

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Некоторые особенности расчета характеристик замедляющих систем  
лампы бегущей волны**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

Студентки 4 курса 4031 группы  
направления 03.03.03 «Радиофизика»  
Института Физики  
Мухиной Надежды Вадимовны

Научный руководитель  
доцент кафедры электроники,  
колебаний и волн, к.ф.-м.н.

 31.05.24  
\_\_\_\_\_  
дата, подпись

А.В. Титов

Заведующий кафедрой  
электроники, колебаний и волн.  
к.ф.-м.н., доцент

 03.06.24г.  
\_\_\_\_\_  
дата, подпись

С.В. Гришин

Саратов 2024 год

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Введение новых типов замедляющих систем (ЗС) для ламп бегущей волны (ЛБВ) остается актуальным и перспективным направлением исследований в радиотехнике. Продолжение научных исследований в области новых типов замедляющих систем позволит разрабатывать более эффективные и компактные решения, способные работать в более широком диапазоне частот. Инновационный подход к конструкции и оптимизации характеристик ЗС открывает новые возможности для улучшения эффективности ЛБВ и их применения в современных радиотехнических системах.

Таким образом, данная тема актуальная и перспективная для дальнейших исследований и разработок в области радиотехники.

**Цель:** Расчёт параметров ЗС нового типа и получение зависимостей электродинамических характеристики с помощью программного обеспечения ANSYS HFSS.

Для достижения данной цели необходимо выполнить следующие **задачи:**

1. Обзор актуальных статей, посвященных ЗС;
2. Анализ представленных ЗС, выбор и построение конкретной модели в программе HFSS;
3. Рассчитать электродинамические характеристики выбранной ЗС.

## Основное содержание работы

В первой главе были рассмотрены актуальные замедляющие системы (ЗС) для лампы бегущей волны (ЛБВ). Замедляющие системы были выбраны из статей, представленных за последние 12 лет (10 январь 2012 г.-11 январь 2024 г.). Всего в обзоре использовано 7 статей. На их основе был проведен обзор и анализ ЗС.

В статье «Волново-кольцевая спиральная замедляющая система (WRH) для лампы бегущей волны» была представлена ЗС, способная увеличить выходную мощность лампы бегущей волны. Разработанная система WRH представляет собой производную от спирали с обратной намоткой, где использование волнового кольца вместо простого кольца позволяет регулировать фазовую скорость. Моделирование системы WRH показало хорошее согласование результатов с программным обеспечением для трехмерного электромагнитного моделирования.

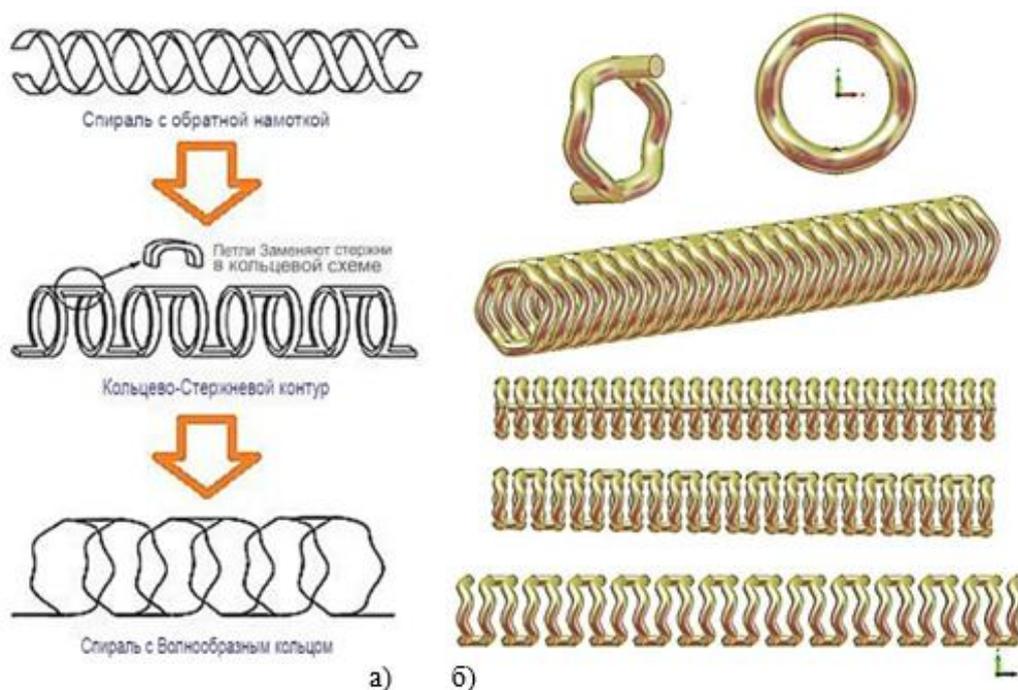


Рис.1: а) Вид новой и предыдущей ЗС; б) ЗС типа «кольцо-стержень».

В следующей статье «Эквивалентная схема замедляющей системы типа «петляющий волновод» для лампы бегущей волны» была представлена ЗС

типа «петляющий волновод». Анализ данной статьи показал, что изменение размеров и параметров этой системы существенно влияет на ее характеристики, такие как сопротивление связи и полоса пропускания. Результаты численных расчетов подтвердили эффективность и надежность методов моделирования.

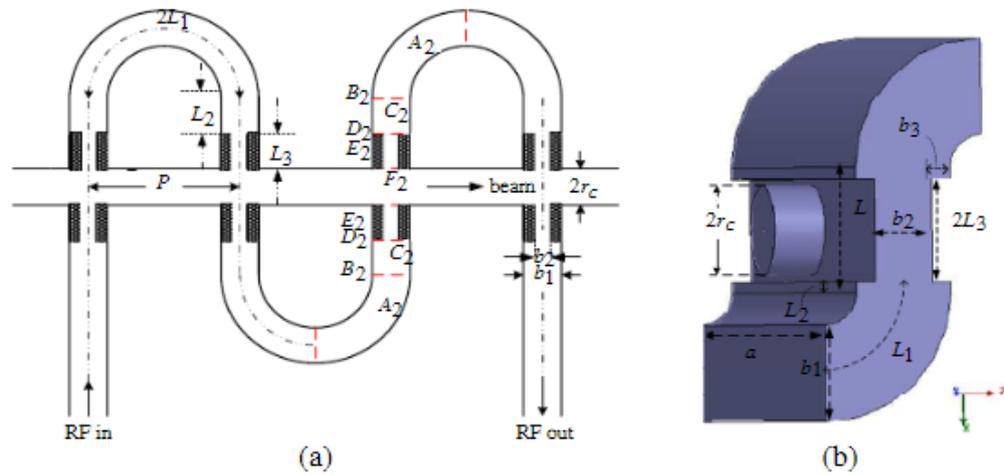


Рис. 2: (а) иллюстративный эскиз RLFAWG-3С, показывающий соответствующие размеры. (б) трехмерная 3С RLFWG-3С.

Далее в главе «Микрополосковая замедляющая система Омега-формы» была рассмотрена микрополосковая ЗС. Проанализировав статью, можно сказать, что данная система обладает определенными характеристиками, способствующими формированию дисперсии. Результаты исследования позволяют сделать вывод о эффективности использования данного типа замедляющих систем.

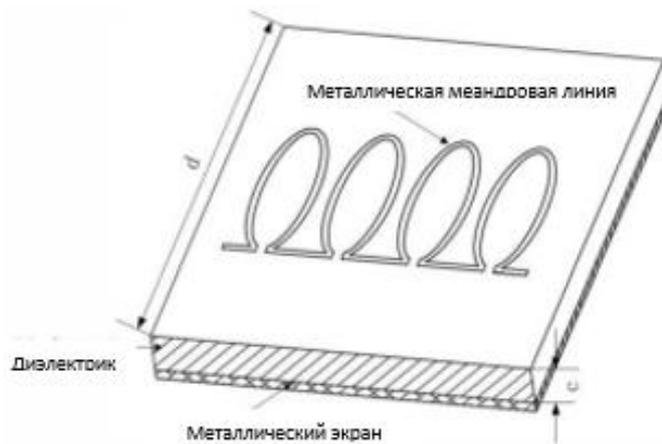


Рис. 3: Модель микрополосковой ЗС

В статье «Нагруженная плоская спиральная замедляющая система для применения в широкополосных лампах бегущей волны» была представлена нагруженная плоская СЗС, анализ которой показал, что данная система обладает определенными преимуществами, такими как простота реализации и возможность использования стандартных методов изготовления.

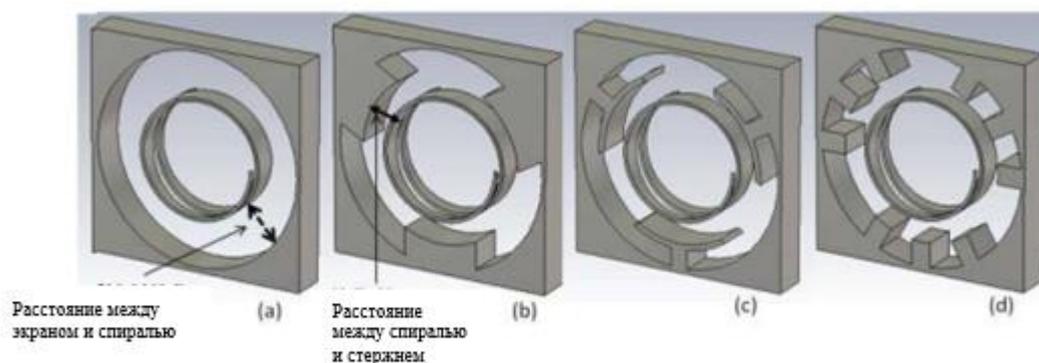


Рис.4: Модель круговой спирали с одним периодом. (а) без стержней. (б) со сплошными стержнями. (с) с Т-образными стержнями. (д) с тонкими стержнями.

В следующей статье «Лампа бегущей волны W-диапазона на основе плоской замедляющей системы» была предложена новая плоская ЗС. Исследование показало, что данная система обладает преимуществами в реализации и новая архитектура ЛБВ может стать важным шагом в миниатюризации и снижении затрат при реализации ЛБВ W-диапазона.

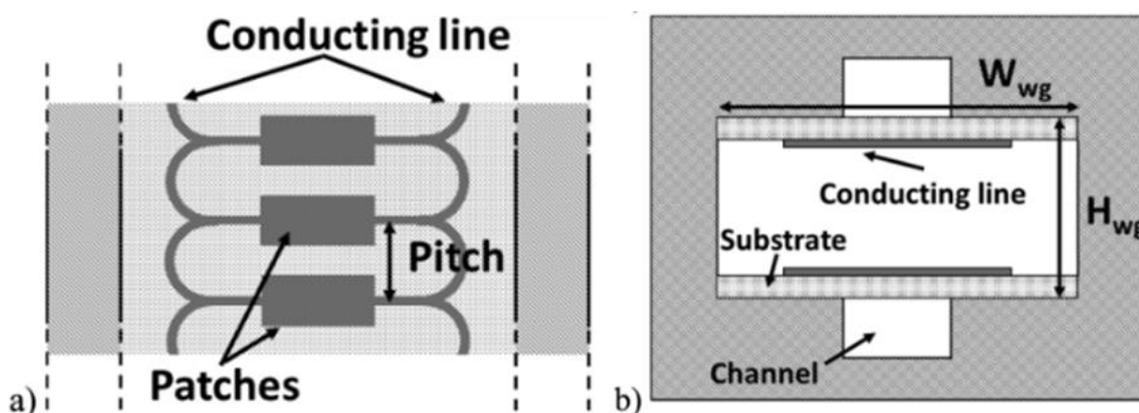


Рис. 5: Схема плоской ЗС. а) вид сверху; б) поперечное сечение. [5]

В статье «Проектирование и изготовление новой высокомошной ТГц-замедляющей системы на основе технологии MEMS» была представлена высокомошная ЗС на основе технологии MEMS для работы в ТГц диапазоне.

Исследование статьи показало, что разработанная замедляющая система на основе MEMS представляет собой решение для ЛБВ на ТГц частотах. Ее характеристики и высокая мощность делают ее хорошим кандидатом для применения в современных системах связи и радарных системах. Кроме того, готовый продукт с ЗС имеет большое значение для проектирования и исследований.

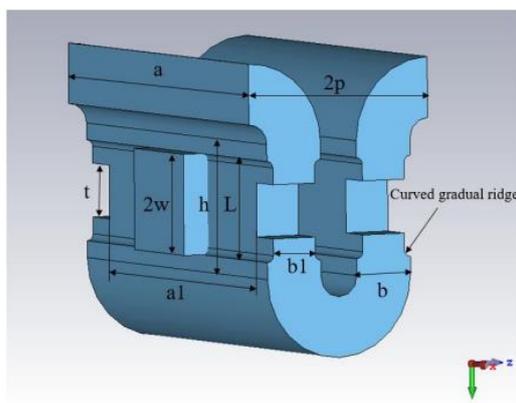


Рис. 6: Схема свернутого волновода, нагруженного двойными гребнями.

В следующей статье «Разработка лампы бегущей волны низкого напряжения и большой мощности на основе листовой прямоугольной замедляющей системы типа «кольцо-стержень»» предлагается ЗС лампы бегущей волны низкого напряжения и большой мощности на основе модифицированного прямоугольного РВСЗС. Предлагаемая ЗС впервые была сравнена с низковольтной версией классического круглого РВСЗС, демонстрирующей большое сопротивление связи и, следовательно, позволяющей достичь более высокой выходной мощности. Более того, предлагаемая ЗС демонстрирует большую стабильность при высоком подавлении колебаний обратной волны. Наконец, в отличие от других ЗС, наша представляет собой очень большую площадь контакта между диэлектриком и ЗС, что обеспечивает отличную механическую и термическую стабильность. Будущие действия будут сосредоточены на изготовлении RRB-ЗС, описанных в данной статье.

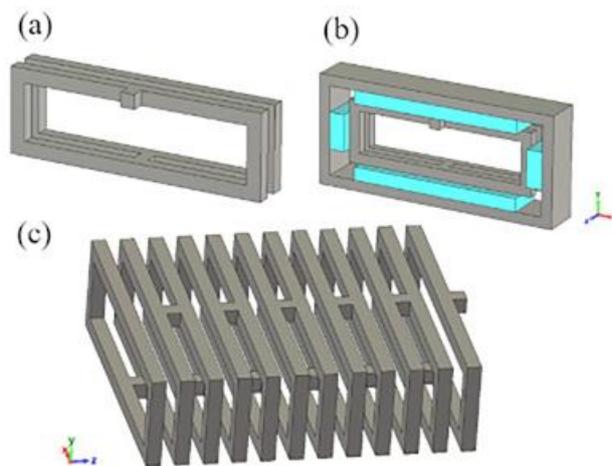


Рис. 7: Листовая прямоугольная стержневая ЗС: (а) Схематический вид основной ячейки; (b) Основная ячейка с диэлектриком и внешним корпусом; (c) Шестиячеечная ЗС.

В данной главе был проведен обзор актуальных статей, посвященных замедляющим системам. Анализ различных типов замедляющих систем позволил выявить их особенности и преимущества, что является важным шагом в развитии радиотехники. Проведенный обзор подтвердил актуальность темы.

**Во второй** главе был произведён анализ представленных ЗС, выбор и построение конкретной модели в программе HFSS.

В рамках данного исследования были проанализированы представленные замедляющие системы (ЗС) для ламп бегущей волны (ЛБВ) и выбрана оптимальная модель ЗС. В ходе тщательного обзора статей, особое внимание было уделено статье «Разработка лампы бегущей волны низкого напряжения и большой мощности на основе листовой прямоугольной замедляющей системы типа «кольцо-стержень»», где выбранная модель отличилась наилучшими характеристиками.

На этапе построения конкретной модели ЗС в программе HFSS был подробно описан процесс моделирования. Этот процесс включал в себя построение самой модели, задание граничных условий, начальных параметров, а также проверку на соответствие требуемым критериям.

После выполнения данных этапов получаем готовую модель ЗС:

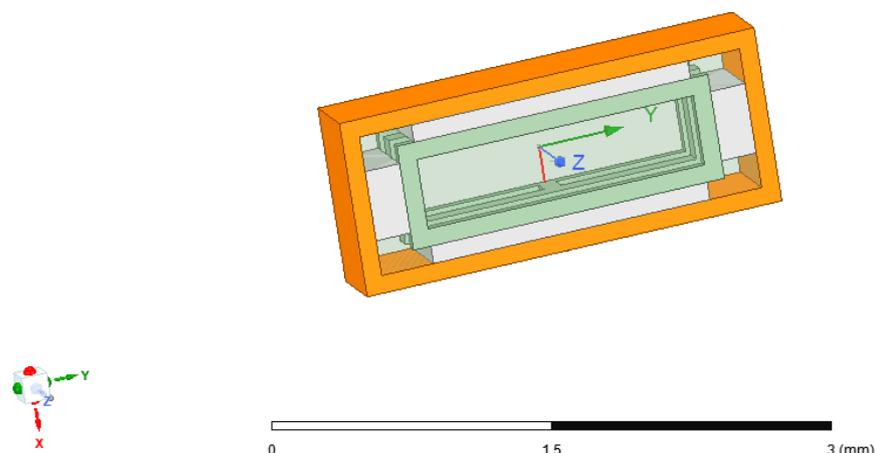


Рис. 8: готовая модель прямоугольной ЗС типа «кольцо-стержень»

Результатом данного исследования стало успешное моделирование ЗС в программе HFSS. Построенная модель обладает высокой степенью реалистичности и может быть использована в дальнейших исследованиях.

**В третьей** главе был проведен расчёт электродинамических характеристик выбранной замедляющей системы. Этот этап исследования позволил получить более глубокое понимание работы ЗС и ее потенциала в радиотехнических системах. Результаты расчетов позволили оценить работоспособность и эффективность выбранной модели, подтверждая ее превосходство среди других рассмотренных вариантов.

Пример результата расчета дисперсионной характеристики приведен ниже (Рис. 9).

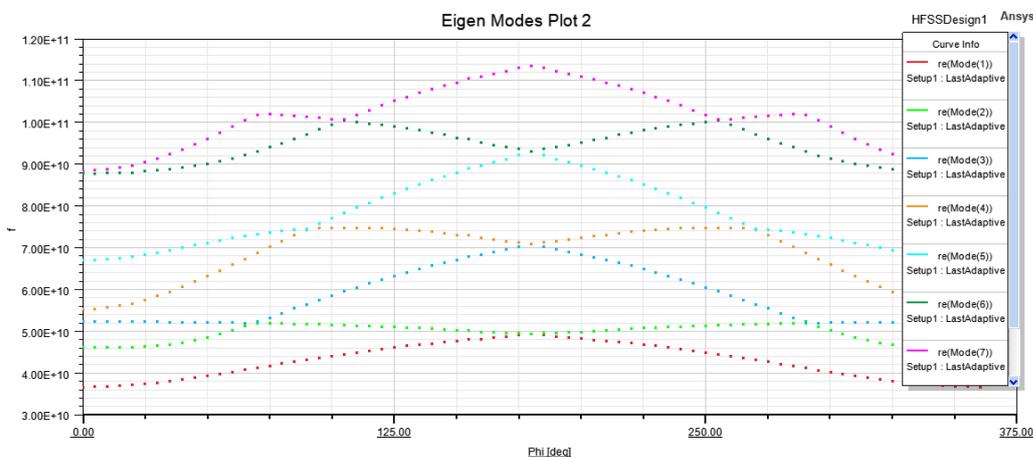


Рис. 9: Дисперсионная характеристика ЗС

Так же были получены зависимости сопротивления связи и замедления от частоты.

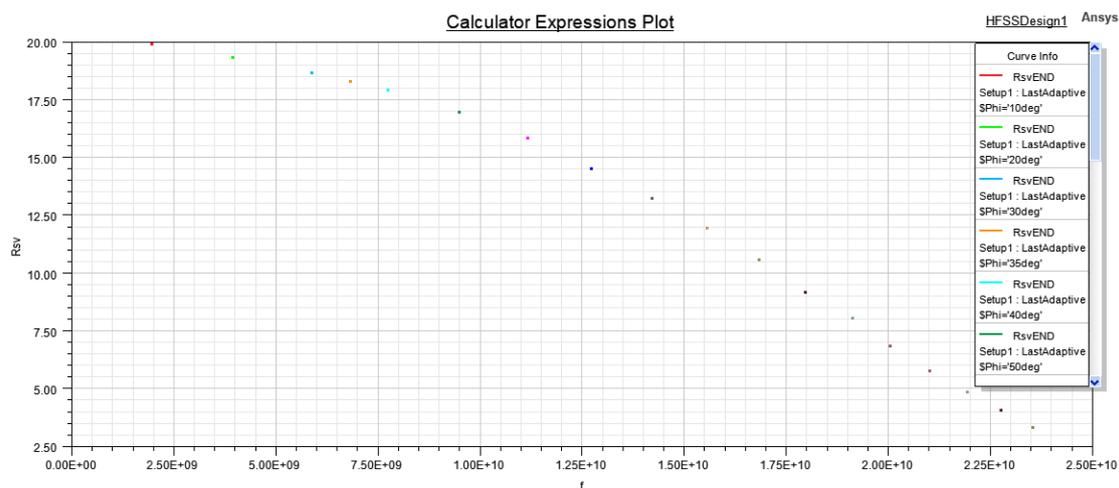


Рис. 10: Зависимость сопротивления связи от частоты.

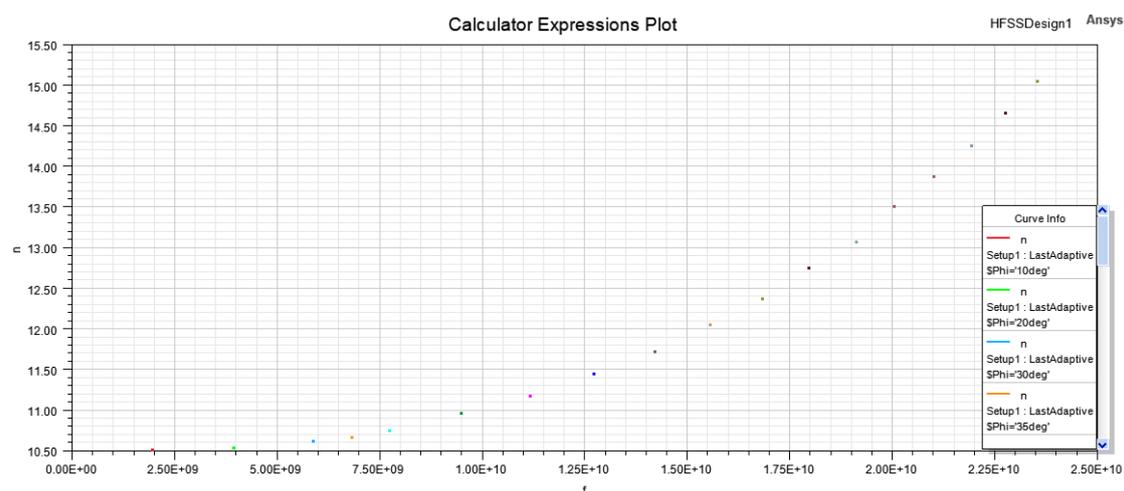


Рис. 11: Зависимость замедления от частоты.

В третьей главе были получены электродинамические характеристики выбранной замедляющей системы (ЗС) с использованием программного пакета ANSYS HFSS. Были построены графики зависимости частоты от сдвига фазы, сопротивления связи от частоты и замедления от частоты. Эти зависимости позволяют оценить производительность ЗС в диапазоне изучаемых частот и определить оптимальные рабочие параметры.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе исследования был проведен обзор статей, посвященных замедляющим системам (ЗС). Данный обзор выявил основные тенденции и направления развития в области ЗС.

Далее был проведен анализ представленных ЗС с целью выбора конкретной модели для последующего построения. Была выбрана оптимальная модель, выделяющаяся среди других моделей благодаря своим отличными характеристикам.

После выбора модели было осуществлено построение данной ЗС в программном обеспечении ANSYS HFSS, что позволило провести расчет характеристик выбранной модели. Полученные результаты подтвердили эффективность выбранной модели и позволили оценить ее работоспособность.

Таким образом, проведенное исследование позволило не только углубить знания в области замедляющих систем, но и смоделировать и проверить конкретную модель, что открывает новые перспективы для дальнейших исследований в данной области науки и техники.