эффект может быть ослаблен с помощью увеличения числа демпферов и соответствующего уменьшения их связи с ячейками. Предельным случаем является установка демпферов в каждой ячейке.

Обычно поглотители ВВТ не имеют связи с основным (ускоряющим) типом волны. Это достигается с помощью специального выбора устройств связи и/или применения частотно-зависимых элементов в них, а также искусственного увеличения потерь на части поверхности резонаторов. Так, в секциях ускорителя SBLC края диафрагм ячеек покрыты материалом, обладающим в 10-20 раз большим поверхностным сопротивлением, чем остальные части ячеек. Это уменьшает добротность на ускоряющей моде на 5%, но эффективное шунтовое сопротивление снижается менее чем на 3%.

Демпфирование в структуре NLC обеспечивается установкой четырех коллекторных волноводов параллельно структуре Поле в структуре, суживающейся к концу, может быть представлено как суперпозиция волн, бегущих в прямом и обратном направлении. Если фазы дипольных волн в ячейках близки к фазовым набегам волны в коллекторных волноводах, энергия дипольных волн будет выводиться в поглощающие нагрузки на концах коллекторных волноводов. Более того, при возбуждении запертых волн в ячейках секции информация о них может быть получена по сигналам, поступающим в поглощающие нагрузки. Для каждой моды условия связи выполняются в области лишь нескольких ячеек, поэтому возможно обеспечить локальное демпфирование паразитных типов волн. Размеры структуры определяются следующим образом: толщина диафрагмы и размеры отверстия для пролета пучка в ней выбираются так, чтобы они соответствовали структуре с расстроенными ячейками для сохранения распределения ω_v и k_v . Отверстия связи кругового сечения и ширина волноводов уменьшаются по длине секции для достижения необходимого поглощения энергии дипольных мод. Наконец, радиусы резонаторов выбираются так,

чтобы получить вид колебаний $2\pi/3$ на рабочей частоте волны основного типа. На длине около двух третей от начала секции глубина отверстий связи коллекторных волноводов положительна, поэтому уменьшение шунтового сопротивления не превышает 3%. В последней трети секции волноводы погружены в ячейки, что приводит к снижению шунтового сопротивления примерно на 5%.

4.7. Эффекты в структурах под воздействием мощных ВЧ полей

Существует ряд причин, обуславливающих увеличение внимания к эффектам, происходящим в структурах под воздействием мощных полей. Разработка эффективных методов подавления ВВТ обеспечила возможность увеличения длительности импульса ускоренных частиц и ВЧ импульса. Это обострило проблему деградации структуры при ВЧ пробоях и импульсном нагреве. Исследования ВЧ пробоев в одиночных резонаторах и коротких структурах показали, что в X -диапазоне структуры могут работать при градиентах до 200 МэВ/м, порог пробоя изменяется примерно как корень квадратный из частоты. Эксперименты, проводившиеся на коротких структурах, не рассматривали количественный ущерб, наносимый структуре мощным полем, т.е. не учитывалось изменение фазы на периоде структуры, критичное для длинных структур.

Эксперименты, проведенные на структурах, конструктивно близких к будущим реальным секциям по групповой скорости, размерам отверстий в диафрагмах, величине перенапряженности поля на поверхности диафрагмы, показали значительное изменение фазовой скорости после испытаний при ускоряющих градиентах, близких к допустимым. Так, для структуры NLC после 1000 ч работы при ускоряющем градиенте 50 МэВ/м наблюдалась деградация поверхности ячеек в первой трети структуры. Структура NLC представляет собой секцию с примерно постоянным градиентом, это обеспечивает подавление наведенных полей с помощью расстройки ячеек относительно друг друга. Успешное испытание коротких структур с малой групповой скоростью также подтверждает тот факт, что наибольшей деградации подвергается начальная часть структуры. Малая групповая скорость выгодна по двум причинам:

энергия в ВЧ импульсе, требуемая для достижения заданного градиента изменяется линейно с групповой скоростью; коэффициент отражения от образующейся дуги с постоянным сопротивлением обратно пропорционален групповой скорости. Для этих двух обстоятельств запасаемая в области дуги энергия должна изменяться примерно пропорционально квадрату групповой скорости. Имеются еще два эффекта, оказывающие влияние на деградацию входной части секции.

При зажигании дуги появляется рассогласование, которое уменьшает амплитуду поля в некоторых местах секции, находящихся перед областью разряда. Отражение от дуги перемещается с групповой скоростью к входу секции, поэтому и область дуги может перемещаться к входу секции с групповой скоростью.

В первой трети секции существует область, в которой поля на поверхности на 5% больше, чем в дальней части секции. Вероятность зажигания дуги примерно пропорциональна длине секции и с ростом длины секции область дуги смещается к входу секции. С уменьшением групповой скорости уменьшается деградация поверхности секции. Уменьшение деградации поверхности секций, таким образом, может быть достигнуто сокращением их длины за счет увеличения числа вводов мощности. Однако, в свою очередь, это приведет к росту стоимости установки. Затухание в секциях должно быть 0,5-0,6 непер.

Размеры ячеек секций линейно зависят от длины волны, для того чтобы сохранить затухание постоянным вдоль структуры, число ячеек должно быть пропорционально $\lambda^{1/2}$. Если использовать этот масштаб и масштаб по длительности импульса ($\lambda^{3/2}$), то поле в области дуги будет иметь фазовый сдвиг, пропорциональный $\lambda^{-1/2}$. Однако из-за малых апертур, приводящих к возбуждению дипольных полей, а также проблем ввода высокой мощности в секции, определяющих значительную часть стоимости ускорителя, была выбрана структура длиной почти в пять раз больше, чем получающаяся из простого масштабирования структуры, работающей в S-диапазоне.

Конечно, будут рассмотрены более короткие структуры с меньшими групповыми скоростями, но пока не ясно, каким методом будет уменьшаться групповая скорость. Нежелательно уменьшать

диаметр пролетных отверстий в диафрагмах, потому что при этом возрастают дипольные поля. Можно добавить щели магнитной связи ячейек, чтобы уменьшить электрическую связь, увеличить сдвиг фазы на ячейку, увеличить толщину диафрагм или использовать комбинацию этих способов. Будет рассмотрен вариант с секциями, работающими в режиме стоячей волны. Следует, однако, подчеркнуть, что все эти варианты ведут к росту стоимости секций.

Другим важным эффектом, проявляющимся под воздействием мощных полей, является импульсный нагрев локальных участков секции. Измерения показывают, что температура из-за импульсного нагрева достигает 120°C во время сеанса 250 ч при частоте посылок 60 Гц и происходит деградация поверхности резонатора. Это приемлемо, в основном, для проектируемых секций коллайдеров за исключением областей в этих секциях, близких к отверстиям связи. Это накладывает существенные ограничения на устройства для вывода высших типов волн. Если добротность устройств вывода высших типов волн ниже, более чем на 1%, по сравнению устройствами ввода мощности на основном типе волны, будет существовать проблема, связанная с импульсным нагревом диафрагм. Допустимый порог по импульсному нагреву пропорционален $\omega^{1/8}$ для линейного закона изменения размера структуры, по длительности импульса как $\lambda^{3/2}$ (т.е. постоянное затухание) и термическая диффузионная длина изменяется по закону $\lambda^{3/4}$. Поверхностное сопротивление пропорционально $\lambda^{-1/2}$.

Глава 5

КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРЫ УСТРОЙСТВ ДЕМПФИРОВАНИЯ ВОЛН ВЫСШИХ ТИПОВ В УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУРАХ

Конкретная реализация методов демпфирования ВВТ определяется выбранным типом ускоряющей структуры, режимом ее работы – бегущая либо стоячая волна, при нормальных условиях либо в сверхпроводящем состоянии. В главе рассмотрены типичные конструкции демпфирующих устройств для ускоряющих секций разрабатываемых и действующих установок.

5.1. Подавление волн высших типов в ускоряющих структурах циклических ускорителей

Развитие ускорителей с высоким средним током пучка делает важным решение проблемы подавления ВВТ. В ускорителях с малым или средним током пучка частоты ВВТ могут быть расстроены до безопасного уровня применением систем обратной связи, обеспечивающей регулировку параметров ВЧ питания по сигналу, пропорциональному амплитуде полей высших типов. В ускорителях с высоким током пучка необходимо конструктивное обеспечение небольших величин сопротивления связи резонатора на ВВТ. Применение обратных связей носит вспомогательный характер и обеспечивает небольшую подстройку параметров ВЧ питания. К ускорителям с высокой интенсивностью ускоренного тока относятся установки РЕР-II, КЕК, DAPHNE, CERN. Вопросы подавления ВВТ решаются при разработке ускоряющих резонаторов, предназначенных для использования в демпфирующих кольцах линейных коллайдеров.

Все ускорители, являющиеся «фабриками» ускоренных частиц, используют резонаторы с одной ячейкой, оснащенные устройствами сильного подавления полей ВВТ. При этом конструктивное выполнение может быть самым различным. Так, в РЕР-II и DAPHNE применяются медные резонаторы, работающие при нормальной температуре и оснащенные волноводами для вывода ВВТ в широкополосные поглощающие нагрузки. Резонатор РЕР-II (рис.5.1) обеспечивает напряжение 850 кВ, рассеиваемая в стенках мощность 103 кВт. Устройства вывода ВВТ сконструированы таким образом, чтобы обеспечить вывод из резонатора наиболее опасных ВВТ в поглощающие нагрузки.

На рис.5.2 представлен расчетный спектр продольного импеданса этого резонатора. На резонаторе установлены три поглотителя ВВТ, обеспечивающие диссипацию мощности до 10 кВт в каждом из них, и устройство ввода мощности до 500 кВт.

Резонатор ускорителя DAPHNE имеет колоколообразную форму. Шунтовое сопротивление резонатора невелико, но существенно подавлены ВВТ с поперечным компонентом электрического поля. Устройства ввода мощности и связи с демпферами имеют широко-

полосные коаксиально-волноводные переходы на основе гребенчатых волноводов. Мощность, рассеиваемая в каждом демпфере, составляет около 1 кВт.

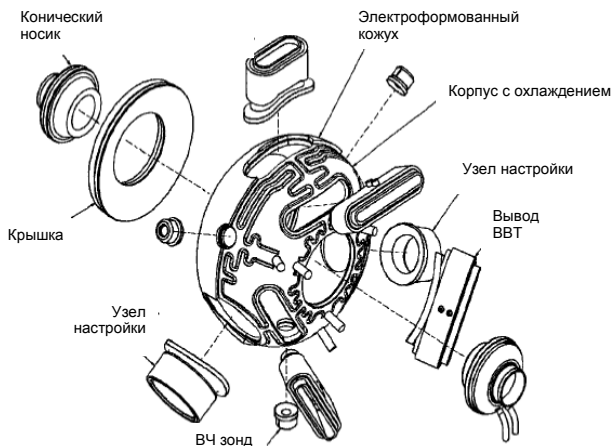


Рис. 5.1. Ускоряющий резонатор ускорителя PEP II

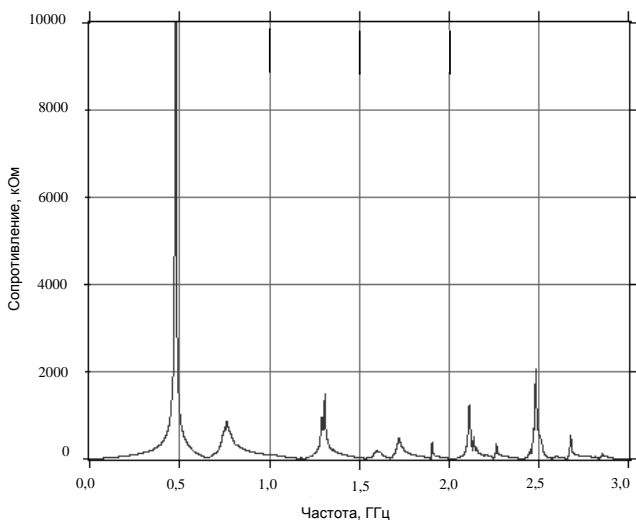


Рис. 5.2. Расчетная зависимость продольного сопротивления резонатора ускорителя PEP-II от частоты

В установке CESR применяется однозакорный сверхпроводящий резонатор, имеющий большую апертуру для пролета пучка. Это обеспечивает эффективный вывод энергии ВВТ в поглощающие нагрузки. Форма резонатора обеспечивает низкое значение R/Q и сильную связь с нагрузками на ВВТ и высокое шунтовое сопротивление на основном типе волны.

В установке КЕК разработан аналогичный сверхпроводящий резонатор для ускорительного кольца высокой энергии. Применяются резонаторы, работающие при нормальной температуре, оснащенные демпферами, подключенными через волноводы и канал для пролета пучка.

Большинство резонаторов с коническими носиками, обладающих высоким шунтовым сопротивлением на основном типе волны, имеет тороидальный профиль. При этом устройства ввода мощности и вывода ВВТ имеют достаточно сложную форму. Это приводит к повышению стоимости изготовления резонаторов. Переход к сферической форме резонаторов упрощает изготовление устройств. Резонаторы такой формы планируется применить в демпфирующем кольце NLC (рис.5.3).

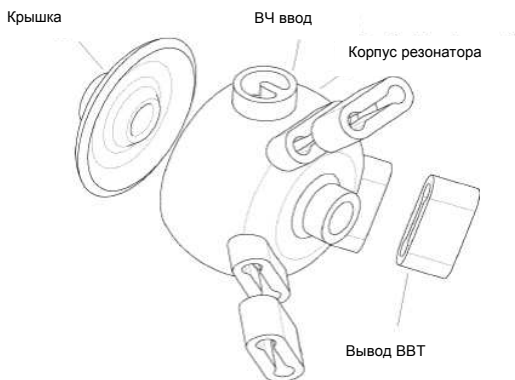


Рис. 5.3. Ускоряющая секция для кольца демпфирования коллайдера NLC

В резонаторе РЕР-II применяются волноводы прямоугольного сечения (рис.5.4,а). Ширина волновода достаточно велика для обеспечения непосредственной связи с резонатором, поэтому на его входе установлена диафрагма прямоугольной формы со скруг-

ленными углами. В области связи существует повышенная плотность потока мощности, что требует обеспечить охлаждение этого участка. Плотность потока мощности существенно зависит от радиуса скруглений щели связи и радиуса диафрагмы между волноводом и резонатором. На рис.5.4,б показано сечение более компактного волновода, имеющего ту же частоту отсечки, но не требующего применения диафрагмы. На рис.5.4,в показан профиль волновода кругового сечения, который может быть использован для связи резонатора с внешними устройствами. Круговое сечение удобно при использовании круглых фланцев, позволяет упростить конструкцию ряда узлов.

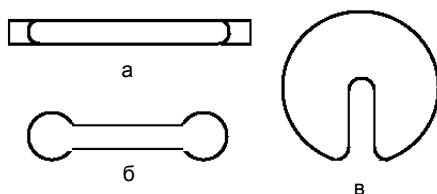


Рис.5.4. Поперечные сечения волноводов для вывода ВВТ из резонатора:
 а – прямоугольный волновод (ускоритель РЕР-II), б – гребенчатый волновод,
 в – круглый гребенчатый волновод

Ускоряющий модуль УНК состоит из двух резонаторов, каждый из которых имеет цилиндрическую форму. Диаметр резонатора составляет 1156 мм, длина 500 мм. На рис.5.5 представлена геометрия модуля с примерным расположением демпферов ВВТ. Рабочая частота резонатора 200 МГц. Расчетные и экспериментальные исследования параметров для определения характеристик ВВТ проводились в диапазоне частот 200 – 1500 МГц.

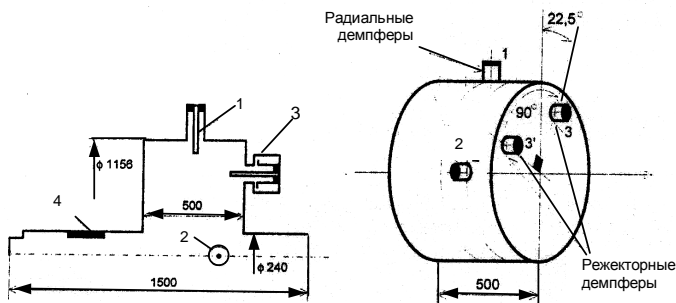


Рис. 5.5. Ускоряющий резонатор УНК

На частотах ниже критической частоты пролетных патрубков аксиально-симметричные TM -моды мало отличаются от колебаний TM_{0np} -типа в замкнутом резонаторе. На более высоких частотах возбуждаемые колебания проникают через канал для пролета пучка из одного резонатора в другой. Аксиально-симметричные моды при этом делятся на две группы: с четной (синфазные) и нечетной (противофазные) симметрией относительно плоскости симметрии модуля. В первом случае тангенциальное электрическое поле в плоскости симметрии равно нулю, а нормальное отличается от нуля, во втором случае – наоборот. Выбор месторасположения и конструкции демпферов ВВТ осуществлялся исходя из результатов расчета параметров мод, возбуждаемых в резонаторе. Данные расчетов показали, что аксиально-симметричные моды резонаторов требуют примерно в десять раз более сильного демпфирования по сравнению с аксиально-несимметричными модами. Демпферы, установленные на цилиндрической стенке резонатора, находятся в пучности радиального поля мод TM_{0np} . Демпфер 1 расположен посередине между торцевыми стенками, а демпфер 2 смещен от торцевой стенки на четверть длины резонатора. Демпфер, установленный на торцевой стенке, удален от оси резонатора и имеет связь со всеми аксиально-симметричными модами, в том числе с модами TM_{0m0} .

Для подавления аксиально-несимметричных мод с различной поляризацией на торцевой стенке установлен еще один демпфер $3'$, смещенный по азимуту на угол 90° относительно демпфера 3.

Демпферы представляют собой отрезки коаксиальных линий. На одном конце они имеют емкостную связь с резонатором в виде торцевого зонда, на другом связаны с поглощающими нагрузками. Для предотвращения вывода энергии основного типа волны (TM_{010}) демпферы 3 и $3'$ снабжены режекторными фильтрами.

В канале для пролета пучка установлены ферритовые поглотители 4 ВВТ, имеющие частоты выше частоты отсечки канала для пролета пучка. Эти поглотители обеспечивают эффективное рассеяние энергии распространяющихся ВВТ.

5.2. Подавление волн высших типов в структурах линейных ускорителей, работающих при нормальной температуре

Наиболее типичной ускоряющей структурой, работающей при нормальной температуре, является структура DDS (Detuned Dumped Structure), разработанная для коллайдера NLC. Предлагаемая структура состоит из ячеек, связанных между собой через отверстия для пролета пучка, аналогично КДВ. Структура работает на частоте 11,424 ГГц. Мощность вводится через трансформатор типа волны на входе структуры, на ее выходе установлен второй трансформатор, обеспечивающий вывод в поглощающую нагрузку неизрасходованной мощности. Структура работает на виде колебаний $2\pi/3$ ускоряющего (монопольного) типа волны. Размеры каждой ячейки подобраны таким образом, чтобы обеспечить расстройку частот дипольных мод, а дополнительное подключение коллекторных волноводов обеспечивает вывод энергии дипольных типов волн и их поглощение в нагрузках.

Используемая так называемая гауссова расстройка частот заключается в замене узкополосных синхронных волн каждого из дипольных типов, возбуждаемых смещенными от оси сгустками, двигающимися со скоростью света в однородной структуре, широким спектром дискретных типов волн, со сглаженным гауссовым распределением амплитуд и частот. Если распределение частот является сглаженным гауссовым распределением, функция, характеризующая наведенное поле, представляет собой гауссиан, уменьшающийся со временем. Однако гауссиан образован конечным числом частных мод и является поэтому обрезанным. Более того, так как он составляется из системы дискретных мод, функция плотности амплитуд мод является суммой δ -функций по частоте, и не является гладкой. Из расчета величины обрезания следует, что уменьшение в среднем меньше, чем значение гауссиана после интервала времени порядка $\delta f / (4\pi\sigma^2)$, где δf – разность частот, и σ – ширина гауссиана. При расчете выяснено, что дискретное взаимодействие мод может дать положительный эффект при временах, близких к разделению мод, так как это приводит к подавлению наведенных полей. Эти эффекты присутствуют в расстроенной струк-

туре (рис.5.6). Необходимо добиваться хорошего баланса между шириной гауссиана σ и разностью частот δf для оптимизации функции наведенного поля нескольких последующих сгустков. На рис.5.6 представлен случай $\delta f=4\sigma$. С учетом расстояния между сгустками присутствует наведенное поле ближнего и дальнего действия.

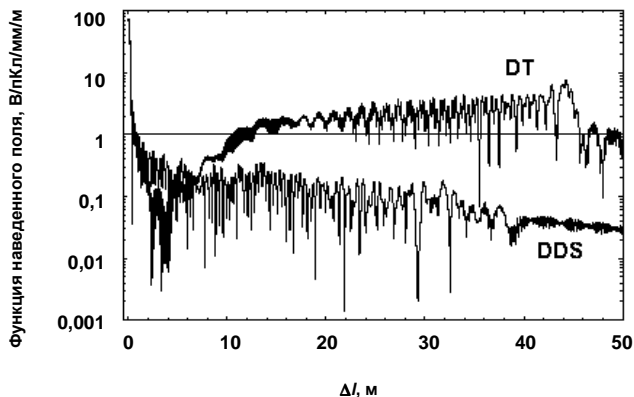


Рис. 5.6. Зависимость функции наведенного поля от продольной координаты для структуры с расстройкой ячеек (DT) и структуры с коллекторными волноводами (DDS)

Для того чтобы избежать вторичного появления наведенного поля при больших временах задержки, в структуре с расстройкой создаются условия поглощения полей дипольных типов волн. Поглощение энергии дипольных типов волн осуществляется с помощью четырех волноводных структур, расположенных равномерно по азимуту ускоряющей структуры вдоль всей ее длины. Из-за своего внешнего вида и из-за того, что эти волноводы служат вакуумными коллекторами, они обычно называются коллекторными волноводами (manifolds). Разрез ускоряющей секции с коллекторными волноводами представлен на рис.5.7. Волноводы обеспечивают «дренаж» энергии дипольных типов волн из ускоряющих ячеек и ее отвод в нагрузки на обоих концах волноводов, т. е. являются коллекторами энергии паразитных волн. Дополнительно к изменению размеров ускоряющих ячеек изменяются размеры коллекторных волноводов по длине для обеспечения их оптимальной связи с

ячейками. Структура формируется из последовательного набора таких ячеек. Нагрузка включает плавный поворот в H -плоскости на 90° , конический переход на волновод стандартного сечения, окно и внешнюю нагрузку. Две ячейки с устройствами связи (трансформаторы типа волны) на концах секции не подключены к коллекторным волноводам.

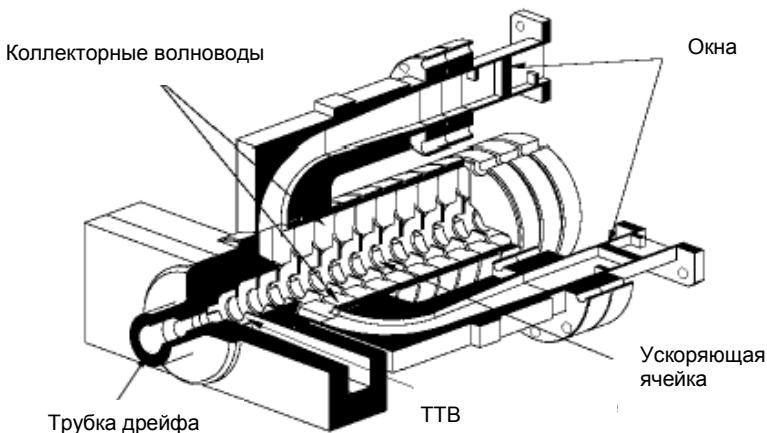


Рис. 5.7. Общий вид структуры с коллекторными волноводами

Сводные данные по некоторым исследованным типам ускоряющей структуры, предназначенной для ускорителя NLC, содержатся в табл. 5.1.

Приведены характеристики четырех структур. Представленные данные иллюстрируют развитие методов борьбы с высшими типами волн в структуре с бегущей волной типа диафрагмированного волновода. Первоначально исследовалась секция с постоянными размерами ячеек. Ее характеристики на высших типах волн оказались неудовлетворительными. Изменение размеров ускоряющих ячеек обеспечивает расстройку частот высших типов и их некоторое подавление. Однако лишь использование коллекторных волноводов для вывода колебаний ВВТ и оптимизация форм ускоряю-

щих ячеек позволили достичь эффективного подавления паразитных колебаний.

Таблица 5.1

Название структуры	Uniform	DS	DDS	RDDS
Тип структуры	С постоянным импедансом	С расстройкой ячеек	С расстройкой ячеек и демпфированием	С расстройкой ячеек и демпфированием
Длина, м	0,75	1,8	1,8	1,8
Число ячеек	86	206	206	206
Форма ячейки	Цилиндрическая	Цилиндрическая	Цилиндрическая	Оптимизированная
Вид колебаний	$2\pi/3$	$2\pi/3$	$2\pi/3$	$2\pi/3$
Форма и размеры (мм) коллекторного волновода	-	-	Прямоугольный, $5 \times 11 - 5 \times 10$	Цилиндрический, диаметр $9,6 - 7,3$
Диаметр пролетного отверстия, мм	8,56	11,43 – 7,86	11,43 – 7,86	11,21 – 7,77
Диаметр ячейки, мм	21,58	22,87 – 21,39	22,87 – 21,39	24,04 – 22,16
$\langle a \rangle / \lambda$	0,163	0,180	0,183	0,179
Толщина диафрагмы: у основания/ вблизи отверстия, мм	1,46	1,0 – 2,0	1,0 – 2,0	0,8/1,2 – 1,4/2,2
Время заполнения, нс	52	100	95	104
Погонное шунтовое сопротивление, МОм/м	88	67 - 88	66 - 84	77 – 102
Групповая скорость, $v_{гр}/c$	0,48	0,118 – 0,03	0,118 – 0,03	0,111 – 0,029
$\langle Q \rangle$, основная мода	~ 7000	~ 7000	~ 6800	~ 7800
$\langle Q \rangle$, нижняя дипольная мода	~ 6500	~ 6500	~ 1000	~ 1000
Диапазон расстройки ячеек на нижней дипольной моде, $\Delta f / \langle f_1 \rangle$	-	10,10%	10,159%	11,25
Полное затухание	0,267	0,505	0,508	0,483
Коэффициент перенапряжения, E_{\max} / E_r	2,30	3,06 – 2,10	3,06 – 2,10	3,00 – 2,0
Мощность для обеспечения градиента $\langle E_r \rangle = 50$ МВ/м	52	89	95	82

Для качественного описания процессов, происходящих в секции, рассмотрим строго периодическую структуру, образованную набором идентичных ячеек. На рис.5.8 показан график зависимости частоты трех нижних мод в зависимости от сдвига фазы на ячейку. Точками обозначены результаты расчета по программе MAFIA. Пунктирные линии получены с помощью расчета методом эквивалентных схем при нулевой связи ячеек с коллекторными волноводами. График из больших штриховых линий соответствует двум нижним дипольным модам, из коротких штриховых линий, а также сплошных линий на вставке в большем масштабе соответствует самому коллекторному волноводу. Коллекторный волновод имеет характер периодического волновода, показана только нижняя полоса его пропускания. Из рис. 5.8 видно, что связь имеет значительный эффект только в той области, где кривые, соответствующие случаю отсутствия связи между ячейками секции и волноводом, приближаются друг к другу. Типичным случаем, которого нужно избегать, является пересечение несвязанных линий (частота точки пересечения f_x). Проверка характеристик электромагнитного поля показывает четкое разделение мод в ячейке и в коллекторном волноводу за исключением областей пересечения кривых, где поля смешиваются. Частота синхронной моды f_s , определяется в точке пересечения прямой, которая соответствует фазовой скорости, равной скорости света, и нижней дипольной моды. Эта мода заключена в ячейке, почти не затухает и имеет характер волны TM -типа, которая сильно связана с пучком, двигающимся со скоростью света.

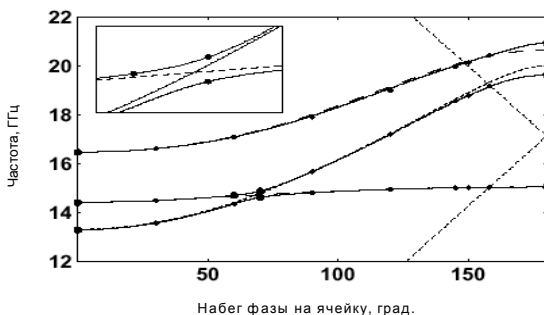


Рис. 5.8. Дисперсионная кривая секции

Поведение полей в DDS может быть понято при совместном рассмотрении свойств отдельных ячеек. На рис.5.9 представлен график частот f_x и f_s на видах колебаний 0 и π в зависимости от номера ячейки. Представленный диапазон частот ограничен областью, относящейся к нижнему дипольному типу волны. Вклад верхних дипольных типов волн пренебрежимо мал.

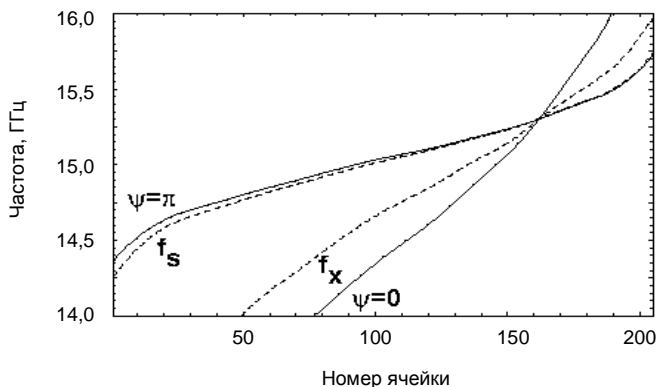


Рис. 5.9. Зависимости частот 0 и π видов от номера ячейки

Кривые получены из данных, соответствующих нижней дипольной моде несвязанных ячеек. Структура может рассматриваться как секция с медленно изменяющимися параметрами. В некотором диапазоне частот, присутствующем на обеих дисперсионных кривых (ускоряющей секции и коллекторного волновода), мода колебаний может рассматриваться как суперпозиция двух волн, распространяющихся в прямом и обратном направлениях. Такие моды локализованы в структуре, будучи заключены в нескольких ячейках. На частотах ниже этого диапазона моды заключены между входной ячейкой структуры и ячейкой, соответствующей линии нулевого фазового набега на ячейку. Аналогично, на частотах выше этого диапазона область локализации поля располагается между линией нулевого фазового набега на ячейку и выходной ячейкой структуры. Две кривые пересекаются потому, что связь ячеек, находящихся в конце секции, является различной для прямой и обратной волн. Моды с частотами, близкими к точкам пересечения,

локализованы в соответствующих ячейках. Смещенный от оси пучок возбуждает моду на частоте f в ячейках с резонансной частотой f_s , примерно равной f . Только такие моды вносят заметный вклад в наведенное поле. Таким образом, диапазон частот, в котором существует наведенное поле, ограничен диапазоном синхронных частот. Из рис.5.9 видно, что все такие моды имеют частоты, близкие к частоте, соответствующей точке пересечения. Физическую картину этого процесса можно трактовать следующим образом. Соответствующая мода возбуждается в соседних синхронных ячейках. Возбуждение распространяется вперед и назад с фазовым сдвигом между ячейками 0 и π , проходя точку пересечения при каждом пробеге. Энергия передается в коллекторные волноводы в ячейках, соответствующих точке пересечения, обеспечивая подавление соответствующих дипольных типов волн.

На локализацию большей части возбужденных пучком типов волн только в части ускоряющих ячеек указывают результаты расчетов методом эквивалентных схем, а также электродинамических расчетов для азимутально-симметричных структур. Корреляция частоты с номером ячейки представлена на рис.5.10, зависимость частоты от номера ячейки – на рис.5.11. Так как частота в соответствующей ячейке смещена по отношению к ее синхронной частоте, будем именовать их частотами связанных и несвязанных колебаний соответственно. При демпфировании поля проявляется следующий процесс. Рассмотрим его на примере моды 100 на частоте 14,836 ГГц. Мода локализована между ячейками 48 и 148. Пучок генерирует прямую волну, начиная с ячейки 55, которая распространяется в прямом направлении. Когда она проходит ячейки с номерами, близкими к 122, энергия поля поступает в коллекторный волновод, возбуждая при этом обратную волну. Остающаяся энергия частично отражается в области связи и в конце секции. Если выводимая в области связи энергия мала, можно принять, что амплитуды волн, распространяющихся в прямом и обратном направлениях, равны. Когда выводимая энергия велика, доминирует распространение волны в прямом направлении. Действительно, из рис.5.10 видно, что практически для всех важных мод распространение поля происходит в прямом направлении. Это сохраняется даже при изменении относительного расположения точек возбуж-

дения и вывода дипольной волны. Такое изменение происходит только в прямом направлении от точки пересечения кривых на рис.5.9, при этом групповая скорость в ячейке является отрицательной. Пучок наводит волну с положительной фазовой скоростью в ячейках, но волна возбуждения распространяется в обратном направлении и проходит ячейку связи, прежде чем отразиться. Ее фазовая скорость является положительной и возбуждает прямую волну в коллекторном волноводе. Таким образом, доминирующим является прямое распространение волн.

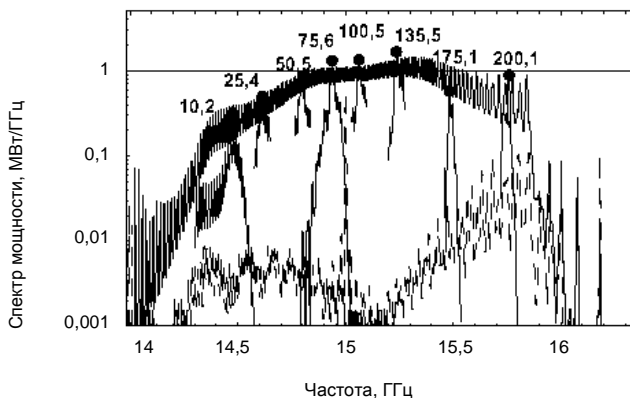


Рис.5.10. Спектр мощности, поступающей в коллекторные волноводы: сплошные линии – мощность, распространяющаяся вниз по волноводу, пунктирные – вверх по волноводу

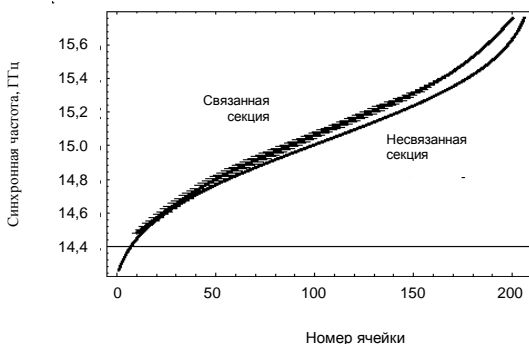


Рис. 5.11. Зависимость синхронной частоты связанной и несвязанной секции от номера ячейки

Поперечный импульс p_n , передаваемый заряду q_2 сгустка, проходящего через ускоряющую структуру длиной L на расстоянии Δl при смещении r_1 от оси структуры после заряда q_1 сгустка, возбуждающего поле, при скорости обоих сгустков, равной c , в терминах функции, описывающей наведенное поле, имеет следующий вид:

$$cp_n = q_1 q_2 r_1 L W(\Delta l). \quad (5.1)$$

$W(\Delta l)$ обычно выражается в терминах спектральной функции $S(f)$ следующим образом:

$$W(s) = \theta(s) \int_0^{\infty} S(f) \sin(2\pi \Delta l f / c) df, \quad (5.2)$$

где

$$S(f) = -4\text{Im}[Z(f - j\epsilon)]. \quad (5.3)$$

Здесь $Z(f)$ – сопротивление связи, то есть фурье-преобразование $W(\Delta l)$, выполненное вдоль действительной оси. Огибающая функции наведенного поля имеет вид:

$$\mathcal{W}(\Delta l) = \theta(\Delta l) \left| \int_0^{\infty} S(f) \exp(2\pi j \Delta l f / c) df \right|. \quad (5.4)$$

Приведенное определение справедливо для функции, характеризующей наведенное поле, в идеально отъюстированной структуре и при постоянном смещении пучка от оси вдоль всей структуры.

Для случая без демпфирования поля спектральная функция является суммой δ -функций, записываемых в виде:

$$S(f) = 2 \sum_p K_p \delta(f - f_p). \quad (5.5)$$

Здесь K_p – коэффициент потерь энергии пучка на высшей моде, f_p – частота соответствующей моды.

Чтобы показать вид спектральной функции для случая без демпфирования, удобно заменить ее сглаженной спектральной функцией $S_c(f)$, получаемой заменой $\delta(f - f_p)$ на $1/(f_{p+1} - f_p)$ на интервале $[f_p; f_{p+1}]$ и равной нулю в остальных областях. Поведение $W(\Delta l)$ для первых сгустков, следующих за возбуждающим сгустком, хорошо описывается S_c . Для DDS спектральная функция непрерывна в областях пропускания коллекторных волноводов. Дипольные мо-

ды подавляются в этом диапазоне частот, для неподавленных мод вне указанного диапазона коэффициент потерь энергии на ВВТ является отрицательным. Спектральная функция представляется как сумма вкладов от частично отраженных подавленных волн и осцилляций, обусловленных неподавленными модами S_c (рис.5.12). Сглаженная спектральная функция S_c может быть получена из модели несвязанных ячеек. Соответствующие частоты являются синхронными частотами ячеек, а коэффициент потерь энергии пучка представляет сумму коэффициентов потерь энергии отдельных ячеек.

Разработка конструкции осуществляется после выбора конфигурации ячеек и присоединяемых к ним коллекторных (двух либо четырех) волноводов, а также размеров, которые будут варьироваться при настройке элементов ускоряющей структуры. Основными требованиями к структуре являются: достижение максимально возможных шунтового сопротивления и добротности на основном типе волны, контроль и снижение поперечных полей. Коллекторные волноводы конструируются таким образом, чтобы в них распространялась единственная (наиболее опасная) дипольная мода, и они являлись запредельными для основного типа волны. Важными критериями при разработке структуры являются компактность, простота расчета и изготовления. Предъявляются также требования к возможности подстройки параметров при эксплуатации, минимальной деградации добротности и шунтового сопротивления, эффективности откачки. Было выяснено, что указанные требования могут быть выполнены с помощью подбора размеров отверстий для пролета пучка, отверстий связи с коллекторными волноводами, а также размеров коллекторных волноводов.

Следующим шагом является выбор профиля ускоряющих ячеек, в том числе параметров ячеек в зависимости от номера ячейки. Этот процесс является двухступенчатым. На основе качественных предположений о необходимой ширине полосы расстройки частот дипольных мод разрабатывается конструкция нескольких (10-11) ячеек. Первичным требованием является обеспечение настройки ячеек на основном типе волны. После этого рассматриваются дисперсионные кривые трех нижних дипольных типов волн, определяются синхронные частоты f_s и коэффициенты потерь энергии на высшей моде для каждой ячейки. Определяются законы изменения

размеров ячеек и параметров потерь энергии на высших модах в них на частоте f_s . Выбирается спектральная функция несвязанных ячеек $S_n(f)$, в качестве которой обычно используется обрезанный гауссиан. Это обеспечивает возможность определить f_s каждой ячейки и рассчитать наведенные поля в несвязанных ячейках. Следующим шагом является применение метода эквивалентных схем для цепочки связанных ячеек при определении их f_s . Это позволяет выяснить законы изменения размеров ячеек при известной связи между ними. Затем можно выбрать сглаженную спектральную функцию $S_c(f)$ для секции без демпфирования и вновь рассчитать наведенные поля в секции. При больших расхождениях спектральных функций следует уточнить частоты f_s отдельных ячеек. Такая процедура применялась при разработке нескольких типов ускоряющих структур. На этой стадии имеется достаточная информация для расчета характеристик наведенных полей в системе с демпфированием с помощью спектрального метода. Примеры таких расчетов приведены на рис.5.6, 5.12.

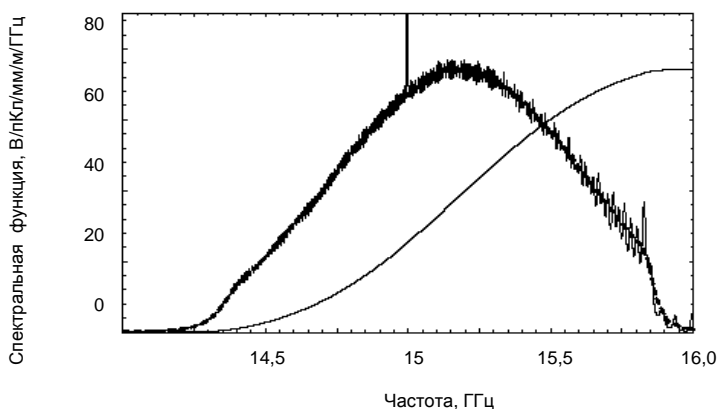


Рис. 5.12. Спектральная функция секции с коллекторными волноводами

Разработка нагрузок является важной частью конструирования секции. Расчеты показывают, что даже небольшое рассогласование приводит к значительному уменьшению поглощения дипольных типов волн. Коэффициент отражения от нагрузки в полосе частот

является осциллирующей функцией (рис.5.13). Соответствующая полученная экспериментально функция наведенного поля, показанная на рис.5.14, также имеет осциллирующий характер.

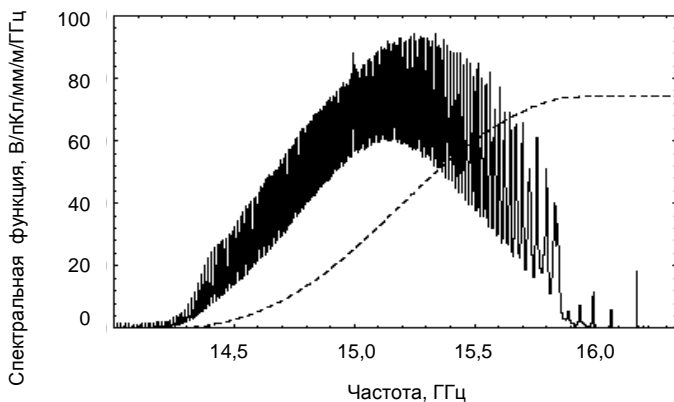


Рис. 5.13. Спектральная функция секции с коллекторными волноводами с учетом отражения от нагрузок

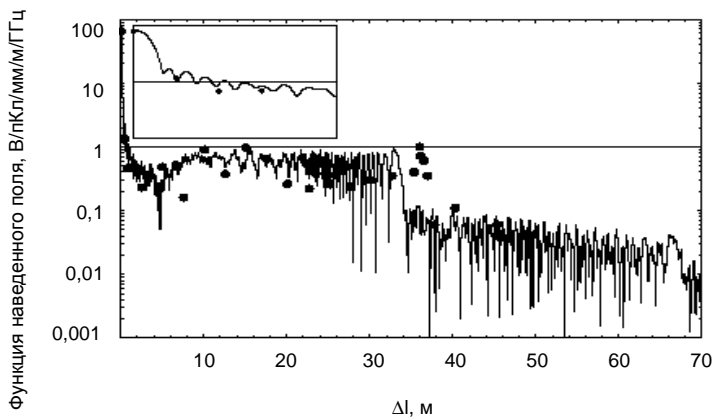


Рис.5.14. Зависимость функции наведенного поля от продольной координаты. Точки – экспериментальные данные, на вставке показана начальная часть (до 2 м)

Для того чтобы оптимизировать величину демпфирования в полосе частот, следует использовать в расчетах две или три системы

из 10 – 11 реперных ячеек. Затем, используя интерполяцию, можно подобрать коллекторные волноводы и размеры связи ячеек с волноводами таким образом, чтобы обеспечить максимальное сглаживание спектральной функции. Согласование нагрузки влияет на параметры демпфирования более существенно, чем параметры ячеек и коллекторного волновода. Вероятно, это объясняется пересвязью коллекторного волновода с ячейками в центральной части секции, тогда как вклад недосвязанных ячеек в конце секции несущественен.

Устройства ввода и вывода мощности ускоряющих структур являются важнейшими компонентами коллайдеров на высокие энергии. Их конструкция должна обеспечивать хорошее согласование подводящего волновода со структурой, минимальную асимметрию амплитуды и фазы поля, приводящую к смещению пучка от оси, ограничение электрического и магнитного полей на поверхности ячейки до допустимого уровня. Значительное электрическое поле приводит к пробоям, превышение номинального уровня магнитного поля обеспечивает значительные токи в стенках ячеек и локальный перегрев их поверхности.

Трансформатор типа волны с двумя волноводами является одним из наиболее часто используемых устройств ввода мощности, обеспечивающих уменьшение асимметрии поля в структуре. Остающаяся асимметрия поля, обуславливающая повышение электрического поля на поверхности ячейки, может быть скомпенсирована выбором формы стенок выходного трансформатора. Эта асимметрия является однозначной функцией геометрических размеров для пролета пучка (групповой скорости). Для средних значений групповой скорости (ниже $0,05c$) увеличение электрического поля составляет менее 2 – 3% от поля в ячейке, не являющейся трансформатором. На рис.5.15 представлены три типа трансформаторов с магнитной связью подводящих волноводов с ускоряющей секцией. Вариант а) является применяемым в действующих ускорителях симметризованным трансформатором типа волны, вариант б) разработан для коллайдера SBLC, вариант в) создан для коллайдера КЕК.

Для снижения магнитного поля на поверхности настраиваются два параметра: отверстие связи ячейки с волноводами и толщина

диафрагмы. Диаметр скругления диафрагмы выбирается равным его толщине. Распределение магнитного поля на поверхности диафрагмы связи показано на рис. 5.16. Нормирование амплитуды магнитного поля сделано на соответствующую амплитуду поля в регулярной ячейке структуры. Из этих данных видно, что значительная концентрация магнитного поля в трансформаторах такого типа является неизбежной, и она примерно вдвое превышает соответствующее значение в регулярной ячейке. Соответствующее импульсное повышение температуры вблизи отверстий связи из-за локального нагрева выше примерно в четыре раза.

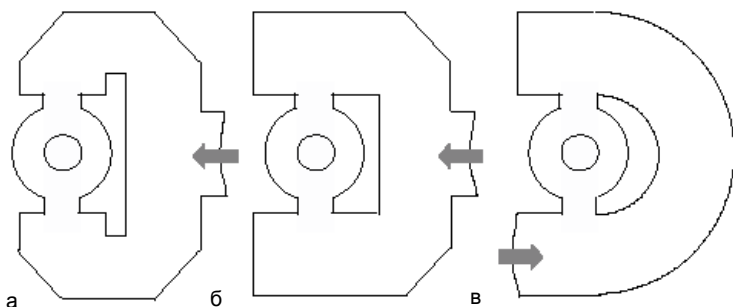


Рис.5.15. Схематическое изображения ТТВ:
а – стандартный, б – ускорителя SBLC, в – ускорителя КЕК JLC

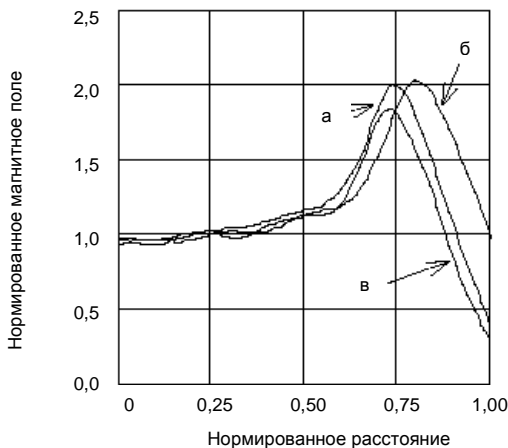


Рис. 5.16. Распределение магнитного поля в ускорителе на поверхности для трех типов ТТВ: а – в стандартном, б – в SBLC, в – в КЕК JLC

Для снижения уровня магнитного поля до допустимых величин предложен трансформатор с электрической связью подводящих волноводов с ячейкой структуры. В этой конструкции (рис.5.17) волновод пересекает структуру, оканчиваясь диафрагмой связи между волноводом и первой ячейкой структуры. Настройка осуществляется изменением радиуса диафрагмы связи и диаметра первой ячейки. Толщина диафрагмы и длина ячейки являются такими же как в регулярной ячейке. В таком трансформаторе максимальное поле на поверхности диафрагмы около 80% от величины поля в регулярной ячейке. Магнитное поле превышает поле в регулярной ячейке на 5%.

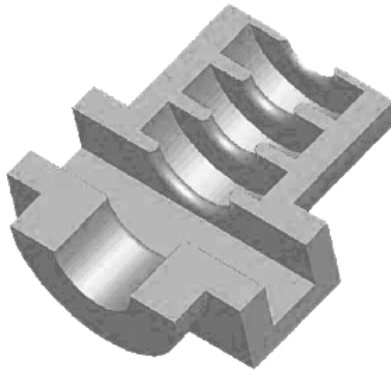


Рис. 5.17. Общий вид ТТВ

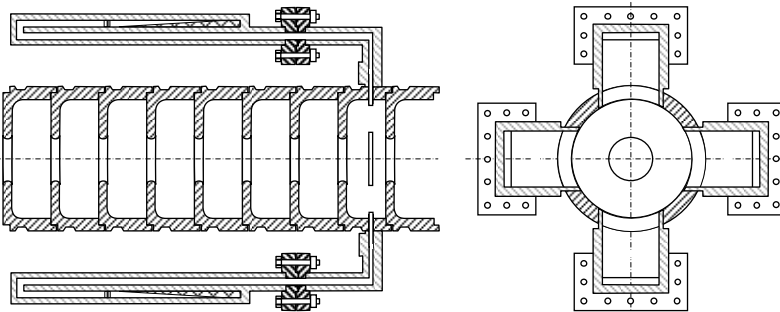


Рис. 5.18. Секция с волноводными выводами ВВТ (две проекции)

Устройства связи волноводного типа рассматриваются также для вывода ВВТ из ускоряющей структуры. Такими выводами оснащены секции ускорителя SBLC (рис.5.18). В каждой секции предусмотрены два вывода ВВТ с четырьмя ортогональными волноводами. Частота отсечки волновода равна 4 ГГц, это обеспечивает вывод первой дипольной моды из структуры. Связь волноводов с секцией осуществляется через азимутальные отверстия в ячейках. Исследования на макете показали достаточно высокую эффективность вывода энергии дипольных мод из ускоряющей структуры.

Наряду со структурой, оснащенной коллекторными волноводами, рассматриваются другие конструктивные решения. Так, в проекте коллайдера КЕК для подавления дипольных мод предложена ускоряющая структура с ячейками, снабженными дроссельными фильтрами. На рис.5.19 показан разрез структуры, включая монитор ВВТ, установленный в средней ячейке. Энергия асимметричных типов волн, возбужденных пучком рассеивается в поглотителях, изготовленных из SiC-керамики, установленных в медных ячейках на металлических пружинных держателях.

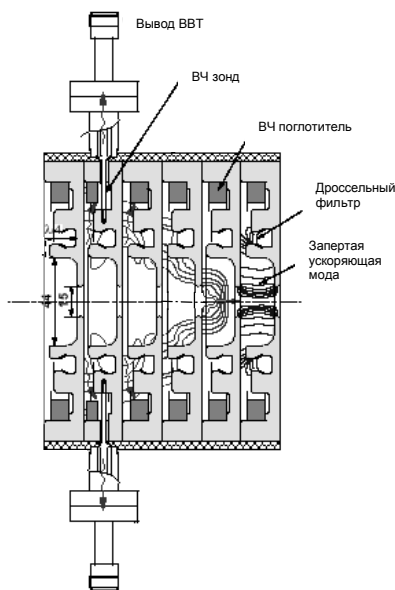


Рис. 5.19. Ускоряющая структура с дроссельным устройством вывода ВВТ

В этой структуре поглощение паразитных мод происходит в каждой ячейке в диапазоне частот. Дроссель используется как режекторный фильтр, который удерживает внутри ячейки поле рабочей моды, обеспечивая возможность получения высокого градиента ускоряющего поля. Необходимо применение широкополосной поглощающей нагрузки для излучаемой из секции цилиндрической волны. По сравнению с КДВ добротность такой секции на основной моде ниже на 13%, и около 13% энергии поля запасается в дроссельном фильтре. В связи с этим шунтовое сопротивление снижается на 25%. Так как энергия, излучаемая пучком на паразитных типах волн, снижается, для сохранения прежнего ускоряющего градиента необходимо увеличение мощности ВЧ питания составляет только 15%. Определенным недостатком структуры является то, что дроссельные фильтры имеют ограниченную рабочую полосу. Это снижает эффективность подавления мод высоких порядков.

Моделирование структуры первоначально проведено на макете, работающем в S -частотном диапазоне. В структуре ускорен пучок с градиентом 50 МВ/м при импульсной мощности питания 100 МВт. Полномасштабный макет структуры, работающей на частоте 5,712 ГГц (C -диапазон) испытан на установке ASSET. Макет представляет собой секцию, содержащую 89 ячеек, каждая из которых оснащена дроссельным поглотителем ВВТ. На концах секции установлены трансформаторы типа волны. На входе и выходе секции расположены датчики положения пучка. В средней ячейке расположен датчик ВВТ для определения спектра возбуждаемых пучком колебаний и определения положения пучка. Для устранения поперечного смещения пучка в трансформаторах типа волны они изготовлены с двумя подводными волноводами. Для обеспечения максимальной эффективности поглощения наиболее опасного нижнего дипольного типа волны были рассчитаны размеры кольца из SiC-керамики. При экспериментальных исследованиях в макетах применялись кольца трех различных размеров. Возбуждаемые паразитные поля в структуре получены усреднением полей, рассчитанных в 12 точках, равномерно расположенных вдоль структуры. Расчеты показали, что для второго (тестового) сгустка, проходящего структуру через 2,8 нс (0,84 м) после генерирующего сгустка, поля должны быть подавлены до уровня 0,5 В/пКЛ/м/мм. Эта вели-

чина меньше допустимого предела, равного $0,7 \text{ В/пКЛ/м/мм}$ и определяемого из условия ухудшения эмиттанса на 25%. С помощью расчетов выяснено, что некоторые моды, возбуждаемые на очень высоких частотах, могут оказаться запертыми, если они имеют узел поля в области щели связи с дроссельным устройством, и их энергия не может выводиться в поглотитель. Это обусловлено сделанными конструктивными изменениями. Для повышения шунтового сопротивления на 10% была изменена толщина диафрагм в ячейках с 4 до 3 мм. При этом распределение некоторых полей сместилось вдоль структуры так, что на щелях связи оказались узлы поля. Для устранения этого эффекта с помощью серии расчетов определены геометрические размеры ячеек, при которых узлы поля не приходятся на отверстия связи.

В ускорителе CLIC поперечное наведенное поле должно быть подавлено не менее, чем в 100 раз на интервале между сгустками, составляющем 0,67 нс. Для обеспечения такого демпфирования была разработана специальная структура, названная TDS (Tapered Damped Structure) с плавно изменяющимися размерами и выводом паразитных полей из ячеек. Общий вид структуры показан на рис.5.20.

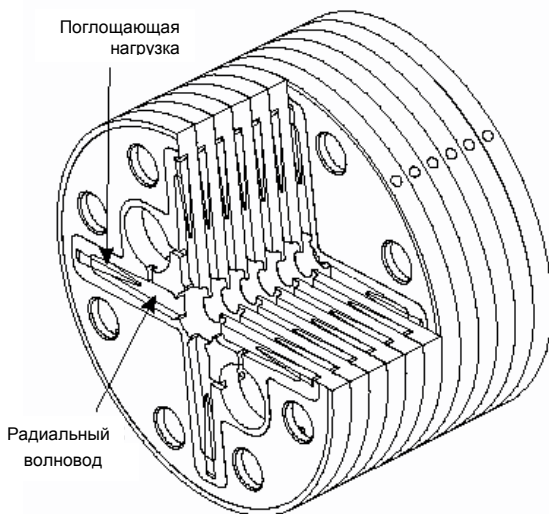


Рис. 5.20. Ускоряющая структура с радиальными волноводами для вывода ВВТ

К каждой из 150 ячеек секции подключены четыре индивидуально настраиваемых волновода, обеспечивающие вывод паразитных полей. Это позволяет сделать добротность секции на нижней дипольной моде менее 20. Волноводы имеют частоту отсечки, равную 33 ГГц, которая ниже частот паразитных мод, но выше частоты рабочей моды (30 ГГц). Диаметр ячейки и диафрагмы плавно изменяются вдоль структуры, чтобы обеспечить расширение спектра возбуждаемых дипольных мод и общую расстройку секции на дипольных модах. Диаметр диафрагмы изменяется с 4,5 до 3,5 мм. Расстройка приводит к нарушению когерентности наведенных полей в ячейках и, тем самым, дополнительному демпфированию паразитных полей. Волноводы, подключаемые к ячейкам, нагружены на клиновидные поглощающие нагрузки, изготовленные из карбида кремния. Коэффициент отражения от нагрузки не превышает 0,03.

Для экспериментальных исследований был изготовлен макет структуры с рабочей частотой 15 ГГц. Измерения характеристик макета структуры, выполненные на установке ASSET, показали хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Еще одним вариантом поглощения ВВТ, возбуждаемых пучком, является нанесение покрытия из материала, обладающего большим поверхностным сопротивлением в 10 – 20 раз, чем остальные части ячеек. Это уменьшает добротность на ускоряющей моде на 5%, но эффективное шунтовое сопротивление снижается менее чем на 2,6%. В секциях ускорителя SBLC, работающего в *S*-диапазоне, края диафрагм ячеек покрыты тонким слоем материала с большим поверхностным сопротивлением. Покрытие наносится не во всех ячейках, а только с 1-й по 20-ю (в секции, содержащей 121 ячейку). Совместно с выводами ВВТ (рис.5.18) такие поглотители обеспечивают эффективное демпфирование паразитных полей.

Эксперименты, проведенные в структурах с покрытиями из стали и тантала при градиенте поля 25 МВ/м без нагрузки током, показали отсутствие пробоев в структуре.

Достижение ускоряющих полей до 100 МВ/м возможно в структурах со стоячей волной, имеющих ряд преимуществ по сравнению со структурами с бегущей волной. Во-первых, при заданной величине ускоряющего градиента необходимая входная мощность при-

мерно пропорциональна длине. Для структуры со стоячей волной длина может быть сделана произвольно малой без потери эффективности ускорения. Во-вторых, структура имеет высокую добротность и коэффициент отражения от нее близок к единице при возникновении и горении в ней разряда. Это обеспечивает более высокую самозащиту такой структуры по сравнению со структурой с бегущей волной.

Для проверки эффективности ускоряющих секций со стоячей волной были исследованы две структуры длиной 20 и 30 см, работающие на π -виде и состоящие из 15 и 23 ячеек соответственно. Такая длина структур является компромиссом между реализацией необходимых допусков и стоимостью, возрастающей при увеличении числа коротких ускоряющих секций. На рис.5.21 представлено изображение секции, состоящей из 15 ячеек. Две такие секции прошли испытания на высоком уровне мощности. Резонатор имеет нечетное число ячеек, ввод мощности осуществляется в среднюю ячейку. При таком расположении устройства ввода мощности требования к допускам уменьшаются примерно в 4 раза, что обусловлено подавлением видов колебаний, ближайших к рабочему.

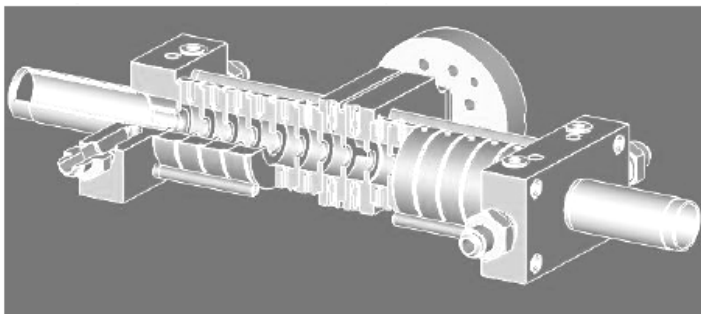


Рис. 5.21. Общий вид секции из 15 ячеек, работающей на π -виде

Резонаторы в каждой половине сборки питаются через волновод увеличенного размера, подключенный к направленному ответвителю, обеспечивающему передачу заданной мощности в резонатор. Отраженная от резонаторов мощность полностью отводится в поглощающие нагрузки при условии, что резонаторы имеют одинаковые характеристики (резонансные частоты, коэффициенты связи

с трактом). В этом случае сборка представляет собой для генератора согласованную нагрузку. Конечно, при возникновении пробоев в секции происходит ее рассогласование, однако, его вклад в общее отражение невелик и условия согласования входного сопротивления нарушаются мало.

В структурах со стоячей волной могут применяться те же методы расстройки и поглощения, что и в структурах с бегущей волной. Однако из-за малой длины структур реализация этих методов имеет особенности. Уменьшение диаметра пролетного канала с одновременным изменением диаметра ячейки является хорошим методом перестройки частоты дипольной моды при сохранении частоты основной моды на $\pi/2$ -виде. Уменьшая толщину диафрагм с одновременным уменьшением отверстий для пролета пучка, можно снизить разброс коэффициентов связи между ячейками вдоль секции на основной моде. Можно получить расстройку на 8% первой дипольной моды изменением связи с 5,2% в области больших пролетных отверстий до 2,2% – в области малых отверстий связи. Предполагается монотонно изменять размер отверстия, а значит и частоту дипольной моды от начала в сборке из 6 либо 9 резонаторов с общим числом ячеек, равным 135. На рис.5.22 представлены зависимости амплитуды и фазы от номера ячейки для каждой ячейки в резонаторе, состоящем из 15 ячеек, коэффициент связи между которыми изменяется с 3,5% до 2,2%. Резонаторы объединены в сборку из 6 секций. Фазовые сдвиги, обусловленные потоком мощности, могут быть компенсированы подстройкой длины ячеек так, чтобы сгустки находились на вершине поля в каждой ячейке. На рис.5.23 представлена дисперсионная кривая для каждой ячейки, если ее экстраполировать как периодическую структуру. Частоты ячеек на основной моде подстроены таким образом, чтобы обеспечить постоянное поле в них, которое требует, чтобы частоты π -вида для всех внутренних ячеек были равны 11,4 ГГц. Ячейки на концах структуры являются полными, а не полуячейками, поэтому они должны быть настроены так, чтобы частоты $\pi/2$ -вида в них равнялись 11,4 ГГц. В связи с малой длиной секции демпфирующие устройства должны быть установлены вне секций. В дрейфовых промежутках между каждой парой резонаторов из 23 ячеек и на краях сборки установлены резонаторы с низкой добротностью

(~10) для поглощения дипольных мод. Результаты расчета характеристик наведенного поля в такой сборке представлены на рис.5.24.

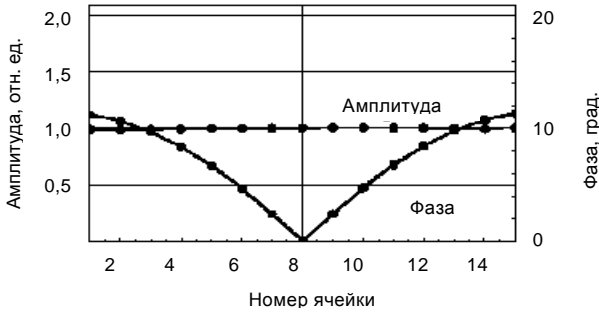


Рис. 5.22. Зависимости амплитуды и фазы основной моды от частоты в секции из 15 ячеек с расстройкой дипольной моды

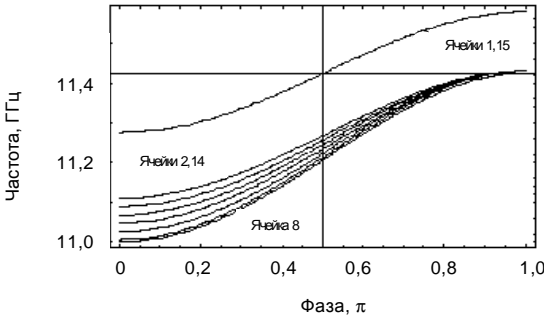


Рис. 5.23. Дисперсионная кривая секции из 15 ячеек с расстройкой дипольной моды

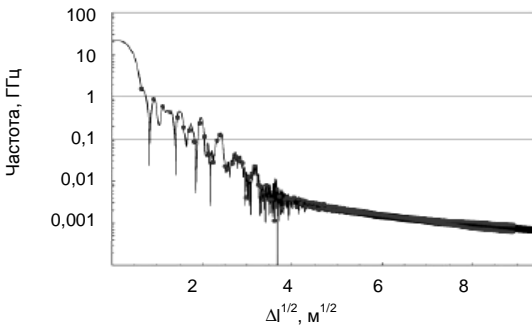


Рис. 5.24. Зависимость функции наведенного поля от продольной координаты в сборке из 6 секций, включающих 23 ячейки каждая

Введение магнитной связи между ячейками через секторные отверстия (рис.5.25) препятствует распространению почти всех дипольных типов волн вдоль структуры. Простым способом использования устройств магнитной связи между ячейками для вывода дипольных мод является изготовление трех секторных отверстий (рис.5.25). При этом в ускоряющий компонент поля не добавляются дипольный и квадрупольный компоненты.

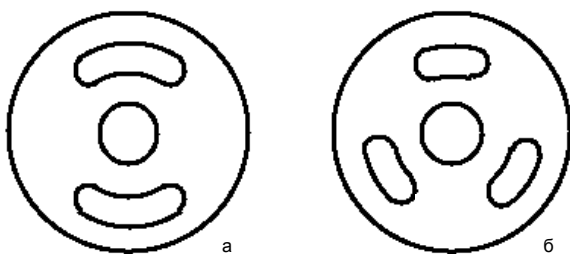


Рис. 5.25. Конфигурация диафрагм с двумя (а) и тремя (б) отверстиями связи по магнитному полю

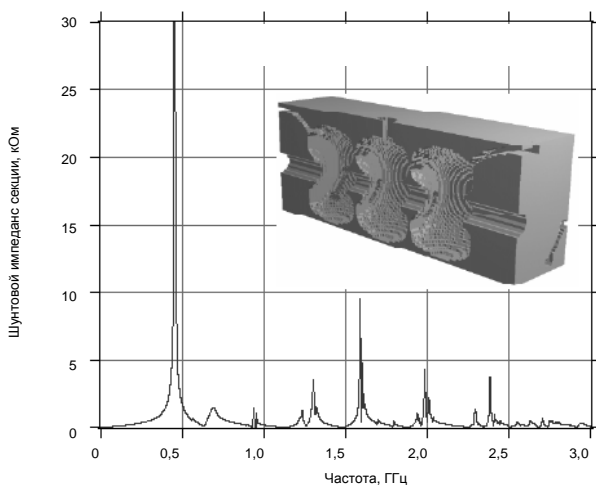


Рис. 5.26. Расчетная зависимость импеданса секции из трех ячеек с устройствами вывода ВВТ от частоты

На рис.5.26 представлены результаты расчета спектра продольного импеданса в структуре, состоящей из трех ячеек. Возбуждает-

ся большее число ВВТ, чем в отдельной ячейке, но даже без оптимизации формы ячеек общий импеданс секции на ВВТ не превышает суммарный импеданс трех ячеек и в секции не появляются новых запертых мод. Размеры отверстий связи определяются разностью частот 0 и π -видов и являются определяющими при выборе величины шунтового сопротивления на основной моде.

5.3. Подавление волн высших типов в сверхпроводящих структурах линейных ускорителей

Наибольшее развитие сверхпроводящих ускоряющих структур получило в DESY при создании коллайдера TESLA. Накопленный опыт показывает, что некоторые параметры резонаторов могут быть выбраны таким образом, чтобы уменьшить общую стоимость установки за счет увеличения эффективности работы ускоряющей системы. Этого можно достичь с помощью увеличения шунтового сопротивления секций. В конструкции ускоряющей системы каждый резонатор состоит из девяти слабосвязанных ячеек, работающих на π -виде колебаний на частоте 1,3 ГГц. Цепочку из восьми резонаторов, каждый из которых имеет трансформатор типа волны и два устройства подавления высших типов волн, помещают в единый криостат и охлаждают до температуры 2К. Форма резонаторов выбрана таким образом, чтобы обеспечить электрическое и магнитное поля на поверхности структуры ниже допустимого уровня, определяемого условиями развития мультипакторного разряда и квинч-эффекта, достичь высокого коэффициента связи (R/Q) на рабочей моде и получить малые величины импедансов связи на ВВТ. Уменьшение апертуры диафрагмы между ячейками обеспечивает выполнение компромисса между критериями, приведенными выше, но уменьшает коэффициент связи между ячейками. Это ведет к увеличению зависимости амплитуды поля от допусков на изготовление ячеек и оказывает существенное влияние на стоимость структуры. Для того чтобы избежать взаимодействия полей основной моды в различных секциях, расстояние между ними выбрано равным $3\lambda_{\text{осн}}/2$. Здесь $\lambda_{\text{осн}}$ – длина волны основной моды. Это уменьшает среднюю величину градиента ускоряющего поля.

Демпфирование ВВТ и повышение градиента могут быть достигнуты несколькими путями. При увеличении диаметра диафрагмы, а также отверстий для пролета пучка в крайних ячейках секции обеспечивается лучший вывод ВВТ из структуры в поглотители. Другим путем является ограничение числа ячеек в одной секции семью. Диаметр труб, соединяющих секции, увеличивается, а их длина делается равной $\lambda_{осн}/2$, что позволяет передавать мощность из резонатора в резонатор и сократить длину структуры. Сборка из четырех резонаторов (суперструктура) питается через один трансформатор типа волны.

Выбор профиля и размеров резонатора секции проиллюстрирован на рис. 5.27. Для сравнения приведены профиль и размеры базового резонатора. Каждая ячейка имеет эллиптический профиль на периферии и круговой с радиусом 17 мм вблизи отверстия для пролета пучка. Крайние ячейки имеют несколько меньший радиус на периферии для компенсации влияния отверстия для пролета пучка.

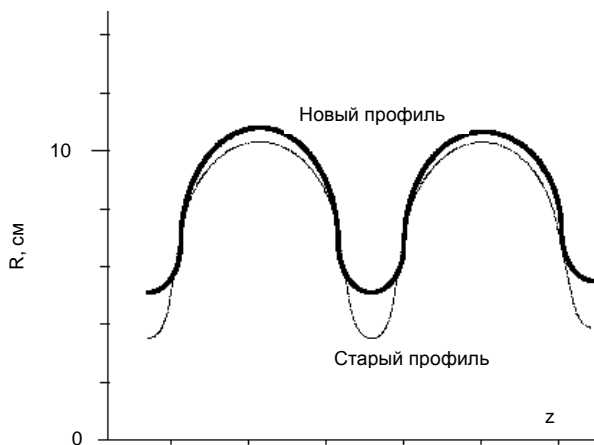


Рис. 5.27 Профиль резонатора в секции из девяти ячеек

Продольные (монополюсные) поля, наведенные сгустком, имеющим гауссово распределение частиц в сгустке и ширину на полувысоте $\sigma=1$ мм, в структуре, которая содержит девять ячеек, представлены на рис.5.28. Для сравнения приведены характеристики

полей, наводимых в двух типах ячеек. На рис.5.29 дан график зависимости коэффициента потерь энергии от частоты для $\sigma=1\text{мм}$.

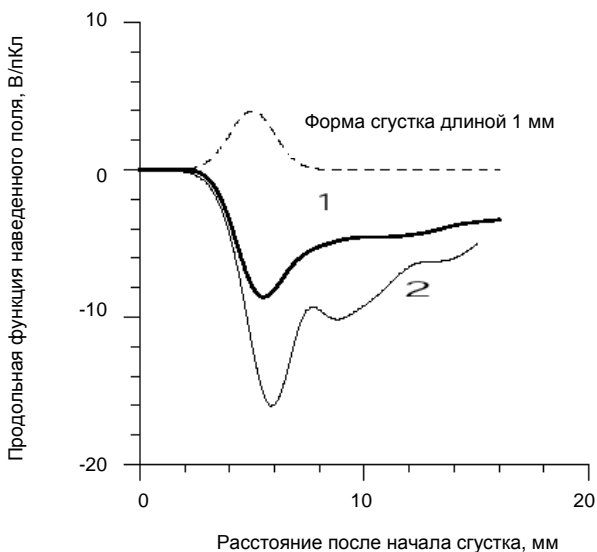


Рис. 5.28. Зависимость продольной функции наведенного поля от координаты в секции из девяти ячеек: 1 – резонатор с новым профилем, $k_{1|}=6,5$ В/пКл, 2 – резонатор со старым профилем, $k_{1|}=11$ В/пКл

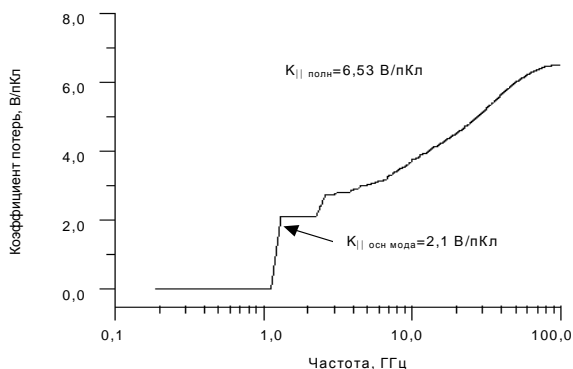


Рис. 5.29. Зависимость коэффициента потерь энергии в суперструктуре из четырех резонаторов от частоты для сгустка длиной 1 мм

Ступеньки на графике (см. рис.5.29) соответствуют резонансным модам с продольным компонентом поля на оси структуры. При оптимизации формы резонатора ускоряющей секции коэффициент потерь энергии уменьшается в 1,7 раза, коэффициент потерь энергии пучка – в 3,3 раза. На ВВТ $k_{\parallel}=4,4$ В/пКл вместо $k_{\parallel}=8,97$ В/пКл для базового варианта, соответственно, $k_{\perp}=6,21$ В/пКл/м и $k_{\perp}=20,6$ В/пКл/м. Расчетные ограничения для коллайдера TESLA составляют: $k_{\parallel} \leq 8$ В/пКл, $k_{\perp} \leq 18$ В/пКл/м для сгустка $\sigma=1$ мм.

В проекте TESLA рассмотрены несколько вариантов построения ВЧ системы ускорителя. Одним из них является суперструктура, объединяющая несколько резонаторов. Суперструктура сохраняет первоначальные размеры отдельной ячейки, но число ячеек в одном резонаторе уменьшается до семи. Сборка, состоящая из четырех слабосвязанных и независимо настраиваемых резонаторов, является суперструктурой, имеющей 28 супермод. Число входных трансформаторов типа волны соответственно уменьшается более, чем в три раза для суперструктуры из четырех резонаторов. Общая длина ускорителя становится меньше примерно на 20%. Ограничение на число ячеек в резонаторе обусловлено необходимостью обеспечения стабильности амплитуды поля в отдельных ячейках.

Так как резонаторы являются связанными в суперструктуре, оп-ределение наведенных полей должно проводиться в структуре целиком. Расчеты сделаны для отдельного резонатора, состоящего из 7 ячеек, двух резонаторов и четырех резонаторов в суперструктуре. Наведенные поля, возбуждаемые в суперструктуре, состоящей из четырех резонаторов сгустками с $\sigma=1$ мм и 0,5 мм, представлены на рис.5.30. Для сравнения характеристик структуры, состоящей из 9 ячеек, и суперструктуры определен коэффициент потерь энергии на одну ячейку. Для k_{\parallel} разница не превышает 2%, для $k_{\perp}/\text{яч}$ эта величина меньше примерно на 18% для суперструктуры. Кроме того, оказалось, трудно технологически выполнить изготовление ниобиевой суперструктуры без ухудшения ее электродинамических свойств.

Таким образом, перспективным является применение резонатора, состоящего из девяти ячеек с увеличенными размерами отверстий для пролета пучка, в котором уменьшены потери на возбуждение полей ВВТ. В связи с этим дальнейшие исследования прово-

дятся на резонаторах, состоящих из девяти ячеек, причем теперь предполагается питать от ВЧ источника по два резонатора вместе, что уменьшает вдвое число вводов мощности.

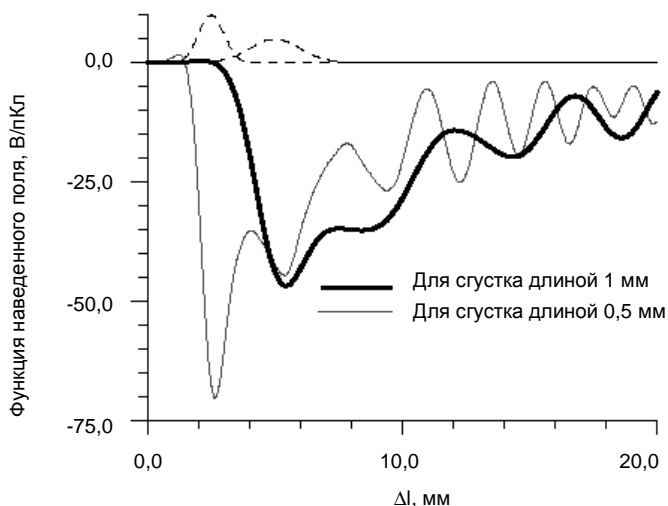


Рис. 5.30. Зависимость продольной функции наведенного поля от продольной координаты в суперструктуре из четырех резонаторов

Типы колебаний высших порядков должны быть подавлены для предотвращения нестабильностей в многосгустковых пучках. Снижение добротности секции на резонансных частотах ВВТ уменьшает амплитуды полей, возбуждаемых пучком на этих типах. Это достигается установкой устройств вывода энергии паразитных мод в каналах для пролета пучка с обеих сторон от секций. Конструктивное исполнение устройств вывода может быть различным. Они могут содержать как коаксиальные, так и волноводные узлы связи канала с внешними поглощающими нагрузками. Наиболее разработанными являются коаксиальные выводы мощности, предложенные в ускорительных центрах FERMILAB (США), SACLAY (Франция) и DESY (Германия). Добротность секции на основном типе волны составляет $\sim 10^9$, на двух первых дипольных модах она должна быть снижена до уровня $\sim 10^4$. Дипольные моды более высокого порядка имеют резонансные частоты, лежащие выше частоты отсечки канала для пролета пучка. Эти моды могут распростра-

няться не только до ближайшего, но и до следующих устройств вывода энергии паразитных типов волн. Для поглощения более высоких типов волн угол между двумя соседними устройствами вывода выбран равным 115° .

В исследованиях характеристик ВВТ обнаружена аномально высокая амплитуда третьей дипольной моды, сравнимая с первой дипольной модой. Для анализа характеристик структуры на частотах дипольной моды целесообразно воспользоваться методикой матриц рассеяния. Ускоряющий модуль разбит на компоненты: ускоряющая секция, устройство вывода ВВТ, устройство вывода ВВТ совместно с трансформатором типа волны, сильфоны, холодное и теплое окна, коаксиально-волноводные переходы. Для каждого компонента определена его матрица рассеяния. Эти компоненты присоединены к волноводам либо к нагрузкам с известным импедансом. Зависимости коэффициентов передачи или отражения от частоты позволяют определить резонансные частоты и добротности на возбуждаемых типах волн.

Конструкции устройств связи для вывода ВВТ, установленных вверх по движению пучка, показаны на рис.5.31.

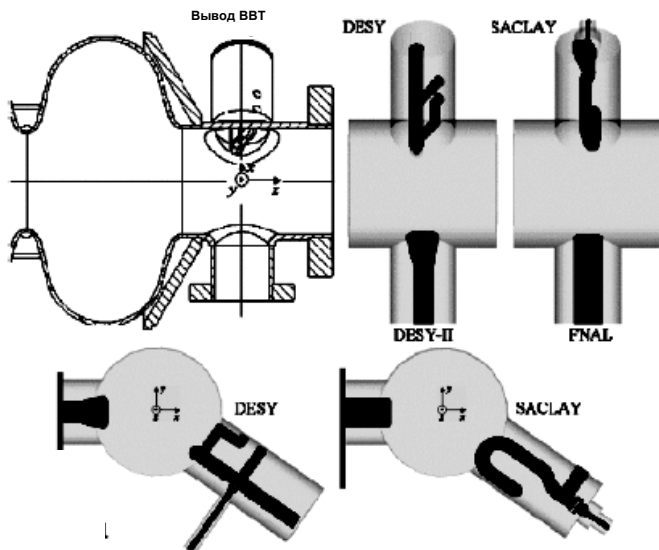


Рис. 5.31. Общий вид коаксиальных выводов ВВТ

Устройства выполнены на основе коаксиальной линии с петлей связи. Волновое сопротивление линии равно 50 Ом. Вне криостата линия подключена к нагрузке. Угол между горизонтальной осью и осью передающей линии – 150° . Оба типа устройств связи различаются ориентацией петли и конструкцией режекторного фильтра, препятствующего выводу энергии ускоряющей моды из секции.

Устройство связи для вывода ВВТ, установленного вниз по движению пучка, а также ввод мощности (трансформатор типа волны) имеют одинаковую ориентацию относительно оси секции. Устройства вывода ВВТ, расположенные вверх и вниз по движению пучка, имеют одинаковую конструкцию, но различную ориентацию. Переход от нижнего устройства к верхнему осуществляется поворотом на 5° относительно оси z и на 180° относительно оси y .

Зависимости коэффициентов передачи разработанных в DESY устройств вывода ВВТ от частоты приведены на рис.5.32. Видно, что величина связи для волн с горизонтальной поляризацией достаточно велика (0,35 – 0,40) и почти на порядок ниже для волн с вертикальной поляризацией. Для устройств вывода, разработанных в SACLAУ, обратная картина. Для волн с вертикальной поляризацией коэффициент связи составляет 0,35 – 0,50, а с горизонтальной – не более 0,05. Модификация конструкции устройства вывода с помощью изменения формы петель связи обеспечивает лучший баланс подавления волн с различной поляризацией.

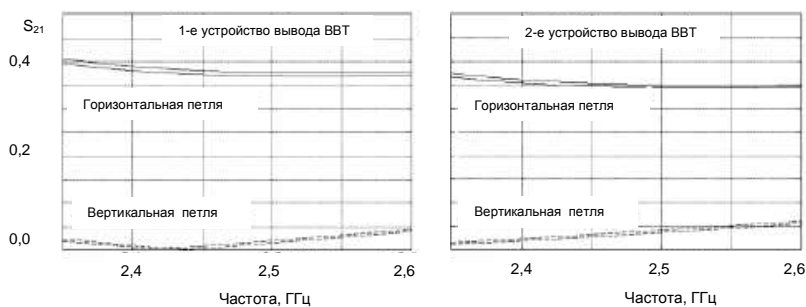


Рис. 5.32. Зависимости коэффициентов передачи ВЧ мощности из волновода в нагрузку от частоты

Проведенные расчеты характеристик модулей, содержащих 8 резонаторов с устройствами вывода ВВТ модифицированной конструкции, показывают их эффективность. Установка этих устройств связи позволила уменьшить добротность на некоторых модах на порядок при сохранении добротности на основном типе волны (см. рис.5.33).

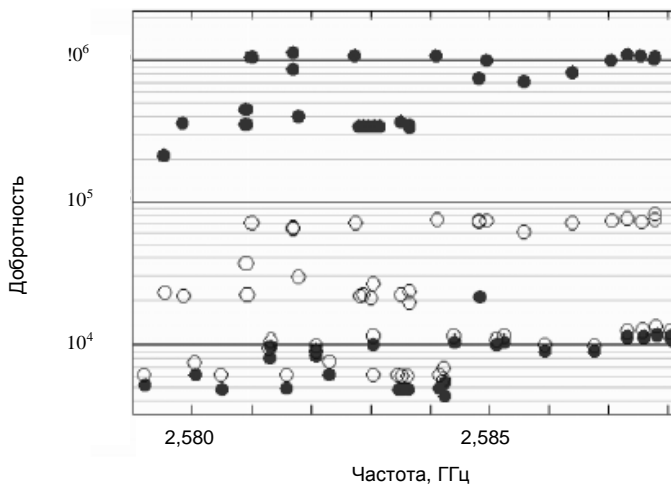


Рис. 5.33. Зависимости добротности резонаторов от частоты при стохастической расстройке ячеек на третьей дипольной моде: точки – до модификации устройств связи, кружки – после модификации

Устройства вывода ВВТ могут быть выполнены также на основе волновода прямоугольного сечения. Такие узлы так же, как и коаксиальные устройства вывода, устанавливаются между ускоряющими секциями в канале для пролета пучка. Сечение волновода может быть ориентировано вдоль оси структуры (устройство вывода с продольной щелью связи 1), перпендикулярно ей (устройство вывода с азимутальной щелью связи 2) либо под некоторым углом к оси (устройство вывода с наклонной щелью связи 3) (рис.5.34). Ускоряющие секции 4,5 снабжены вводом мощности β на основном типе. Этим вводом является волноводный трансформатор типа волны, установленный между резонаторами, образующими суперструктуру. Устройство вывода ВВТ, состоящее из трех волноводов,

подключенных к азимутальным щелям в канале для пролета пучка, не обеспечивает достаточного поглощения опасных типов волн. Устройство вывода ВВТ, образованное двумя волноводами, подключенными к продольным щелям в канале для пролета пучка, эффективно выводит энергию ВВТ, однако для его расположения в суперструктуре недостаточно места в канале для пролета пучка между двумя секциями, и оно может быть установлено только на концах суперструктуры.

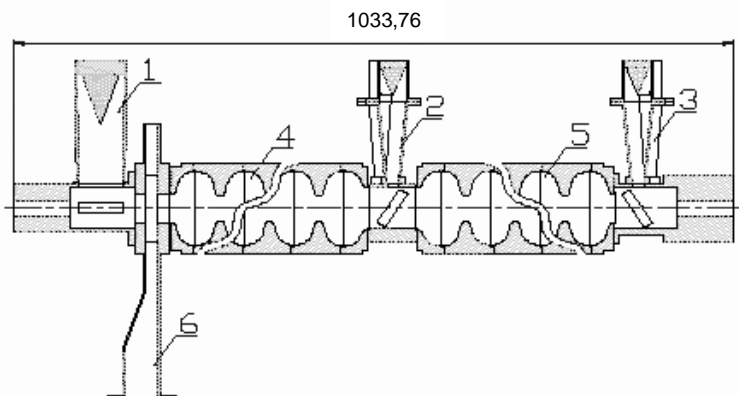


Рис. 5.34. Ускоряющая секция с волноводными выводами ВВТ

Устройство вывода с щелями, расположенными под углом к оси структуры, может быть размещено между секциями, и оно обладает достаточной эффективностью вывода ВВТ. Для предотвращения выхода из секции волны основного типа в устройствах вывода ВВТ использованы режекторные фильтры. Размеры волновода для устройств вывода ВВТ выбраны равными $110 \times 20 \text{ мм}^2$, для ввода основной волны $70 \times 20 \text{ мм}^2$. Для уменьшения продольных размеров волноводов использованы волноводные переходы с 110 мм на 95 мм по широкой стенке и с 20 на 10 мм – по узкой стенке волновода. Нижняя дипольная мода возбуждает в канале для пролета пучка волну H_{11} -типа. Компонент H_z этой волны обеспечивает сильную связь с волной H_{10} -типа в прямоугольном волноводе при продольной ориентировке его поперечного сечения по отношению к оси структуры.

Существование запертых высших типов волн в ускоряющих резонаторах может представлять серьезную проблему. Ячейки секции имеют примерно одинаковые размеры за исключением ячеек, находящихся на ее краях. Это сделано для обеспечения равномерного распределения поля на ускоряющей моде вдоль всей секции. Из-за неоднородности геометрии ячеек возможно появление запертых мод в самой секции и каналах для пролета пучка на частотах выше их частоты отсечки. Запертые в канале для пролета пучка моды не опасны, так как их энергия рассеивается в демпферах. Напротив, волны, запертые в секции, имеют небольшие амплитуды в крайних ячейках и поэтому связь с демпферами мала либо даже полностью отсутствует. Обычно запертые моды имеют малое характеристическое сопротивление (R/Q), составляющее от нескольких единиц до десятков ом. Влияние этих типов волн на динамику пучка невелико, однако, накопление энергии ВВТ может привести к развитию неустойчивости пучка.

Исследование характеристик запертых в структуре типов волн осуществляется расчетными и экспериментальными методами. С помощью программы MAFIA рассчитывается шунтовое сопротивление как на монополярных, так и дипольных модах. Распределение поля на исследуемых модах измеряется методом резонансных возмущений при перемещении вдоль оси секции цилиндрического возмущающего тела. Запертые моды возбуждаются в структуре с помощью малых петель, установленных в ячейках, в которых ожидалась достаточно большие амплитуды полей. Определяется коэффициент передачи сигнала (S_{21}) между петлями связи. Запертые моды возбуждаются на таких частотах, когда коэффициент передачи почти не зависит от положения короткозамыкающих поршней, установленных в каналах для пролета пучка, что указывает на отсутствие связи с каналами для пролета пучка и демпферами, расположенными в них. На этих частотах с помощью возмущающего тела проверяется наличие локализованного электрического поля на оси структуры. Однако даже на высоких частотах происходит перекрытие полос пропускания различных типов волн. Из-за этого сложно определить все запертые типы волн. Для преодоления этой трудности использованы результаты предварительных расчетов с помощью программы MAFIA. Метод, примененный при расчетах, аналогичен использованному в экспериментах. Определяется раз-

ница частот на собственной моде при двух различных граничных условиях в канале для пролета пучка. Большая разница частот на собственной моде указывает на то, что поле распространяется в канал и сама мода не является запертой. Для первого расчета граничным условием является идеальная электрическая стенка, для второго – идеальная магнитная стенка в торцах входного и выходного каналов для пролета пучка. Расстояние от стенки до края структуры выбирается равным $3/4\lambda_{осн}$. На таком расстоянии стенки не оказывают влияния на параметры типов волн, возбуждаемых на частотах ниже частоты отсечки канала для пролета пучка, в частности, основной моды на частоте 1,3 ГГц.

На рис.5.35 показана зависимость сдвига частоты при различных граничных условиях от номера моды в той последовательности, как эти моды появляются в расчете.

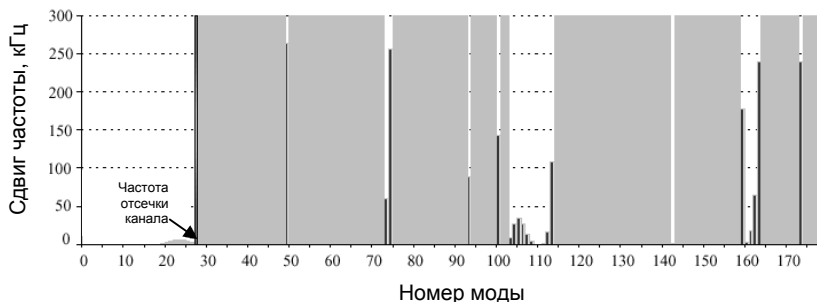


Рис. 5.35. Зависимость сдвига частот монополярных мод относительно рабочей частоты от номера моды

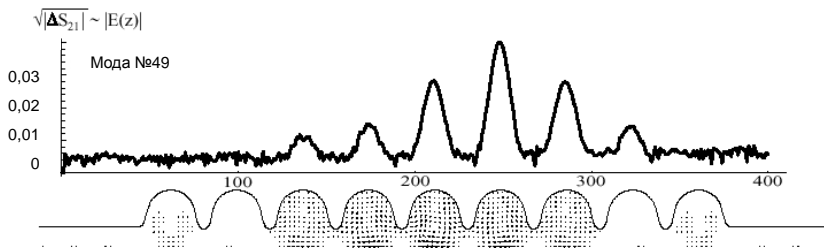


Рис. 5.36. Эпюра и распределение электрического поля запертой монополярной моды вдоль оси секции

Для запертых мод сдвиг частоты должен быть минимальным. Первый локальный минимум появляется на моде № 49. Экспериментально полученное распределение поля приведено на рис.5.36. Некоторая асимметрия поля относительно середины секции объясняется допусками на изготовление и сборку ячеек.

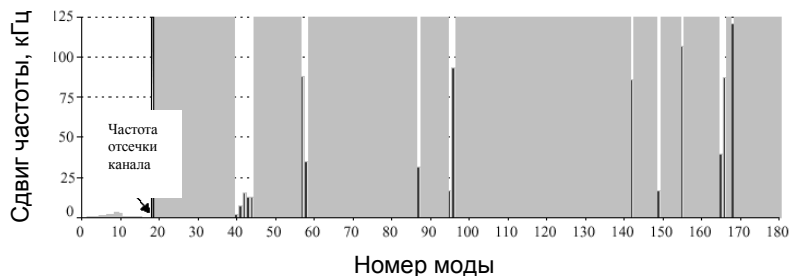


Рис. 5.37. Зависимость сдвига частот дипольных мод относительно рабочей частоты от номера моды

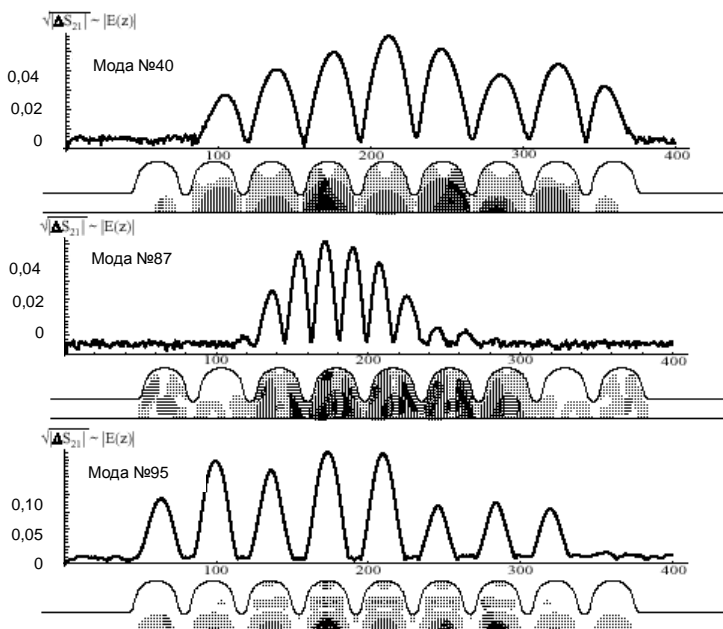


Рис. 5.38. Эпюры и распределения электрического поля запертых дипольных мод вдоль оси секции

Аналогичные исследования проведены для дипольных мод. На рис.5.37 представлена зависимость сдвига частоты от номера моды. Две первые полосы передачи (моды № 1-18) лежат ниже частоты отсечки ($f_{TE11}=2,25$ ГГц), поэтому поля в канале для пролета пучка вызывают малый сдвиг частоты на этих модах. Первой запертой модой на частоте выше частоты отсечки является мода № 40. На рис.5.38 приведены распределения электрического поля на оси структуры для мод № 40,87,95.

Полученные данные позволяют оценить мощность возбуждаемых запертых мод. Для резонатора из девяти ячеек она составляет 77 Вт. Каждый модуль включает восемь резонаторов. Скважность работы ускорителя TESLA составляет 200, добавочное рассеяние мощности в модуле – $\Delta P=77\text{Вт}\cdot 8/200=3,1\text{Вт}$. Это соответствует увеличению рассеиваемой в модуле мощности на 29%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная физика высоких энергий находится на новом этапе своего развития, связанном с созданием ускорителей и коллайдеров с энергией частиц, лежащей в области нескольких тераэлектрон-вольт. Продвижение в область все больших энергий связано с возрастающими трудностями получения интенсивных пучков с малыми поперечными размерами. Исследование процессов, протекающих при ускорении частиц и развитии неустойчивостей динамики пучка, является важнейшей задачей ускорительной физики и техники. Особенно актуальным является развитие методов борьбы с полями волн высших типов, генерируемых пучком в ускорительном канале и приводящих к потере энергии частиц и разрушению ступков. Изложенный материал знакомит с достижениями ускорительных центров мира в решении этой задачи. Резюмируя сказанное, кратко перечислим достижения последних лет, сделавшие возможным проектирование и решение многих проблем разработки коллайдеров следующего поколения:

- Создание пакетов прикладных программ, обеспечивающих трехмерный электродинамический расчет периодических и непериодических устройств сложной конфигурации. Разработка алгоритмов и аппаратных средств, позволяющих получить результаты с

точностью, необходимой для определения оптимальной конфигурации и геометрических размеров этих устройств.

- Развитие приборного парка, позволяющего проводить измерения характеристик ускоряющих секций и других элементов ВЧ систем в широкой полосе частот – от единиц до сотен гигагерц.
- Развитие технологий создания СВЧ устройств, устойчиво и надежно функционирующих в сверхпроводящем режиме при высоком уровне мощности.
- Создание методов изготовления и настройки ускоряющих структур, работающих в диапазоне частот несколько десятков гигагерц. Решение проблем реализации микронных допусков при массовом изготовлении секций и юстировке секций в ускорительном канале.
- Создание генераторов, работающих в диапазоне десятков гигагерц и обладающих мощностью в десятки мегаватт.
- Исследование вопросов повышения электрической прочности ускоряющих секций при сверхвысоких градиентах ускоряющего поля и обеспечения надежной работы в режиме долговременной эксплуатации.
- Создание и испытания полномасштабных макетов ускоряющих секций, работающих при нормальной температуре и в сверхпроводящем режиме и обеспечивающих ускорение интенсивных пучков с рекордными значениями градиента ускоряющего поля.

КРАТКИЙ СЛОВАРЬ АНГЛОЯЗЫЧНЫХ ТЕРМИНОВ

- Choke – mode accelerating structure ускоряющая структура с дроссельным поглотителем высших типов волн
- Collider – коллайдер, столкновитель
- Coupler – устройство связи ускоряющей секции с внешними устройствами
- Damped structure – структура с рассеянием (поглощением) полей высших типов
- Detuned structure – структура с расстройкой ячеек на частотах полей высших типов
- Dipole mode – дипольная мода, дипольный тип волны
- FM (Fundamental Mode) coupler – устройство ввода мощности в секцию, трансформатор типа волны
- HOM (High Order Mode) – волна высшего типа (BBT), высшая мода
- HOM coupler – устройство вывода высших типов волн
- Kick factor – коэффициент потерь энергии на высшей моде, коэффициент потерь энергии при поперечном смещении пучка
- Long range wake field – наведенное поле с дальнодействием
- Loss factor – коэффициент потерь энергии
- Longitudinal loss factor – коэффициент потерь энергии на основной моде, коэффициент потерь энергии в продольном поле на оси структуры
- Manifold – коллекторный волновод
- Monopole mode – монополярная мода, аксиально-симметричная мода
- Short range wake field – наведенное поле ближнего действия
- Source charge – заряд-источник, возбуждающий в ускоряющей структуре электромагнитное поле
- Tapered structure – структура с плавно изменяющимися размерами
- Trapped mode – запертый тип волны
- Wake field, wake – наведенное поле
- Wake function – функция, характеризующая наведенное поле
- Wake potential – наведенный потенциал
- Witness charge – тестовый (информационный) заряд, находящийся под действием электромагнитного поля, возбужденного зарядом-источником, прошедшим перед ним

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев Б.В., Собенин Н.П. Электродинамические характеристики ускоряющих резонаторов. М.: Энергоатомиздат, 1993.
2. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. М.: Энергоатомиздат, 1983. Т.1-3.
3. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1972, Т.1,2.
4. Вальднер О.А., Собенин Н.П., Зверев Б.В., Щедрин И.С. Диафрагмированные волноводы: Справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Линейные ускорители ионов/ Под ред. Б.П. Мурина. М.: Атомиздат, 1978, Т.1,2.
6. Милованов О.С., Пятнов Е.Г., Собенин Н.П. Высокочастотные характеристики линейных ускорителей электронов. М.: МИФИ, 1988.
7. Балакин В.Е., Собенин Н.П., Соляк Н.А. Линейные коллайдеры: Конспект лекций. М.: МИФИ, 1993.
8. Федоров Н.Н. Основы электродинамики. М.: Высшая школа, 1980.
9. Труды международных конференций по ускорителям заряженных частиц, сайт: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/>

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ОБЗОР ДЕЙСТВУЮЩИХ И РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	7
1.1. Циклические коллайдеры	8
1.1.1. Протон-протонные коллайдеры	8
1.1.2. Электрон-ионные коллайдеры	10
1.1.3. Коллайдеры легких частиц	11
1.2. Линейные электрон-позитронные коллайдеры	12
Глава 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУРАХ	16
2.1. Ускоряющие структуры циклических и линейных коллайдеров	16
2.2. Количественные характеристики электромагнитных полей, возбуждаемых пучком	20
Глава 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР	26
3.1. Расчетные методы	26
3.2. Экспериментальные методы	31
3.2.1. Метод малых возмущений	31
3.2.2. Метод модельных измерений ВЧ характеристик устройств	35
3.2.3. Метод прямых измерений полей высших типов, возбуждаемых пучком	41
Глава 4. МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ТИПОВ ВОЛН НА УСКОРЕННЫЙ ПУЧОК	43
4.1. Характеристики дипольных полей	43
4.2. Демпфирование полей внутри сгустка	48
4.3. Демпфирование полей в промежутке времени между сгустками	50
4.4. Взаимная расстройка ячеек	52
4.5. Взаимная расстройка секций	54
4.6. Расстройка параметров ячеек и поглощение энергии волн высших типов	55
4.7. Эффекты в структурах под воздействием мощных ВЧ полей	57
Глава 5. КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРЫ УСТРОЙСТВ ДЕМПФИРОВАНИЯ ВОЛН ВЫСШИХ ТИПОВ В УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУРАХ	59
5.1. Подавление волн высших типов в ускоряющих структурах циклических ускорителей	60
5.2. Подавление волн высших типов в структурах линейных ускорителей, работающих при нормальной температуре	65
5.3. Подавление волн высших типов в сверхпроводящих структурах линейных ускорителей	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
КРАТКИЙ СЛОВАРЬ АНГЛОЯЗЫЧНЫХ ТЕРМИНОВ	102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	103