

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

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Методы расчёта характеристик замедляющих систем лампы
бегущей волны**

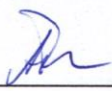
АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИКАЦИОННОЙ
МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 2231 группы

направления 03.04.03 «Радиофизика», профиль «Физика микроволн»
института физики

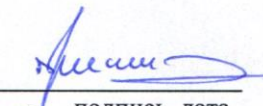
Мухиной Надежды Вадимовны

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

 04.06.20
подпись, дата

А.В. Титов

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


подпись, дата

С.В. Гришин

Саратов 2026 год

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ОБЗОР АКТУАЛЬНЫХ СТАТЕЙ, ПОСВЯЩЕННЫХ ЗС.....	4
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ПРЕДСТАВЛЕННЫХ ЗС, ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ В ПРОГРАММЕ HFSS И ВЫБОР КОНКРЕТНЫХ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ	4
ГЛАВА 3. РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫБРАННОЙ ЗС	5
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗС С ПОМОЩЬЮ СВИПИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА	7

ВВЕДЕНИЕ

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.

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

Цель: Провести комплексный анализ существующих моделей замедляющих систем, применяемых в лампах бегущей волны, основанном на обзоре литературы и сравнительном анализе.

Для достижения этой цели в рамках работы поставлены следующие **задачи:**

1. Анализ актуальных моделей ЗС;
2. Сравнение эффективности и практической применимости.

Результаты данного исследования могут быть полезны как для научного сообщества, так и для практиков, занимающихся разработкой оптических устройств, а также для дальнейшего совершенствования технологий, использующих замедляющие системы.

ГЛАВА 1. ОБЗОР АКТУАЛЬНЫХ СТАТЕЙ, ПОСВЯЩЕННЫХ ЗС

В данной главе были рассмотрены актуальные замедляющие системы (ЗС) для ламп бегущей волны (ЛБВ). Замедляющие системы были выбраны из статей, представленных за последние 6 лет (11 март 2019 г.-15 ноябрь 2024 г.). Всего в обзоре использовано 6 статей. На их основе был проведен обзор и анализ 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.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ПРЕДСТАВЛЕННЫХ ЗС, ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ В ПРОГРАММЕ HFSS И ВЫБОР КОНКРЕТНЫХ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной 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 выбраны оптимальные модели ЗС. В ходе тщательного обзора статей, особое внимание было уделено трем статьям: «Лампа бегущей волны частотой 220 ГГц на основе модифицированного двойного гофрированного волновода в шахматном порядке» (Рис. 1а), «Замедляющая система с двойной решеткой для ламп бегущей волны в W-диапазоне» (Рис. 1б), «Замедляющая система с винтовыми канавками для лампы бегущей волны на 0.2 ТГц.» (Рис. 1в), где выбранные модели отличились наилучшими характеристиками.

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

После выполнения данных этапов получаем готовые модели ЗС:

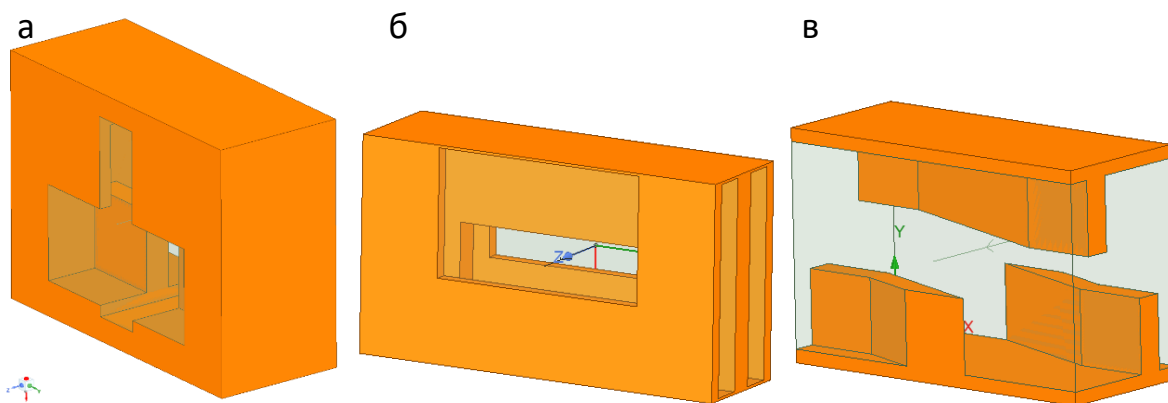


Рис. 1 Готовые модели ЗС.

Результатом данного исследования стало успешное моделирование ЗС в программе HFSS. Построенные модели обладают высокой степенью реалистичности и могут быть использованы в дальнейших исследованиях.

ГЛАВА 3. РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫБРАННОЙ ЗС

В данной главе был проведен расчёт электродинамических характеристик выбранных замедляющих систем. Этот этап исследования позволил получить более глубокое понимание работы ЗС и их потенциала в радиотехнических системах. Результаты расчетов позволили оценить работоспособность и эффективность выбранных моделей, подтверждая их превосходство среди других рассмотренных вариантов.

Пример результата расчета дисперсионной характеристики ЗС (Рис. 8а) приведен ниже (Рис. 2).

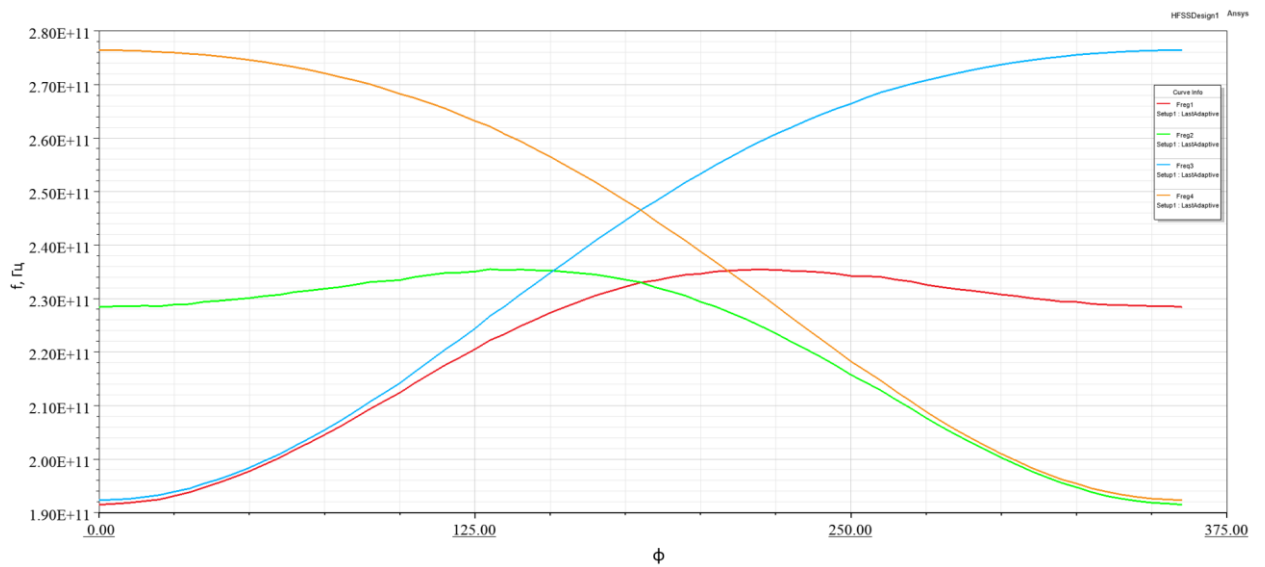


Рис. 2 Дисперсионная характеристика ЗС

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

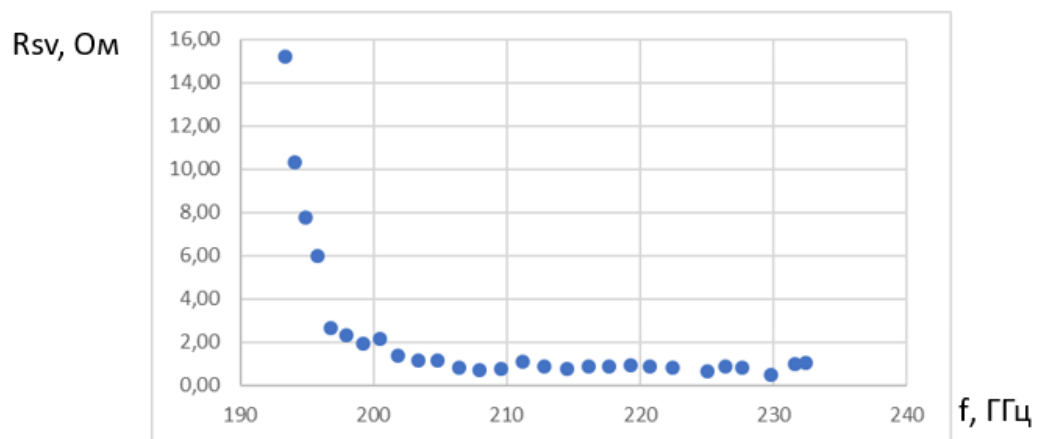


Рис. 3 Зависимость сопротивления связи от частоты.

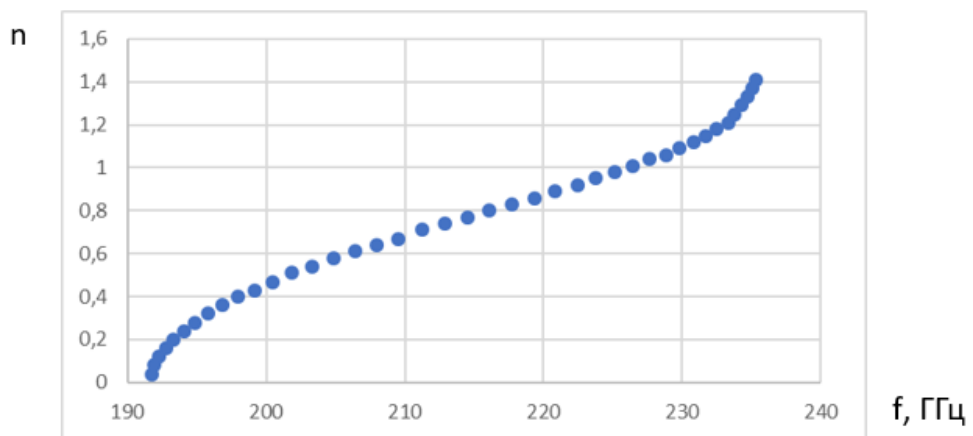


Рис. 4 Зависимость замедления от частоты.

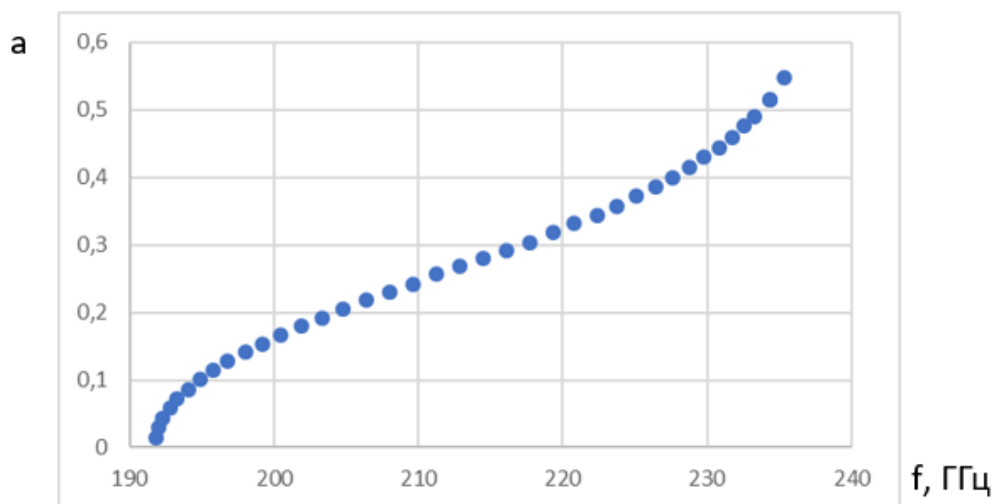


Рис. 5 Зависимость затухания от частоты.

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.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗС С ПОМОЩЬЮ СВИПИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА

В данной главе был проведен анализ характеристик трех замедляющих систем. Результатом данного исследования является построение частотных зависимостей электродинамических характеристик замедляющих систем в программном пакете ANSYS HFSS при свипировании геометрических параметров. Данные зависимости могут быть использованы в дальнейших исследованиях.

Были проведены изменения одного параметра данной замедляющей системы в нескольких вариантах ($\pm 10\%$, $\pm 5\%$ от изначального варианта). Параметром для наблюдения изменений была выбрана высота h лепестков ЗС

Пример результата расчета электродинамических характеристик в зависимости от свипирования геометрического параметра ЗС (Рис. 8а) приведен ниже.

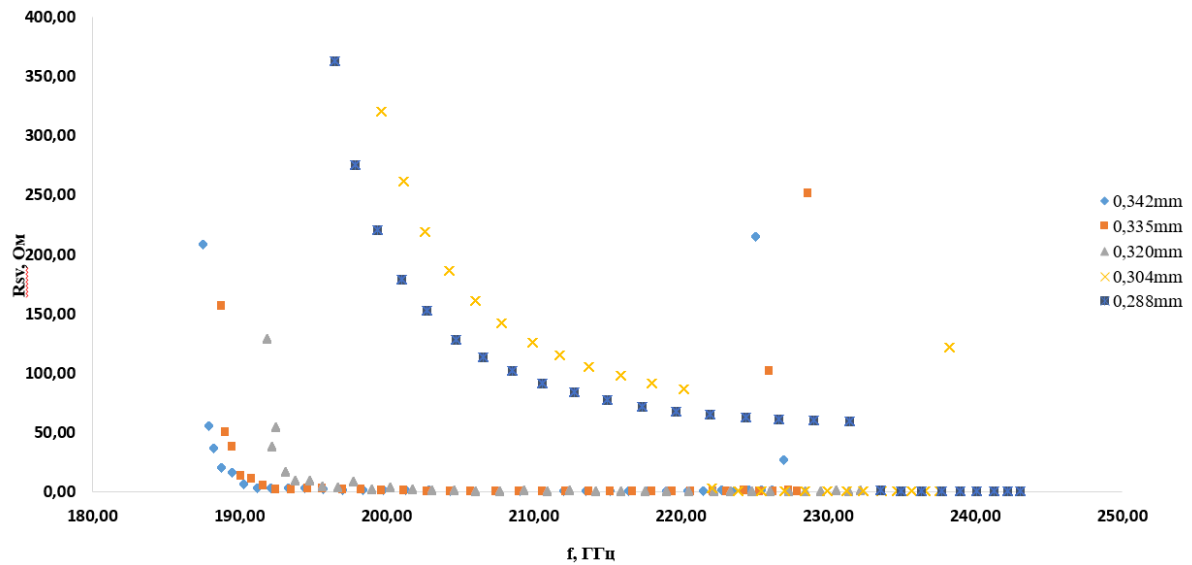
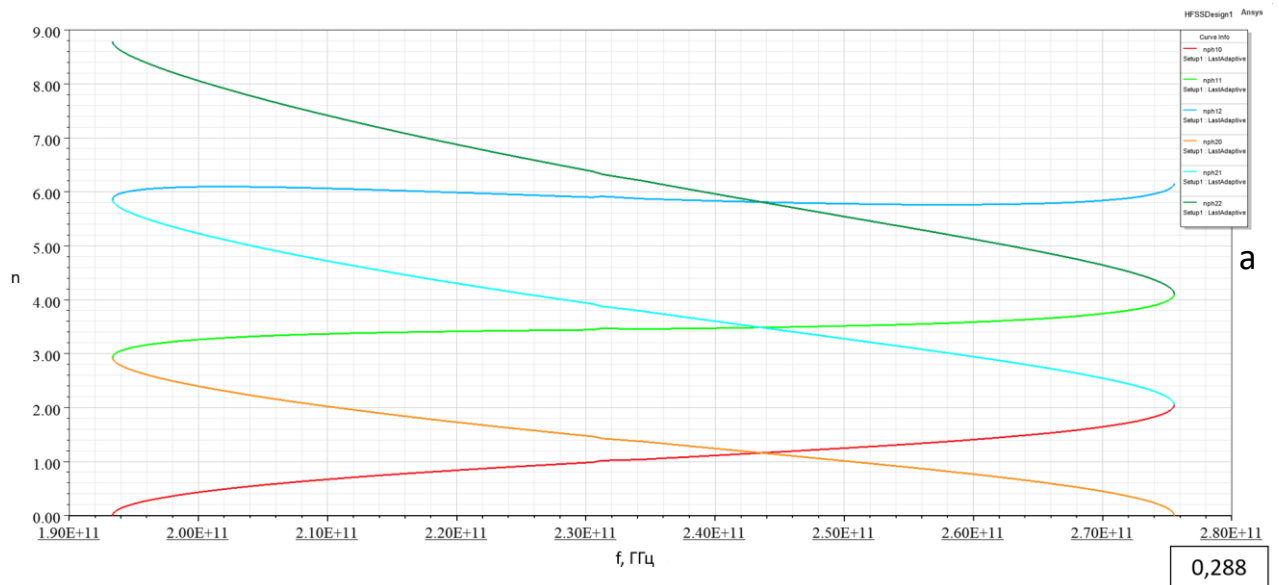


Рис. 6 Зависимость сопротивления связи от частоты.



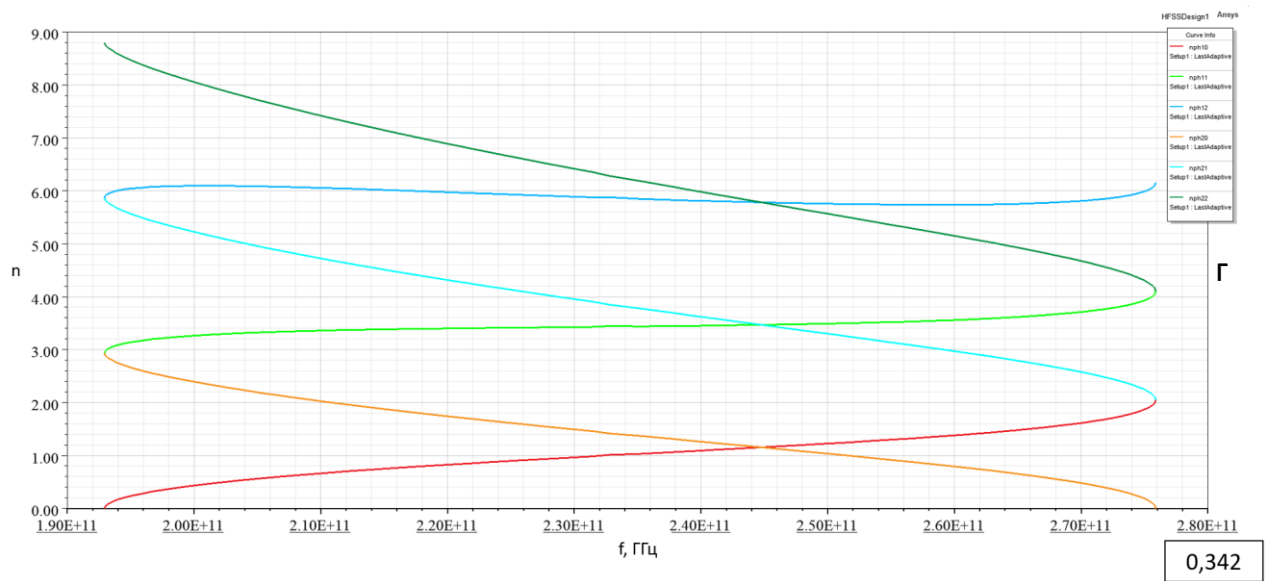
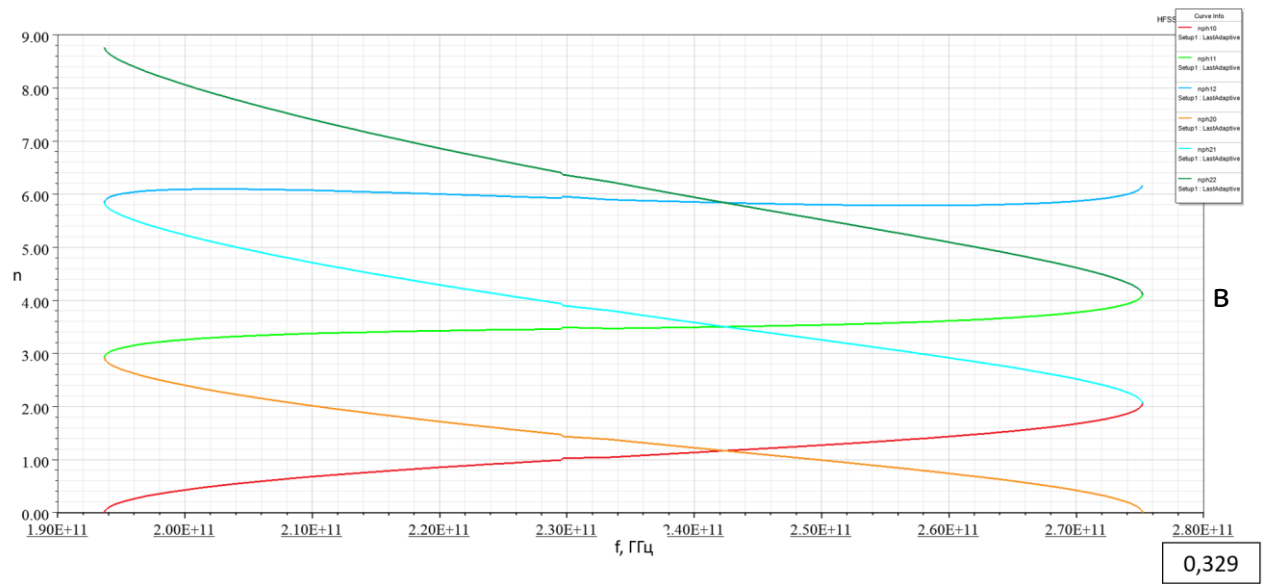
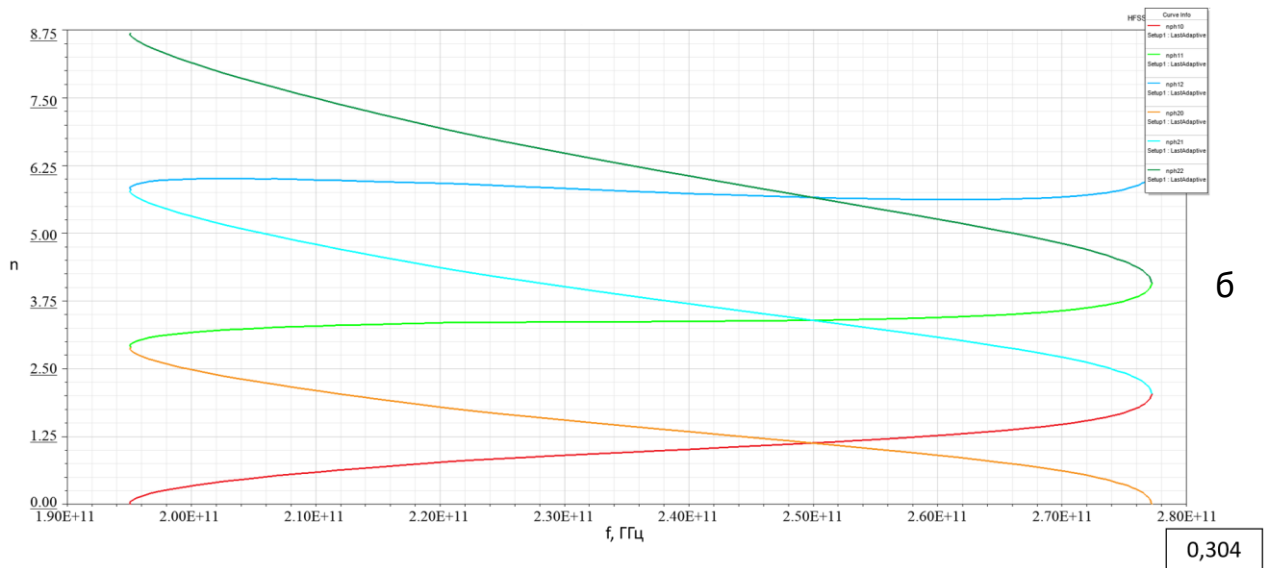


Рис. 7 а,б,в,г - Зависимость замедления от частоты.

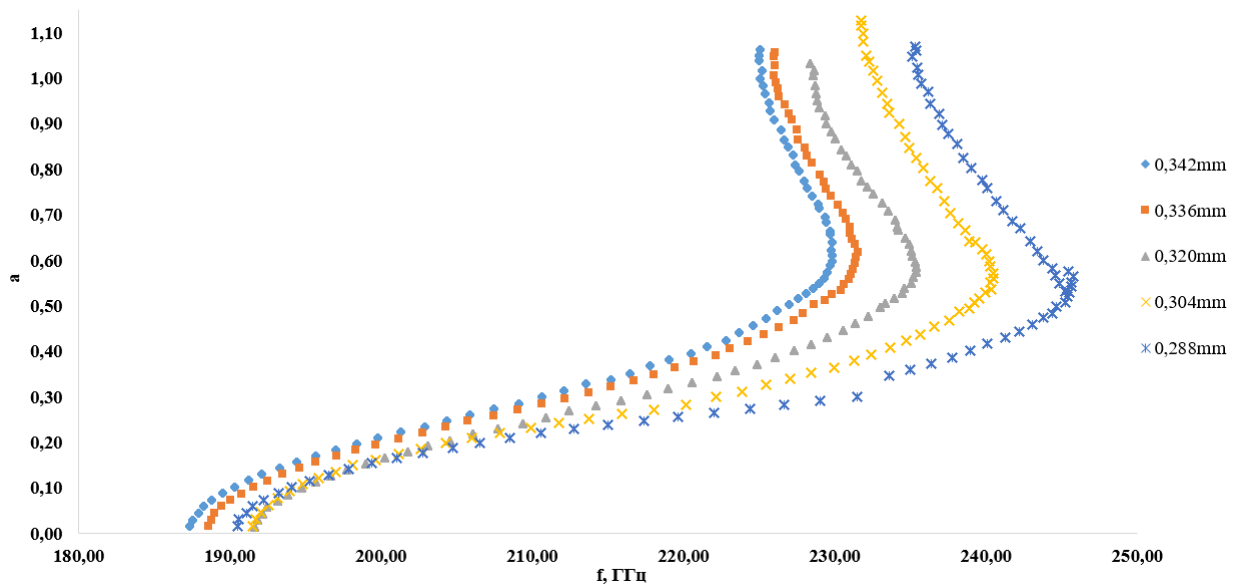


Рис. 8 Зависимость затухания от частоты.

В четвертой главе был проведен анализ полученных электродинамических характеристик при свипировании геометрического параметра ЗС. Полученные зависимости показали, что при увеличении длины лепестков ЗС наблюдается улучшение меры эффективности взаимодействия первой пространственной гармоники с электронным потоком, что показывает зависимость сопротивления связи от частоты (Рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Проведен анализ представленных ЗС с целью выбора моделей для последующего построения. Были выбраны все модели, в связи с их отличными характеристиками.

После выбора моделей в следующей работе было осуществлено построение данных ЗС в программном обеспечении ANSYS HFSS. Полученные результаты смогут подтвердить эффективность выбранных моделей и позволят оценить их работоспособность.

Также результатом данного исследования является построение частотных зависимостей электродинамических характеристик замедляющих систем в программном пакете ANSYS HFSS при свипировании геометрических параметров.

Таким образом, проведенное исследование позволило не только углубить знания в области замедляющих систем, но и проанализировать новые перспективы для дальнейших исследований в данной области науки и техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. Wei, S. Wang, Y. Wei, W. Hu, L. Zhang, Y. Dong, et al., "Square- and rectangular-ring vertex-bar slow wave structures for high-efficiency wide bandwidth TWTs", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 70, no. 1, pp. 296-301, Jan. 2023.
2. G. Paterna, G. Lipari, E. Traina, G. Comparato, A. Muratore, P. Livreri, et al., "Design of a low voltage and high power traveling wave tube based on a sheet-beam rectangular ring-bar slow-wave structure", *IEEE Access*, vol. 12, pp. 9062-9069, 2024.
3. D. Gong, T. Huang, J. Li and B. Li, "Research on automatic measurement method of saturation characteristics of broadband TWT", *Proc. Int. Vac. Electron. Conf. (IVEC)*, pp. 1-2, Apr. 2019.
4. Luqi Zhang, Yi Jiang, A piecewise sine waveguide for terahertz traveling wave tube, June 2022.
5. Weihua Ge, Sheng Yu. A 220 GHz Traveling-Wave Tube Based on a Modified Staggered Double Corrugated Waveguide, November 2024.
6. Babaeihaselghobi, A., & Badri Ghavifekr, H. (2020). A novel H-plane loaded on a double-staggered grating waveguide slow-wave structure for W-band traveling-wave tubes. *Journal of Computational Electronics*.