

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК [621.372+621.3.038.625]-047.58

Лукьянчиков
Егор Андреевич

Моделирование и оптимизация тороидальных резонаторов для линейных
ускорителей протонов

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-39 80 02 «Радиотехника, в том числе системы и устройства
радионавигации, радиолокации и телевидения»

Научный руководитель

Рак Алексей Олегович
кандидат физ.-мат. наук, доцент

Минск 2020

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в области физики и техники линейных ускорителей ионов (увеличение среднего тока пучков, улучшение характеристик и технологии производства ускоряющих структур, уменьшение эксплуатационных расходов) способствует более широкому использованию в промышленности, медицине и других отраслях линейных ускорителей протонов и дейтронов относительно низких энергий ($W=1\dots 10$ МэВ).

Основными областями применения таких ускорителей являются:

– производство медицинских радиоизотопов, в частности, β -активных радионуклидов для позитронно-эмиссионной томографии в медицинской диагностике;

– создание источников нейтронов на основе ядерных реакций (d,n), (p,n) без использования делящихся материалов, которые являются безопасной альтернативой ядерным реакторам деления для целого ряда применений (нейтронноактивационный анализ элементного состава материалов, нейтронзахватная терапия злокачественных опухолей, нейтронная радиография объектов);

– бесконтактный таможенный контроль грузов на наличие взрывчатых веществ или делящихся материалов.

Практически во всех проектах ускорителей тяжелых ионов используются сверхпроводящие ускоряющие структуры, так как это позволяет существенно уменьшить потребление ВЧ мощности и увеличить темп ускорения, и как следствие, уменьшить энергопотребление и размеры установки.

Для ускорителей со скоростями частиц в диапазоне от 20% до 55% относительно скорости света, благодаря простоте и экономичности, в основном используются ускоряющие структуры в виде полуволновых коаксиальных резонаторов. Однако у них есть ряд серьезных недостатков таких как высокие значения коэффициентов перенапряжения по электрическому и магнитному полю, невысокая добротность резонатора. Всех этих недостатков лишены тороидальные резонаторы.

Диссертация посвящена разработке, моделированию и оптимизации новых форм сверхпроводящих тороидальных структур для линейных ускорителей тяжёлых ионов, с возможностью последующего использования в качестве «среднескоростного» ускоряющего резонатора.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Ускорители протонов и коллайдеры на их основе имеют широкое применение в научных исследованиях, медицине, производстве и др. Одним из ключевых элементов ускорителей являются ускоряющие резонаторы. Использование сверхпроводящих нерегулярных резонаторов – один из вариантов повышения эффективности ускорителей. Разработке моделей и поиску эффективных конструкций нерегулярных сверхпроводящих резонаторов и посвящена данная диссертация.

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что в настоящее время существует высокая потребность в оптимальных ускоряющих резонаторах при создании ускорительных комплексов и коллайдеров на их основе.

Цель диссертации: поиск оптимальных (по ускоряющему градиенту, максимальной напряженности поля и другим критериям) сверхпроводящих нерегулярных тороидальных резонаторов для линейных ускорителей протонов.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы следующие **задачи исследования:**

- разработка моделей нерегулярных тороидальных резонаторов.
- моделирование и оптимизация исследуемых ускоряющих резонаторов.
- сравнение полученных оптимальных тороидальных структур с ускоряющими структурами других типов.

Объектом исследования являются нерегулярные сверхпроводящие ускоряющие тороидальные резонаторы.

Предметом исследования являются сверхвысокочастотные электромагнитные поля в тороидальных резонаторах.

Методы исследования: базируются на эмпирических методах научного исследования, таких как моделирование, оптимизация и качественное сравнение полученных тороидальных структур.

Информационная база базируется на учебных пособиях, патентах и научных работ, как зарубежных, так и отечественных авторов (Звягинцев В.Л., Собенин Н.П.)

Инструментальной базой является *AutoCAD 2015* – для визуализации проектируемых структур, пакет программ электродинамического моделирования – для непосредственного моделирования и оптимизации резонансных структур, *Microsoft Office Word 2016* – для формирования отчета о проделанной работе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новые конструкции тороидальных ускоряющих сверхпроводящих резонаторов для линейных ускорителей электронов и позитронов, разработанные для использования на частоте 325 МГц при $\beta=0.35$.

2. Оптимальные конфигурации тороидальных сверхпроводящих резонаторов для линейных ускорителей электронов и позитронов, с расчетной «теплой» добротностью 1.5×10^4 и геометрическим фактором больше 100Ω.

3. Результаты распределения электромагнитных полей в оптимальных тороидальных конфигурациях, обеспечивающих оптимальный режим работы ускорителя, при высоких значениях градиента ускорения (7...11 МВ/м) и низких значениях коэффициентов перенапряжения по магнитному (1.3...2 мТл) и электрическому (менее 1.76) полю.

Научная новизна и значимость:

Впервые получены конфигурации тороидальных резонаторов: с вырезанными конусами, с вырезанными усеченными конусами и ассиметрично конические, рассчитанные для использования в «среднескоростной» секции ускорения на частоте 325МГц.

Полученные конфигурации обладают хорошими расчетными параметрами:

- «теплая» добротность на уровне 1.5×10^4 ;
- геометрический фактор больше 100Ω;
- коэффициенты перенапряжения по электрическому полю ниже 1.76;
- коэффициенты перенапряжения по магнитному полю ниже 2 мТл;
- ускоряющий градиент при $\beta=0.35$ получается 7...11 МВ/м.

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в двух опубликованных работах общим объемом 0,462 п.л.

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из

введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Общий объем диссертации – 72 страницы. Работа содержит 22 таблицы, 47 иллюстрации. Библиографический список включает 33 наименования.

Результаты проведенных работ докладывались на следующих конференциях:

1 – А. Лукьянчиков, Е. А. Моделирование тороидальных резонаторов для линейных ускорителей / Е. А. Лукьянчиков // Радиотехника и электроника: 55-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-26 апреля 2019 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2019. – С. 100 – 101.

2 – А. Лукьянчиков, Е. А. Моделирование и оптимизация ускоряющих резонаторов для линейных ускорителей протонов / Е. А. Лукьянчиков // Радиотехника и электроника: 56-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 18-20 мая 2020 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2020. – С. 182 – 183.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** и **общей характеристике работы** определены основные направления исследования, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава «Обзор литературы по теме исследования и последних достижений в исследуемой области» носит теоретический характер, состоит из трех разделов. В ней определяются следующие моменты:

- история создания и развитие линейных ускорителей протонов;
- основные электродинамические характеристики сверхпроводящих ускоряющих резонаторов;
- выводы об положительных и отрицательных сторонах, тороидальных ускоряющих структур.

Вторая глава «Разработка моделей нерегулярных тороидальных ускоряющих резонаторов на основе метода конечных элементов» состоит из шести разделов и носит практико-ориентированный характер. В ней определяется следующее:

- базовые принципы построения тороидальных резонаторов с оптимальной скоростью частиц до $\beta=0,55$;
- внешний вид и габариты проектируемых ускоряющих структур;

– методика построения тороидальных резонаторов на основе конечных элементов.

Третья глава «Поиск оптимальных вариантов моделей нерегулярных тороидальных ускоряющих резонаторов» состоит из восьми разделов и носит практико-ориентированный характер. В ней описываются:

- общие сведения и возможности пакета программ электродинамического моделирования;
- описание алгоритма оптимизации по методу Нелдера-Мида;
- моделирование и оптимизация полученных в предыдущей главе тороидальных ускоряющих резонаторов.

Четвертая глава состоит из четырех разделов и носит практико-ориентированный характер.

В этой главе производится сравнение тороидальных резонаторов с оптимизированной геометрией с:

- полуволновыми коаксиальными структурами;
- одноступенчатыми ускоряющими структурами;
- многоступенчатыми ускоряющими структурами;

Приводятся общие выводы относительно целесообразности использования полученных тороидальных структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе метода конечных элементов разработаны тороидальные ускоряющие резонаторы следующих конфигураций:

- тороидальный резонатор цилиндрической формы с закруглением боковой поверхности;
- тороидальный резонатор с вырезанными усеченными конусами;
- тороидальный резонатор эллиптической формы;
- тороидальный резонатор с вырезанными конусами;
- ассиметричный тороидальный конический резонатор.

Для последующего исследования параметров и оптимизации геометрических размеров в пакете программ электродинамического моделирования были смоделированы ранее разработанные тороидальные ускоряющие структуры.

Для оптимизации геометрических параметров тороидальных резонаторов на частоте 325 МГц в соответствии с проектными параметрами ускорителя SPIRAL-II, была проведена оптимизация по методу Нелдера-Мида.

После проведения сравнения с ускоряющими структурами других типов, было выявлено, что тороидальные структуры следующих конфигураций, обладают лучшими характеристиками:

- тороидальный резонатор с вырезанными усеченными конусами;
- тороидальный резонатор с вырезанными конусами;
- ассиметричный тороидальный конический резонатор.

Результаты, сравнения свидетельствуют о высоком потенциале использования данных тороидальных резонаторов так как: полученные структуры имеют высокое значение добротности (1.5×10^4) и геометрического фактора ($\approx 100\Omega$) при низких значениях коэффициентов перенапряжения по электрическому (не более 1.76) и магнитному (1.3...2 мТл) полю. При этом ускоряющий градиент зазора находится в пределах 7...11 МВ/м, что свидетельствует о хороших показателях ускорения частиц.

Следует заметить, что единственным недостатком тороидальных ускоряющих структур относительно других типов можно отнести низкое значение эффективного шунтового сопротивления приведённого к собственной добротности контура (R_a/Q_0), у тороидальных структур она ниже в 3...9 раз, в зависимости от структуры, с которой производится сравнение.

Однако это обусловлено особенностью тороидальной структуры (высоким показателем добротности), для тороидальных резонаторов этот параметр пропорционален количеству ячеек, а в диссертационной работе проводилась моделирование одной ускоряющей ячейки. Следует заметить, что параметр R_a/Q_0 у моделируемых структур выше, чем у ранее разрабатываемых, в несколько раз.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1 – А. Лукьянчиков, Е. А. Моделирование тороидальных резонаторов для линейных ускорителей / Е. А. Лукьянчиков // Радиотехника и электроника: 55-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-26 апреля 2019 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2019. – С. 100 – 101.

2 – А. Лукьянчиков, Е. А. Моделирование и оптимизация ускоряющих резонаторов для линейных ускорителей протонов / Е. А. Лукьянчиков // Радиотехника и электроника: 56-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 18-20 мая 2020 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2020. – С. 135 – 136.