

На правах рукописи

Шашков Ярослав Васильевич

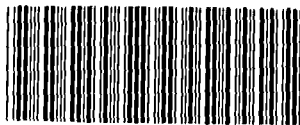
**ДЕМПФИРОВАНИЕ ВОЛН ВЫСШИХ ТИПОВ В
МОДЕРНИЗИРУЕМЫХ УСКОРЯЮЩИХ
СТРУКТУРАХ БОЛЬШОГО АДРОННОГО
КОЛЛАЙДЕРА**

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

25 ОКТ 2017

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Автор:



008711024

Москва – 2017

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель: **Собенин Николай Павлович**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Электрофизические
установки» Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ»

Официальные оппоненты: **Шведун В.И.** **Василий Иванович**,
доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник
Научно-исследовательского института ядерной
физики им. Д.В. Скобельцына Московского
государственного университета
им. М.В. Ломоносова

Завадцев Дмитрий Александрович
кандидат технических наук,
заместитель директора компании ООО “Нано
Инвест”

Ведущая организация: **Институт ядерных исследований Российской
Академии наук (ИЯИ РАН)**

Защита состоится 22 ноября 2017 г. в 14 часов 30 минут на заседании
диссертационного совета Д 212.130.01 на базе НИЯУ МИФИ по адресу:
115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, тел. (495) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте
<http://ods.mephi.ru>

Автореферат разослан «18» 10 2017 г.

И. о. учёного секретаря
диссертационного совета



Масленников С.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

В настоящее время в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) разрабатывается проект Повышения Светимости Большого Адронного Коллайдера (ПС-БАК), (High Luminosity Large Hadron Collider, HL-LHC), [1]. Для расширения исследовательского потенциала БАК потребуется его существенная модернизация, в частности, увеличение светимости коллайдера на порядок до значения $10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

При реализации этого проекта рассматривается возможность применения гармонических резонаторов в дополнении к основным СВЧ ускоряющим резонаторам для удлинения (или укорочения) циркулирующих сгустков заряженных частиц. При добавлении и фазировании сигнала гармонического резонатора можно получить желаемый эффект таким образом, что в центре сгустка находится нуль поля, а само поле либо нарастает, либо спадает во времени [2].

Гармонические резонаторы смогут повысить эксплуатационную гибкость и обеспечить большее пространство для параметров ПС-БАК, например, путем уменьшения нагрева компонентов, снижения роста эммитанса пучка, увеличения стабильности пучка, варьирования уровня светимости и т.д. Ускоряющая система БАК работает на частоте 400 МГц. Поэтому для достижения перечисленных положительных эффектов можно использовать комбинацию рабочих частот 400 и 800 МГц или 200 и 400 МГц.

В пользу выбора гармонических резонаторов для ПС-БАК с рабочей частотой 800 МГц говорят следующие соображения [3]: наличие существующей системы ВЧ питания для структуры на бегущей волне с рабочей частотой 800 МГц для Супер Протонного Синхротрона (СПС); меньшие размеры, чем у структуры с частотой 200 МГц; меньшее ускоряющее напряжение.

При разработке ускоряющих СВЧ резонаторов одной из наиболее важных задач является обеспечение эффективного демпфирования возникающих в них волн высших типов (ВВТ), так как они приводят к увеличению продольного и поперечного эмиттанса пучка, различным нестабильностям и ряду других негативных эффектов [4]. Под демпфированием подразумевается снижение добротности структуры на частотах ВВТ за счет вывода их энергии через соответствующие устройства во внешнюю поглощающую нагрузку.

Вывод ВВТ из сверхпроводящих ускоряющих резонаторов (СПУР) имеет несколько отличительных особенностей по сравнению с выводом их из теплых структур [5]. Применение одноячеечных СПУР в циклических ускорителях типа CESR-B и КЕКВ описано в ряде работ [6,7]. При ускорении больших токов в современных ускорителях, необходимо обеспечивать условия достижения малого импеданса канала ускорителя, включающего ускоряющие резонаторы, вакуумную камеру, устройства ввода-вывода пучка и другие элементы. При этом основной вклад в возбуждение паразитных ВВТ вносят ВЧ резонаторы.

Другим необходимым условием выполнения требования повышения светимости БАК является увеличение интенсивности пучков инжектора коллайдера СПС в два раза и доведение ее до $2,4 \times 10^{11}$ частиц в сгустке при временном интервале между пучками 25 нс. В рамках проекта обновления инжектора БАК (LHC Injector Upgrade) планируется проведение ряда дополнительных мероприятий, нацеленных на устранение ограничений интенсивности ускоренного пучка. Основная часть мероприятий направлена на подавление ВВТ в ускоряющей системе (УС) СПС, для чего необходима разработка эффективных методов демпфирования ВВТ.

Несмотря на высокую точность современного программного обеспечения для расчета электродинамических характеристик (ЭДХ) УС, неотъемлемым этапом является экспериментальное исследование ЭДХ

основной волны и ВВТ на макетах таких структур [7-9]. При этом вопросы точности измерения нагруженной добротности, поперечного шунтового сопротивления ВВТ и кик-фактора являются актуальными для многих существующих проектов.

Цели и задачи исследования

1. Разработка и апробация методов настройки дипольного и широкополосного коаксиального устройств вывода мощности ВВТ из гармонического резонатора на частоту 800 МГц, предназначенного для применения в проекте ПС-БАК. Разработка способа упрощения конструкции гармонического резонатора путем использования гибридных устройств вывода мощности.
2. Исследование эффективности демпфирования ВВТ с использованием нагрузки, расположенной в гофрированной трубке дрейфа. Проведение расчетов и экспериментальное исследование в одноячеечном, двухъячеечном эллиптическом резонаторах, а также в цепочке из двух резонаторов, соединенных узкой трубкой дрейфа.
3. Разработка и создание макета гармонического резонатора модульного типа с частотой 2400 МГц на основной волне. Проведение экспериментальных исследований по определению нагруженной добротности и шунтового сопротивления на частотах основной волны и частотах ВВТ в одиночном и в вдвоенном резонаторе с различной конфигурацией трубок дрейфа. Развитие метода малых возмущающих для измерения поперечного шунтового сопротивления с использованием возмущающих тел из разного материала и разной конфигурации (сферы, эллипсы, петлевой формы).
4. Разработка способов эффективного демпфирования ВВТ в ускоряющей структуре СПС на бегущей волне на частоте 200 МГц с целью повышения светимости БАК. Построение модели поперечного импеданса УС СПС.

Научная новизна

- 1) Впервые для гармонического резонатора разработаны и настроены устройства эффективного демпфирования ВВТ с использованием как гофрированных трубок дрейфа с поглощающей нагрузкой, так и гибридного коаксиального устройства вывода ВЧ мощности
- 2) Для упрощения криомодульной системы предложен новый эффективный способ уменьшения внешней добротности структуры на частотах ВВТ гармонического резонатора путем объединения двух одноячеечных резонаторов с помощью узкой трубки дрейфа и демпфирования ВВТ с помощью нагрузки, расположенной в трубках дрейфа большого радиуса.
- 3) Проведены исследования по выбору оптимальных способов расчета поперечного шунтового сопротивления и его измерения с использованием как известных возмущающих тел, так и петлевого зонда.
- 4) Впервые предложен способ демпфирования ВВТ в УС СПС на бегущей волне с добавлением дополнительного одноячеечного модуля с набором устройств вывода мощности ВВТ.

Научная и практическая значимость

1. Разработан дизайн сверхпроводящего эллиптического гармонического резонатора с рабочей частотой 800 МГц для проекта ПС-БАК. Исследованы методики демпфирования ВВТ в СПУР с помощью дипольных и широкополосных устройств вывода мощности ВВТ, гибридного устройства вывода мощности, а так же гофрированных трубок дрейфа с поглощающей нагрузкой. Показано, что использование гибридного устройства в значительной степени облегчает конструкцию резонатора. Работы проведены по заданию ускорительной группы БАК (RF-BR - Beams & RF Studies) как при работе автора в ЦЕРН, так и в МИФИ. Их результаты могут быть так же использованы для проектов FCC и CEPC [10, 11].

2. Для УС СПС по заданию ускорительной группы ЦЕРН разработаны способы снижения импеданса наиболее опасных ВВТ в 3 раза. Указанные методики позволяют увеличить максимальную интенсивность пучка до значения $2,4 \cdot 10^{11}$ частиц в сгустке, что необходимо для выполнения требований проекта ПС-БАК.

Достоверность

Достоверность результатов, представленных в диссертации, определяется сравнением результатов расчётов, выполненных с помощью различных программ, с результатами расчётов для тестовых моделей с известными характеристиками, а также хорошим совпадением расчётных и экспериментальных данных, полученных при измерениях на макете.

Личный вклад автора

1. Для гармонического СПУР для ПС-БАК автором проведена настройка дипольных и широкополосных устройств вывода мощности для демпфирования ВВТ. Предложен способ демпфирования ВВТ с помощью гибридного устройства вывода мощности. Проведен анализ и сравнение эффективности демпфирования ВВТ с помощью указанных устройств вывода мощности.
2. Предложен способ демпфирования ВВТ с помощью гофрированных трубок дрейфа в цепочке из двух резонаторов, соединенных узкой трубкой дрейфа. Изготовлен макет резонатора с трубками дрейфа в S-частотном диапазоне. Получено хорошее согласование результатов численного моделирования с экспериментальными данными по значениям внешней добротности и шунтового сопротивления на частотах основной волны и частотах ВВТ.
3. Для УС СПС разработан способ повышения эффективности демпфирования ВВТ. Построена модель поперечного импеданса УС СПС.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Результаты разработки устройств вывода мощности для демпфирования ВВТ гармонического СПУР для ПС-БАК. Способ демпфирования ВВТ с помощью гибридного устройства вывода мощности. Анализ и сравнение эффективности демпфирования ВВТ с помощью предложенных устройств вывода мощности ВВТ.
2. Результаты расчета эффективности демпфирования ВВТ в цепочке из двух резонаторов, соединенных узкой трубкой дрейфа с помощью гофрированных трубок дрейфа с поглощающими нагрузками.
3. Создание макета гармонического резонатора в S-частотном диапазоне и проведение на нем измерений нагруженной добротности и шунтовых сопротивлений структуры на частотах основной волны и ВВТ. Подтверждение эффективности разработанной методики демпфирования. Развитие методики измерений полей в резонаторе с использованием известных конфигураций возмущающих тел в виде сфер и эллипсов, а также петлевого типа.
4. Разработка способа повышения эффективности демпфирования ВВТ в УС СПС на частоте 200 МГц. Построение модели поперечного импеданса УС СПС.

Апробация результатов диссертации

Результаты диссертации представлены на российских и международных конференциях:

- XXV Международное совещание по ускорителям заряженных частиц IWCPA'13, Алушта, Крым, 2013;
- V International Particle Accelerator Conference IPAC'14, Dresden, Germany, 2014;
- XXIV Всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц RUPAC'14, г. Обнинск, Россия, 2014;

- VI International Particle Accelerator Conference IPAC'15, Richmond, VA, USA, 2015;
- XXV Всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц RUPAC'16, Санкт-Петербург, Россия, 2016;
- VII International Particle Accelerator Conference IPAC'16, Busan, Korea, 2016;
- II и III международные конференции «Плазменные, лазерные исследования и технологии» 2016-2017 гг., НИЯУ МИФИ, Москва, Россия.
- Научная сессия НИЯУ МИФИ, Москва 2012-2015.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 19 печатных работах, из которых 7 статей – в рецензируемых журналах, включённых в перечень ВАК РФ, 19 статей опубликовано в периодических научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Её объём составляет 128 страниц, она включает 105 рисунков и 12 таблиц. Список литературы включает 58 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, раскрыта новизна работы и её практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена разработке устройств вывода мощности ВВТ для гармонического резонатора на частоте 800 МГц, разрабатываемого для проекта ПС–БАК. В разделе 1.1 приведены результаты исследования ускоряющего резонатора БАК с частотой рабочей волны 400 МГц. Приведен анализ ЭДХ основной волны и ВВТ ускоряющего резонатора и проведены расчеты эффективности демпфирования ВВТ в частотном и временном

диапазоне с помощью дипольного и широкополосного устройства вывода мощности ВВТ (Рис. 1). Дипольное устройство вывода предназначено для демпфирования двух наиболее опасных дипольных ВВТ H_{111} и E_{110} , обладающих наиболее высокими значениями отношения поперечного шунтового сопротивления к добротности $R_{ш.эф. \perp} / Q_0$. Широкополосное устройство вывода обеспечивают подавление ВВТ в диапазоне частот от 0.7 до 1.1 ГГц. Приведены эквивалентные схемы устройств вывода мощности и продемонстрировано влияние их геометрических параметров на коэффициент передачи S_{21} .

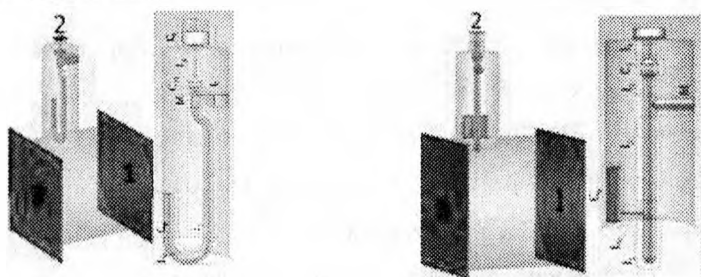


Рис. 1. Коаксиальные дипольные (слева) и широкополосные (справа) устройства вывода ВВТ

Из результатов расчета поперечного $R_{ш.эф. \perp}$ и продольного $R_{ш.эф. \parallel}$ эффективного шунтового сопротивления одиночного резонатора и цепочки из двух резонаторов с дипольными и широкополосными устройствами вывода мощности в данной структуре получено, что указанные величины не превышают 10000 Ом. Аналогичные значения были получены при расчете во временной области зависимости поперечного $Z_{\perp}$ и продольного $Z_{\parallel}$ импеданса от частоты. При таком уровне демпфирования ВВТ отсутствуют условия для возникновения многопучковых неустойчивостей [15].

Полученные значения внешней добротности и шунтового сопротивления приняты в качестве требований к уровню демпфирования ВВТ при разработке гармонического резонатора на частоту 800 МГц. Несмотря на то, что значения $R_{ш.эф. \perp}$ на частотах первых дипольных ВВТ меньше 2000 Ом, в диапазоне от 0.6 до 0.7 ГГц имеются резонансы со

значениями $R_{ш.эф.⊥}$ до 8000 Ом. Данные ВВТ являются волнами дипольного типа, запертыми в трубке дрейфа между резонаторами. Данный частотный диапазон не покрывается дипольным и широкополосным устройствами вывода мощности, и он соответствует ВВТ, запертым в трубках дрейфа между резонаторами.

В разделе 1.2 приведены результаты настройки устройств вывода мощности ВВТ с целью их оптимизации для использования в гармоническом резонаторе с частотой 800 МГц (Рис. 2 а, б). Уменьшенные в 2 раза устройства вывода ВВТ ускоряющего резонатора использованы в качестве начального варианта. Далее проведена их перенастройка, заключающаяся в изменении геометрических размеров устройств вывода ВВТ. Целью перенастройки было увеличение зазоров между центральным проводником и внешней стенкой резонатора и модификация широкополосного устройства вывода для покрытия им диапазона от 1.2 до 2 ГГц. Для цепочки из двух резонаторов (Рис. 2, в) проведены расчеты шунтового сопротивления и внешней добротности структуры на частотах ВВТ в диапазоне частот от 1 до 2 ГГц.

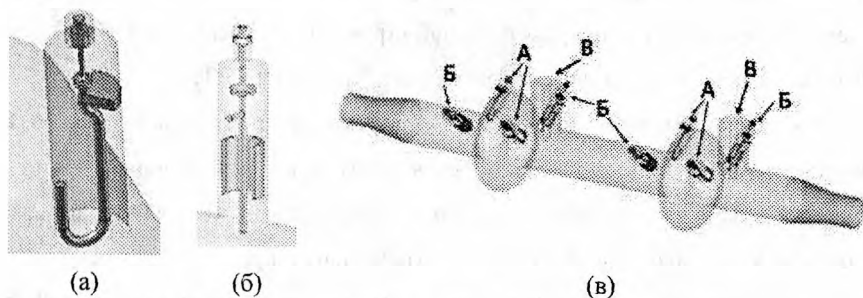


Рис. 2. Коаксиальное (а) дипольное и (б) широкополосные устройства вывода мощности ВВТ после перенастройки и (в) цепочка из двух резонаторов с дипольными (А) и широкополосными устройствами (Б) вывода мощности и вводом мощности (В)

Полученные значения $R_{ш.эф.⊥}$ и $R_{ш.эф.∥}$ не превышают 7000 Ом, что указывает на эффективное демпфирование ВВТ. Сравнение данных результатов со значениями, полученными для ускоряющего резонатора на 400 МГц, показывает, что удалось значительно снизить значения $R_{ш.эф.⊥}$ и

$Z_{\perp\parallel}$ ВВТ, запертых в трубке дрейфа, и монопольной ВВТ, являющейся одной из вариаций волны E_{011} , на частоте 1.9 ГГц.

В разделе 1.3 приведено описание гибридного устройства вывода мощности (Рис. 3).



Рис. 3. Гибридное (слева) и гибридное с дополнительным емкостным элементом (справа) устройство вывода мощности ВВТ

При демпфировании ВВТ с помощью гибридных устройств вывода мощности (Рис. 3) требуется только два устройства на ускоряющий резонатор [16]. Применение этой технологии получило широкое распространению в девятичечных резонаторах типа TESLA. Для уменьшения вертикального размера устройства предложено добавить емкостный элемент в верхнюю часть устройства (Рис. 3, б) [13]. Сопротивления $R_{ш.эф. \perp}$ и $R_{ш.эф. \parallel}$ в данной структуре не превышают 10000 Ом, что указывает на достаточный уровень демпфирования ВВТ.

Глава 2 посвящена исследованию эффективности демпфирования ВВТ в одночечных и двухчечных резонаторах, а также в цепочках из двух одночечных резонаторов с помощью гофрированной трубки дрейфа, обеспечивающей вывод ВВТ в поглощающую нагрузку.

В разделе 2.1 приведен анализ существующих способов демпфирования ВВТ с помощью нагрузки, расположенной в трубке дрейфа.

В разделе 2.2 показано, что вывод ВВТ в трубку дрейфа не может быть осуществлён за счет увеличения радиуса трубки дрейфа, так как при любом радиусе трубок дрейфа частота ВВТ находится ниже частоты отсечки (Рис. 4).

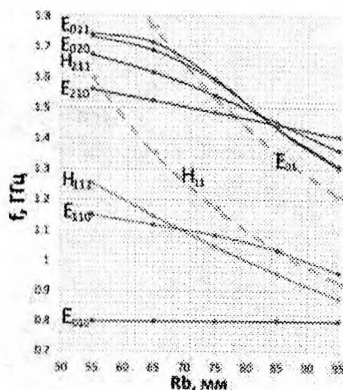


Рис. 4. Резонансная частота основной волны и ВВТ в функции радиуса трубки дрейфа R_b

В разделе 2.3 приведены результаты выбора оптимальных параметров радиуса трубки дрейфа и гофра для вывода ВВТ из одноячеечного резонатора с частотой 800 МГц (Рис. 5, а). Показано, что данная конструкция обеспечивает вывод ВВТ в нагрузку, расположенную в трубке дрейфа (Рис. 5, в, г) [7]. При этом основная волна остается запертой внутри резонатора (Рис. 5, б).

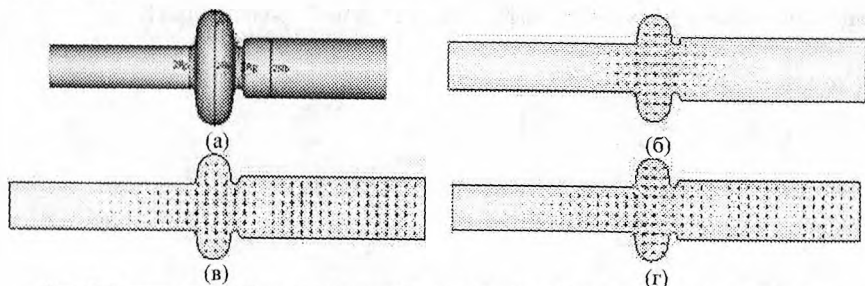


Рис. 5. Эллиптический резонатор с гофрированной трубкой дрейфа (а), топография электрического поля волн E_{010} (б), H_{111} (в) и E_{110} (г) для такого резонатора

В разделе 2.4 проведены результаты исследования цепочки из двух резонаторов с гофрированными трубками дрейфа, соединенных узкой трубкой дрейфа (Рис. 6). Данная конструкция позволит уменьшить число переходов между теплой и холодной частями криомодульной системы [12,14], снизить длину ускоряющей системы и упростить конструкцию криомодульной системы. Длина соединяющей трубки дрейфа подобрана таким образом, чтобы обеспечить наименьшие значения шунтового

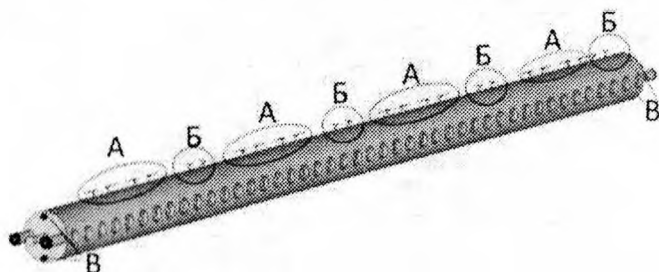


Рис. 13. УС из четырёх модулей со всеми устройствами вывода мощности. А – на частоту 630 МГц, Б – на частоту 938 МГц, В – на частоту 460 МГц

Полученные значения импедансов структуры будут включены в модель поперечного импеданса СПС для проведения уточненного моделирования динамики пучков и определения уровней неустойчивости поперечного импеданса.

В разделе 4.4 приведены результаты исследования способа увеличения эффективности демпфирования ВВТ на частоте 630 МГц за счет изменения конструкции устройства вывода мощности ВВТ (Рис. 14). Было показано, что влияние фильтра и изменение глубины погружения штыря оказывает незначительное влияние на эффективность демпфирования ВВТ.

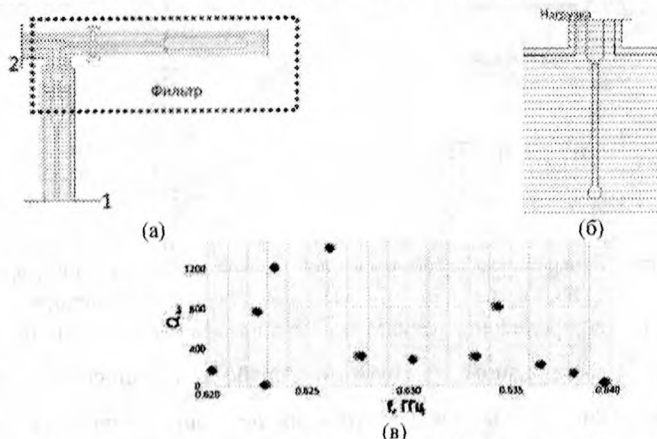


Рис. 14. Устройство вывода мощности на частоте 630 МГц (а) с фильтром (б) с нагрузкой вместо фильтра, (в) зависимость внешней добротности в УС с полным устройством вывода мощности (круги) и с нагрузкой вместо фильтра (ромбы)

Проведены исследования влияния увеличения числа узлов вывода мощности ВВТ на эффективность демпфирования ВВТ. Показано, что

диапазоне с помощью дипольного и широкополосного устройства вывода мощности ВВТ (Рис. 1). Дипольное устройство вывода предназначено для демпфирования двух наиболее опасных дипольных ВВТ H_{111} и E_{110} , обладающих наиболее высокими значениями отношения поперечного шунтового сопротивления к добротности $R_{ш.эф.⊥}/Q_0$. Широкополосное устройство вывода обеспечивают подавление ВВТ в диапазоне частот от 0.7 до 1.1 ГГц. Приведены эквивалентные схемы устройств вывода мощности и продемонстрировано влияние их геометрических параметров на коэффициент передачи S_{21} .

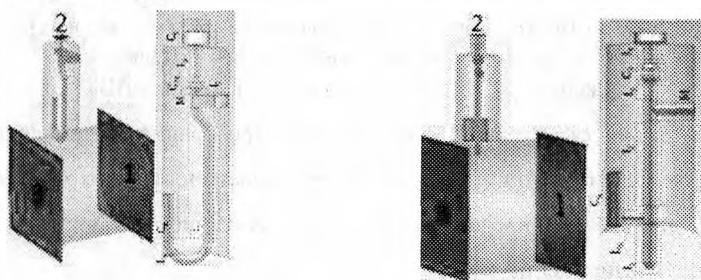


Рис. 1. Коаксиальные дипольные (слева) и широкополосные (справа) устройства вывода ВВТ

Из результатов расчета поперечного $R_{ш.эф.⊥}$ и продольного $R_{ш.эф.∥}$ эффективного шунтового сопротивления одиночного резонатора и цепочки из двух резонаторов с дипольными и широкополосными устройствами вывода мощности в данной структуре получено, что указанные величины не превышают 10000 Ом. Аналогичные значения были получены при расчете во временной области зависимости поперечного $Z_⊥$ и продольного $Z_∥$ импеданса от частоты. При таком уровне демпфирования ВВТ отсутствуют условия для возникновения многопучковых нестабильностей [15].

Полученные значения внешней добротности и шунтового сопротивления приняты в качестве требований к уровню демпфирования ВВТ при разработке гармонического резонатора на частоту 800 МГц. Несмотря на то, что значения $R_{ш.эф.⊥}$ на частотах первых дипольных ВВТ меньше 2000 Ом, в диапазоне от 0.6 до 0.7 ГГц имеются резонансы со

изготовления структуры и описаны существующие устройства вывода мощности ВВТ.

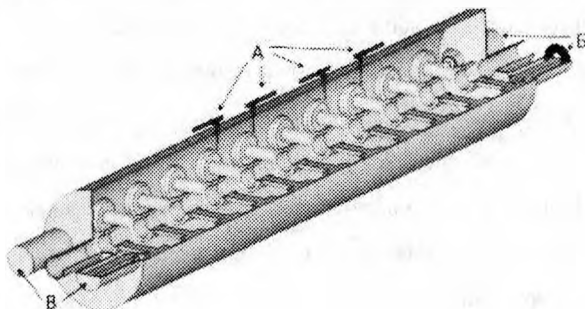


Рис. 11. УС СПС из 11 периодов. А – устройства вывода мощности на частоту 630 МГц, Б – поглощающая нагрузка, В – ввод мощности

В разделе 4.2 приведен анализ влияния ВВТ на максимальную интенсивность пучка СПС и приведены требования по демпфированию ВВТ на частоте 630 МГц для достижения интенсивности пучков в $2,4 \cdot 10^{11}$ частиц в сгустке. Приведен анализ существующей УС СПС и проекта модернизируемой.

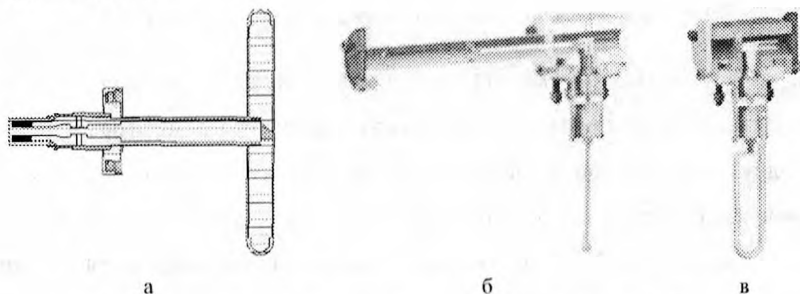


Рис. 12. Устройства вывода ВВТ на частоту 460 МГц (а), 630 МГц (б), 938 МГц (в)

В УС СПС возбуждаются ВВТ, приводящие к поперечному отклонению пучка [21]. В УС предусмотрено 3 типа устройств демпфирования ВВТ, каждое из которых предназначено для демпфирования конкретного типа ВВТ: на частотах 460, 630 и 938 МГц (Рис. 12).

В разделе 4.3 приведены результаты расчета поперечного импеданса для трёх структур с разными устройствами вывода мощности и со всеми устройствами вывода мощности (Рис. 13).

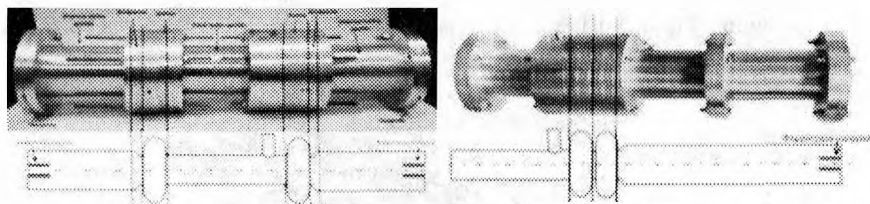


Рис. 9. Общий вид (слева) цепочки из двух резонаторов и двухъячеечного резонатора (справа)

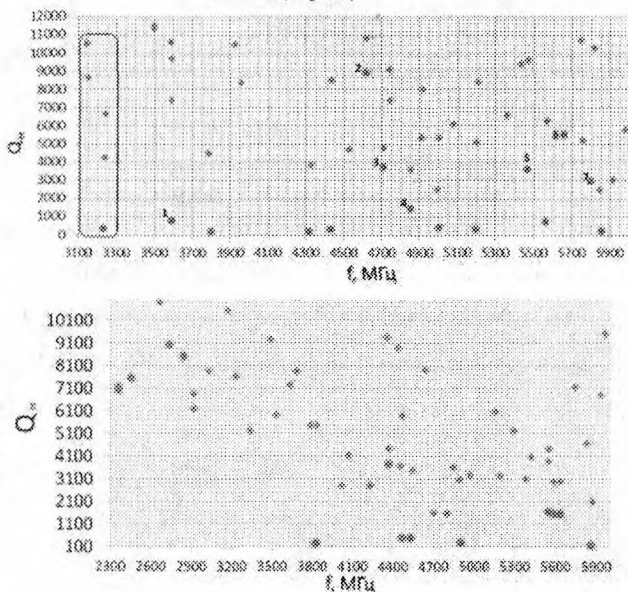


Рис. 10. Зависимость нагруженных добротностей от частоты для цепочки из двух резонаторов (сверху) и двухъячеечного резонатора (снизу). Ромбы – без нагрузки, круги – с нагрузкой.

Нагруженная добротность структуры на частотах большинства демпфированных ВВТ составляет менее 1000. Несколько ВВТ, обозначенных цифрами на графике (1 – дипольная волна в трубке дрейфа, 2,3,4 – квадрупольные ВВТ, 5,6,7 – секstupольные ВВТ), имеют добротность больше 1000, однако эти ВВТ имеют низкие значения $r_{ш.эфл}/Q_n$.

Раздел 3.3 посвящен измерению отношения $r_{ш.эфл}/Q_n$ для волн H_{111} и E_{110} в одноячеечном резонаторе. Измерения проводились с помощью различных возмущающих тел: керамического шарика (КШ), металлического

изготовления структуры и описаны существующие устройства вывода мощности ВВТ.

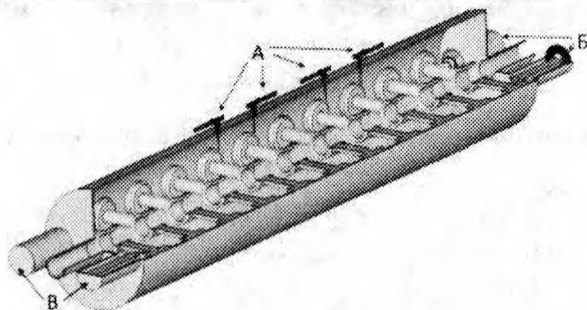


Рис. 11. УС СПС из 11 периодов. А – устройства вывода мощности на частоту 630 МГц, Б – поглощающая нагрузка, В – ввод мощности

В разделе 4.2 приведен анализ влияния ВВТ на максимальную интенсивность пучка СПС и приведены требования по демпфированию ВВТ на частоте 630 МГц для достижения интенсивности пучков в $2,4 \cdot 10^{11}$ частиц в сгустке. Приведен анализ существующей УС СПС и проекта модернизируемой.

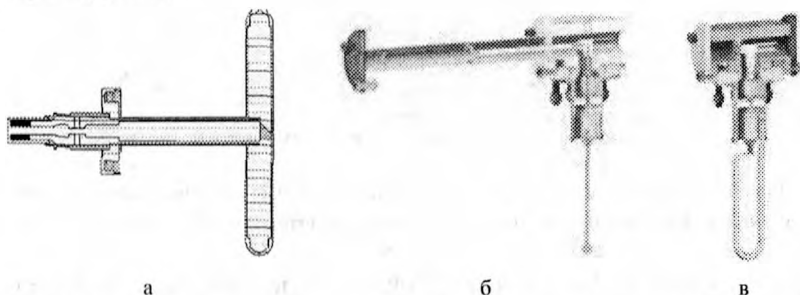
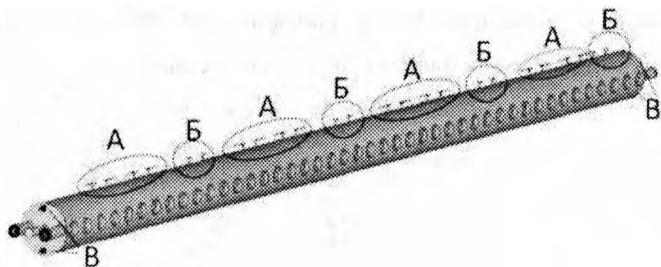


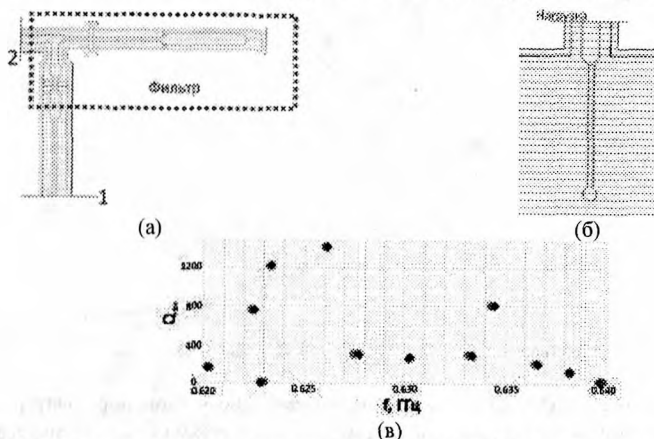
Рис. 12. Устройства вывода ВВТ на частоту 460 МГц (а), 630 МГц (б), 938 МГц (в)

В УС СПС возбуждаются ВВТ, приводящие к поперечному отклонению пучка [21]. В УС предусмотрено 3 типа устройств демпфирования ВВТ, каждое из которых предназначено для демпфирования конкретного типа ВВТ: на частотах 460, 630 и 938 МГц (Рис. 12).

В разделе 4.3 приведены результаты расчета поперечного импеданса для трёх структур с разными устройствами вывода мощности и со всеми устройствами вывода мощности (Рис. 13).



Полученные значения импедансов структуры будут включены в модель поперечного импеданса СПС для проведения уточненного моделирования динамики пучков и определения уровней неустойчивости поперечного импеданса.



Проведены исследования влияния увеличения числа узлов вывода мощности ВВТ на эффективность демпфирования ВВТ. Показано, что

эффективность данного способа является низкой, так как в структуре из четырёх модулей с 48 дополнительными устройствами (Рис. 15, а) импеданс ВВТ с частотой 630 МГц был уменьшен всего в 3 раза (Рис. 15, б).

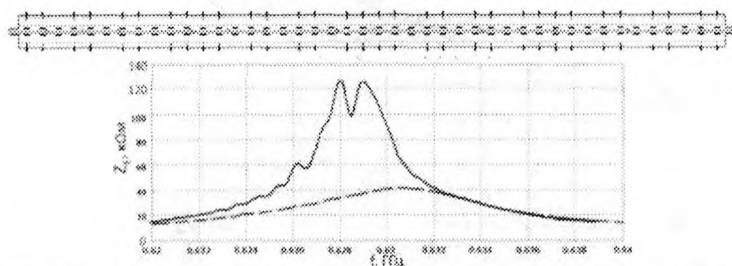


Рис. 15. Модель УС из 4-х модулей с дополнительными устройствами вывода ВВТ (сверху) и зависимости от частоты импеданса (снизу) в начальной четырехмодульной структуре (сплошная) и структуре с дополнительными устройствами для вывода ВВТ (пунктирная)

В разделе 4.5 приведен анализ эффективности демпфирования ВВТ с помощью дополнительного одноячеечного модуля с дополнительными устройствами вывода ВВТ.

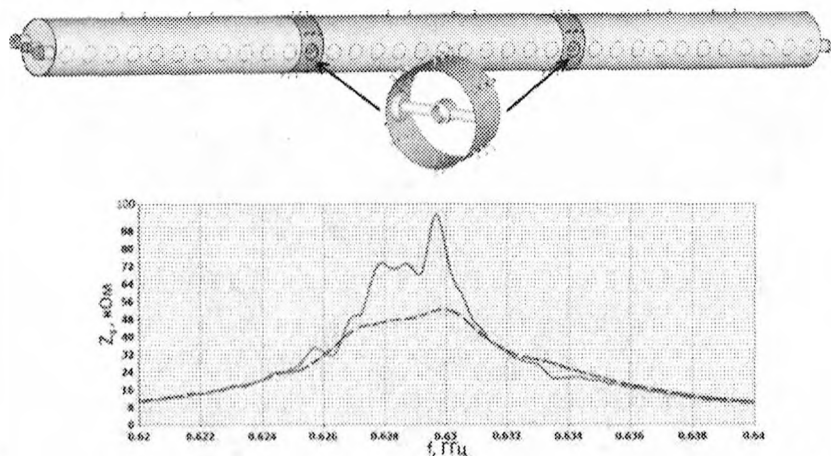


Рис. 16. Трёхмодульная структура с дополнительными одноячеечными резонаторами (сверху) и расчетные значения продольного импеданса для трёхмодульной структуры с одноячеечными модулями (пунктирная) и без них (сплошная) (снизу).

Из Рис. 16 видно, что для трёхмодульной структуры за счет добавления одноячеечного модуля с дополнительными устройствами вывода, удается снизить импеданс ВВТ на частоте 630 МГц со значений с 90 до 50 кОм. В

соответствии с рассмотренным предложением на каждую УС из трёх модулей потребуется два одноячеечных модуля и три одноячеечных модуля для секции, состоящей из четырёх модулей.

Заключение

1. Для гармонического резонатора БАК разработано дипольное, широкополосное и гибридное устройство вывода мощности ВВТ. Получены значения эффективного поперечного шунтового сопротивления для ВВТ ниже 10 кОм, и внешней добротности структуры ниже 1000 на частотах наиболее опасных дипольных волн, а для остальных ВВТ -- ниже 5000.
2. Разработана методика демпфирования ВВТ в гармоническом резонаторе с помощью гофрированной трубки дрейфа с поглощающей нагрузкой. Для цепочки из двух резонаторов с гофрированными трубками дрейфа, соединенных узкой трубкой дрейфа, получены значения внешней добротности на частотах наиболее опасных ВВТ ниже 300 и ниже 1000 -- для остальных ВВТ.
3. Разработан и создан макет гармонического резонатора в S-частотном диапазоне на основной волне. Проведены измерения нагруженной добротности, продольного шунтового сопротивления и кик-фактора структуры на частоте основной волны. Результаты измерений находятся в согласии с расчетными данными в пределах погрешностей расчета и измерения. Для первых двух дипольных волн получены значения эффективного поперечного шунтового сопротивления с использованием результатов измерений распределения полей с различными возмущающими телами. Наряду с традиционными телами в виде сфер или эллипсоидов использовалось и тело в виде кольца с хорошей направленностью при измерении составляющих магнитного поля.
4. Проанализированы возможности повышения эффективности в УС СПС демпфирования ВВТ с частотой 630 МГц с помощью модификации фильтра и антенны устройства вывода мощности. Предложен способ

демпфирования ВВТ с помощью дополнительных одноячеечных и двухячеечных модулей с отверстиями для установки дополнительных устройств вывода мощности. С помощью данной методики были получены требуемые уровни по демпфированию ВВТ с частотой 630 МГц.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. *Ya. V. Shashkov, A.A. Mitrofanov, N.P. Sobenin, V.L. Zvyagintsev*, Analysis of higher order modes damping techniques in 9 cell cavity with modified drift tubes // *Physics Procedia* 74 (2015), 124-131, 2015, (BAK, Scopus, WoS)
2. *Ya. V. Shashkov, N.P. Sobenin, D.S. Bazyl, V.I. Kaminskiy, A.A. Mitrofanov, M.M. Zobov*, Suppression of higher order modes in an array of cavities using waveguides // *Physics Procedia* 74 (2015), 116-123, 2015, (BAK, Scopus, WoS)
3. *Ya.V. Shashkov, N.P.Sobenin, I.I.Petrushina, M.M.Zobov*, Comparison of higher order modes damping techniques for 800 MHz single cell superconducting cavities // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 767, 2014, (BAK, Scopus, WoS)
4. *Ya.V. Shashkov, N.P. Sobenin, R.O. Bolgov, M.A. Gusarova, M.M. Zobov*, Higher-order modes damping in 800 MHz superconducting cavity // *Problems of Atomic Science and Technology*, Volume 88, Issue 6, 2013, Pages 72-75 (BAK, Scopus, WoS)
5. *Ya.V. Shashkov, N.P. Sobenin, M.V. Lalayan, D.S. Bazyl, R.V. Donetskiiy, A.A.Zavadtsev, M.M. Zobov*, Measurement of electrodynamic characteristics of higher order modes for harmonic cavity at 2400 MHz // *Physics Procedia* 74, 2016, (BAK, Scopus, WoS)
6. *Ya.V. Shashkov, R.V. Donetskiiy, M. A.Gusarova, N.P. Sobenin*, Higher Order Modes Couplers for 800 MHz Harmonic Cavity // *Proceeding of IPAC2016*, (Scopus)

7. *Ya.V. Shashkov, A. I.Orlov*, Macros for Identification of Higher Order Modes Types, Their Transverse Shunt Impedance and Kick Factor // Proceeding of IPAC2016, (Scopus)
8. *Ya.V. Shashkov, R.V. Donetskij, M.V. Lalayan, N.P. Sobenin, A.I. Orlov*, Measurement of Higher Order Modes Electrodynamic Characteristics for Array of Two 2400 MHz Cavities // Proceeding of IPAC2016, (Scopus)
9. *M.V. Lalayan, A.I. Orlov, Ya. Shashkov, N. P.Sobenin*, Experimental analysis of dipole modes in elliptical cavity // RuPAC16, (Scopus)
10. *Ya.V. Shashkov, N.P. Sobenin, M.V. Lalayan, D.S. Bazyl, R.V. Donetskij, A. A.Zavadtsev, M.M. Zobov, R. Calaga*, Higher order modes simulation and measurements for 2400 MHz cavity // Proceedings of SRF2015, Whistler, BC, Canada 2015, (Scopus)
11. *Ya.V. Shashkov, N.P. Sobenin, A.A.Mitrofanov, V. Zvyagintsev*, Compassion of higher order modes damping techniques for superconducting 9-cell structure // Proceeding of IPAC2015, (Scopus)
12. *Ya.V. Shashkov, N.P. Sobenin, M.M. Zobov*, Suppression of higher order modes in an array of cavities using waveguides // Proceeding of IPAC2015, (Scopus)
13. *Я.В. Шашков, М. М. Зобов, В. И. Каминский, Е. А. Киселева, А. А. Митрофанов, Н. П. Собенин*, Сравнение методов демпфирования волн высших типов в сверхпроводящем одноячеечном резонаторе // Вестник Национального Исследовательского Ядерного Университета “МИФИ”, 2014, (БАК)
14. *Ya.V. Shashkov, N.P. Sobenin, M.M. Zobov*, Analysis of high order modes damping techniques for 800 MHz single cell superconducting cavities // Proceedings of RuPAC2014, Obninsk, Kaluga Region, Russia, 2014, (Scopus)
15. *Ya.V. Shashkov, N.P. Sobenin, M.M. Zobov*, Comparison of higher order modes damping techniques for an array of single cell cavities // Proceedings of RuPAC2014, Obninsk, Kaluga Region, Russia, 2014, (Scopus)

16. *Ya.V. Shashkov, A. A.Mitrofanov, N. Sobenin, V. L.Zvyagintsev*, Higher order modes damping for 9-cell structure with modified drift tube // Proceedings of RuPAC2014, Obninsk, Kaluga Region, Russia, 2014, (Scopus)
17. *Ya.V. Shashkov, N.P. Sobenin, M.M. Zobov*, Comparison of high order modes damping techniques for 800 MHz single cell superconducting cavities // Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, 2014, p. 2558-2561 (Scopus)
18. *M.A. Gusarova, I.I. Petrushina, S.A. Khudyakov, Ya.V.Shashkov*, New possibilities of Multi-P-M Code // Proceedings of IPAC2014, (Scopus)
19. *Р. О. Болгов, М. А. Гусарова, М. М. Зобов, Я.В. Шапков, В. И. Каминский, Н. П. Собенин*, Подавление и вывод волн высших типов из сверхпроводящего резонатора на второй гармонике для коллайдера LHC // Вестник Национального Исследовательского Ядерного Университета “МИФИ”, 2013, (БАК)

Список литературы, цитируемой в автореферате

1. *L. Rossi*, LHC upgrade plans: options and strategy // Proceedings of IPAC'11, San Sebastian, Spain, p.908 – 912.
2. *Byrd J.M. et al.* Harmonic cavities and longitudinal beam stability in electron storage rings // Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, p. 380 – 384
3. *A Hoffman, S. Myers*, Beam Dynamics in Double RF System// Proceedings of 9th HEACC, Stanford, USA, 1980
4. *F. Ficcadenti, J. Tuckmantel, R. Calaga*, LHC Landau cavity design // BE-RF CERN BR section meeting, 29 марта 2012
5. *Н.П. Собенин, О.С. Милованов*, Техника сверхвысоких частот: изд. 2е, перераб. и доп. // М.: Энергоатомиздат, 2007, 543 с.
6. *H. Sakai et al.*, Development of a 1.3GHz 9-cell superconducting cavity for the Energy Recovery Linac // Proceedings of ERL'07, p. 56-61

7. Ya.V. Shashkov, N.P. Sobenin, R.O. Bolgov, M.A. Gusarova, M.M. Zobov, Higher-order modes damping in 800 MHz superconducting cavity // Problems of Atomic Science and Technology, Volume 88, Issue 6, 2013, Pages 72-75
8. Ya.V. Shashkov, N.P. Sobenin, M.V. Lalayan, D.S. Bazyl, R.V. Donetskiy, A. A.Zavadtsev, M.M. Zobov, R. Calaga, Higher order modes simulation and measurements for 2400 MHz cavity // Proceedings of SRF2015, Whistler, BC, Canada 2015
9. H. Hahn, R. Calaga, P. Jain, E.C. Johnson, W. Xu, HOM identification by bead pulling in the Brookhaven ERL cavity// Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 734, 72, 2014
10. R. Calaga, O. Brunner, A. Butterworth, E. Jensen, SRF for Future Circular Colliders // Proc. Of SRF'15, Vancouver, Canada (2015), pp 1474-1480
11. J.Y. Zhai et al, Preliminary conceptual design of the CEPC SRF system // Proc. Of SRF'15, Vancouver, Canada (2015), pp 272-275
12. Ya.V. Shashkov et al., Comparison of Higher Order Modes Damping Techniques for 800 MHz Single Cell Superconducting Cavities // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, v. 767, 2014, p 271–280
13. Ya.V. Shashkov, R.V. Donetskiy, M. A.Gusarova, N.P. Sobenin, *Higher Order Modes Couplers for 800 MHz Harmonic Cavity* // *Proceeding of IPAC2016*
14. Ya.V. Shashkov, N.P. Sobenin, M.M. Zobov, Comparison of high order modes damping techniques for 800 MHz single cell superconducting cavities // Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, 2014, p. 2558-2561
15. D. Angal-Kalinin, Review of Coupled Bunch Instabilities in the LHC// CERN, LHC Project Report 595, p. 1-17, July 2002
16. P. Kneisel G. Wu, G. Ciovati, Coaxial HOM coupler designs tested on a single cell niobium cavity// Proceedings of 23rd International Conference, Knoxville, USA, p. 716-718, 2006.
17. I.I. Petrushina, M.A. Gusarova, Multipactor in elliptical cavities 800 MHz // Proceedings of RuPAC2014, Obninsk, Russia, pp. 365-367

18. *А.Ю. Смирнов, А.А. Завадцев et al.*, Высокочастотные дефлекторы на бегущей волне для диагностики пучков заряженных частиц // Монография, 2014г., НИЯУ МИФИ, -190 стр.
19. *M.V. Lalayan, A.I. Orlov, Ya.V. Shashkov, N. P.Sobenin*, Experimental analysis of dipole modes in elliptical cavity // RuPAC16
20. *G. Dome*, Travelling Wave Drift-Tube Structure for the CERN SPS// in Proc. Proton Linear Accelerator Conference 1976, Chalk River, ON, Canada, 1976, pp. 138–147.
21. *R. J. Lauckner, T P Linnecar*, The transverse coupled bunch mode instability at 940 MHz in the SPS // CERN Improvement Report №186, 1980, p 1-3

Подписано в печать 29.09.2017. Формат 60х84 1/16

Печ.л. 1,75. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии НИЯУ МИФИ.

115409, Москва, Каширское ш., 31

