

Нистратов Николай Павлович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ И
РАСПРОСТРАНЕНИЯ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В СТРУКТУРАХ С
НАМАГНИЧЕННОЙ ФЕРРИТОВОЙ ПЛЕНКОЙ**

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре радиофизики физического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения «Южный федеральный университет» (ЮФУ).

Научный руководитель: **Бабичев Рудольф Карпович** доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Вызулин Сергей Александрович** доктор физико-математических наук, доцент, ФГКВОУ ВПО "Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С. М. Штеменко", профессор кафедры «Техническая защита информации»

Черкесова Лариса Владимировна доктор физико-математических наук, ФГБОУ ВПО "Донской государственный технический университет", профессор кафедры «Математика и информатика».

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие "Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи"

Защита состоится «24» марта 2017 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.208.10 в Южном федеральном университете по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге 5, физический факультет ЮФУ, ауд. 318.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке Южного федерального университета по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге 21 Ж и на сайте: <http://hub.sfedu.ru/diss/announcements/council/20/>

Автореферат разослан « » _____ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.208.10,
доктор физико-математических наук,
профессор



Г. Ф. Заргано

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

На сегодняшний день радиоэлектронная аппаратура на основе магнитостатических волн (МСВ) все чаще используется при обработке сигналов в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ). Это линии задержки (ЛЗ), в том числе и дисперсионные ЛЗ, шумоподавители, электрически перестраиваемые фильтры, направленные ответвители, перестраиваемые генераторы, фазовращатели [1]. Устройства на основе МСВ входят в состав медицинских и измерительных приборов, военной техники, фазированных антенных решеток, спутниковых систем связи и других сложных устройств и комплексов.

Исследования обратных объемных МСВ (ООМСВ), распространяющихся в различных плоскостных структурах, приобрели актуальность благодаря применению их в резонаторных фильтрах [2]. В первую очередь были изучены дисперсионные характеристики ООМСВ в структурах феррит-диэлектрик металл (ФДМ). Их подробное рассмотрение показало необходимость учета при исследовании распространения и расширения волнового пучка ООМСВ неколлинеарности ООМСВ, т.е. неколлинеарности их групповой и фазовой скоростей. При этом ООМСВ обладают невзаимностью [3], которую также требуется принимать в расчет при моделировании процесса распространения луча ООМСВ. Таким образом, теоретический расчет характеристик распространения ООМСВ в плоскостных структурах связан с учетом вышеперечисленных нетривиальных факторов и нуждается в строгом экспериментальном подтверждении.

Современные исследования показывают перспективность применения планарных слоистых волноведущих структур для создания радиоэлектронных элементов на основе МСВ. Чтобы получить требуемые свойства радиоэлектронных элементов на основе МСВ, что, в частности, включает управление распространением волн в ферритовой пленке (ФП), необходимо точно рассчитывать и измерять дисперсионные характеристики МСВ, в том числе и в

области малых волновых чисел, где обычно используемое магнитостатическое приближение применять нельзя. Кроме того, нужно исследовать структуры, в которых ФП окружена диэлектриками с неодинаковой проницаемостью.

Для практического применения используется железо–иттриевый гранат (ЖИГ) в виде эпитаксиальных пленок, одной поверхностью граничащих с подложкой из галлий–гадолиниевого граната (ГГГ). В таких пленках магнитостатические волны возбуждаются и принимаются почти во всем СВЧ диапазоне от 0,2 до 40 ГГц, но применение стандартных дисперсионных уравнений ограничено: при распространении МСВ из диапазона малых волновых чисел (от 0 до 50 см^{-1}) может возникать волна, выходящая из ФП в окружающие диэлектрические пространства [4], что требует точного определения (расчета или измерения) дисперсионных характеристик МСВ.

Неоднородность, расположенная на пути МСВ, вызывает рассеяние волны. Анализ отражения МСВ от неоднородности, расположенной на поверхности ферромагнитной пленки, посвящен ряд теоретических работ, из которых становится ясно, что энергия МСВ, падающая на неоднородность, распределяется между отраженной, прошедшей и рассеянной волнами и зависит от физических свойств неоднородности. Используя слоистые волноведущие структуры, содержащие сильные одиночные дефекты или периодически расположенные неоднородности, можно создавать уникальные миниатюрные СВЧ радиоэлементы с управляемыми характеристиками.

Таким образом, вышеуказанные проблемы являются актуальными и представляют значительный научный и практический интерес.

Цель работы:

– экспериментальное исследование дисперсионных характеристик поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) и обратных объемных магнитостатических волн (ОМСВ) и распределения их мощностей по поверхности касательно намагниченной ФП, окруженной с обеих сторон диэлектриками, имеющими различную диэлектрическую проницаемость;

– экспериментальное исследование профиля пучка ООМСВ, возбуждаемого линейным преобразователем и распространяющегося вдоль ферритовой пленки;

– экспериментальное исследование влияния неоднородностей, расположенных на поверхности ФП, на процесс распространения МСВ.

Для достижения целей работы потребовалось решить следующие задачи:

1. Разработать измерительную установку, позволяющую оперативно выполнять измерения дисперсионных характеристик МСВ, дифракционных профилей пучка МСВ, рассеяния МСВ от неоднородностей. Измерения должны осуществляться в цифровом виде с возможностью последующей обработки на персональном компьютере (ПК).

2. Исследовать имеющиеся методы измерений характеристик МСВ и модифицировать их для проведения экспериментальных исследований.

3. С помощью разработанной измерительной установки провести измерения дисперсионных характеристик МСВ, дифракционных профилей пучка МСВ, рассеяния от неоднородностей и сравнить полученные экспериментальные зависимости с результатами расчетов.

Научная новизна.

1. Впервые использованы поглощающие материалы в конструкции магнитной системы и применен полосно-пропускающий фильтр (ППФ) на выходе волноведущей МСВ–структуры, что позволило уменьшить электромагнитную связь между входным и выходным преобразователями МСВ и снизить сильное влияние телекоммуникационных помех, обнаруженное в процессе экспериментальных исследований.

2. Разработан модифицированный метод подвижного преобразователя, который, благодаря применению генератора качающейся частоты (ГКЧ) и обработке амплитудно–частотных характеристик интерференционной картины при разном расстоянии между преобразователями МСВ, значительно уменьшил время, повысил надежность и технологичность измерения дисперсионных характеристик МСВ.

3. Впервые предложенным модифицированным методом подвижного преобразователя экспериментально исследованы зависимости дисперсионных характеристик и границ частотного диапазона возбуждения ПМСВ и ООМСВ при различных толщинах ФП и различных относительных диэлектрических проницаемостях слоев, граничащих с ферритовой пленкой. Установлено, что измеренные дисперсионные зависимости ПМСВ и ООМСВ хорошо согласуются с рассчитанными строгим электродинамическим методом.

4. Впервые методом подвижного преобразователя экспериментально исследованы дифракционные профили пучка ООМСВ на разных расстояниях от линейного короткозамкнутого преобразователя МСВ.

Впервые проведено исследование рассеяния ПМСВ на металлической неоднородности квадратной формы, расположенной на поверхности ФП.

Научно-практическая значимость работы.

Применение ГКЧ, оцифровка результатов измерения и использование Фурье–анализа для исследования дисперсионных характеристик волноведущих структур, содержащих намагниченную ферритовую пленку, интерференционным методом, позволили значительно сократить время измерений и трудоемкость процесса, а также повысить точность обработки экспериментальных данных.

Подтверждена достоверность численного метода расчета дисперсионных характеристик ПМСВ и ООМСВ в электродинамическом приближении, который можно рекомендовать для проектирования различных устройств на ПМСВ и ООМСВ [A1 – A12].

Разработанная и собранная в процессе диссертационного исследования измерительная установка применяется магистрантами и аспирантами кафедры радиофизики ЮФУ при выполнении выпускных и диссертационных работ по исследованию МСВ, распространяющихся в плоскостойких волноведущих структурах, содержащих ФП.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, обусловлена применением современной измерительной аппаратуры, прошедшей

своевременную поверку, использованием современных программ обработки, визуализации данных и автоматизации измерений, таких, как Maple, Origin, Lab VIEW; многократной воспроизводимостью экспериментальных данных в пределах точности эксперимента; хорошим соответствием результатов поставленных экспериментов и данных, полученных численными методами в работах других авторов.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Модифицированный интерференционный метод, позволяющий измерять дисперсионные характеристики МСВ с малыми волновыми числами.
2. Программно-аппаратный комплекс для измерения дисперсионных характеристик МСВ и визуализации распределения энергии МСВ в структурах диэлектрик-феррит-диэлектрик (ДФД).
3. «Втягивание» поля МСВ в диэлектрик при экспериментальном исследовании дисперсионных характеристик в ДФД структуре.
4. Экспериментальные результаты показывают, что в пленке ЖИГ пучок ООМСВ, возбуждаемый конечным короткозамкнутым микрополосковым преобразователем, распространяется вдоль пленки, расширяясь по мере удаления от преобразователя.
5. «Визуализация» рассеяния ПМСВ на металлической неоднородности впервые получена экспериментально.

Апробация диссертационной работы.

Основные результаты диссертационного исследования доложены на 9 конференциях. Результаты работы регулярно докладывались на международных конференциях «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» (ИРЭМВ-2011, 2015) – Таганрог – Дивноморское: ТТИ ЮФУ, 2011; «Электромагнитное поле и материалы» – Москва – Фирсановка: МЭИ (ТУ), 2011; Международная зимняя школа-семинар по электронике сверхвысоких частот и радиофизике – Саратов: 2012; «Электромагнитное поле и материалы». – Москва: НИУ «МЭИ», 2012; «Электромагнитное поле и материалы» – Москва: НИУ МЭИ», 2013; «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2014) – Саратов:

2014; «Электромагнитное поле и материалы» – Москва: НИУ МЭИ», 2014, а также на Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» («Волны-2011») – Звенигород: МГУ, 2011.

Публикации.

По материалам диссертационной работы опубликовано 12 научных работ [А1-А12], из них 3 – в изданиях, включенных в перечень рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ.

Личный вклад.

Личный вклад автора состоит в разработке и изготовлении установки, которая позволяет проводить измерения и визуализировать следующие характеристики МСВ в планарных структурах, содержащих ФП: дисперсионные характеристики ПМСВ и ООМСВ, расширение профиля пучка ООМСВ, рассеяние ПМСВ на неоднородности в ФП.

Представленные в работе результаты экспериментов, подготовка исследуемых образцов, анализ и интерпретация результатов выполнены лично автором.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы, включающего 117 источников, и приложения. Общий объем диссертации составляет 115 страниц, в том числе 49 рисунков и 1 таблица.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается важность и актуальность темы диссертации, а также достоверность полученных результатов. Формулируются цель, научная новизна, перечисляются основные задачи, решаемые в ходе работы, приводятся положения, выносимые на защиту, научно–практическая значимость работы и сведения об апробации работы. Указывается личный вклад автора, даны структура и объем работы и приводятся публикации по материалам диссертационной работы.

Первая глава посвящена обзору численного метода исследования дисперсионных характеристик МСВ вДФД структурах, использованного автором

для сравнения с результатами измерений. Рассмотренный электродинамический метод позволяет вычислять дисперсионную характеристику с большей точностью, чем обычно используемое магнитостатическое приближение.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию дисперсионных характеристик МСВ. С помощью измерительного стенда исследуется влияние на ход дисперсионной кривой величины магнитного поля, диэлектрических проницаемостей сред, окружающих ФП, и толщины ФП.

В **разделе 2.1** приведен обзор двух интерференционных методов измерения дисперсионной характеристики. Интерференционные методы основаны на анализе интерференции МСВ, прошедшей через исследуемую волноведущую структуру, и опорного радиосигнала. Типовая волноведущая структура изображена на рисунке 1.

Структура состоит из входного и выходного короткозамкнутых микрополосковых преобразователей (1,3), выполненных фотолитографией на подложке (2) и ФП (5) с основанием из гадолиний–галлиевого граната (ГГГ) (4), прижимаемой к преобразователям. Волноведущая структура помещается в касательно направленное постоянное магнитное поле.

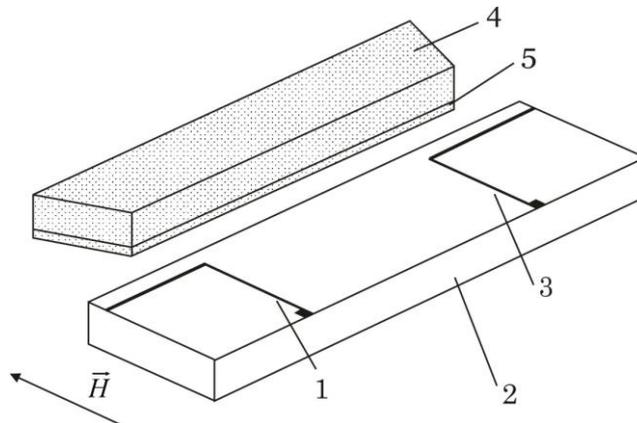


Рисунок 1 – Волноведущая структура. 1 – входной преобразователь; 2 – поликоровая подложка; 3 – выходной преобразователь; 4 – подложка из ГГГ; 5 – ФП.

При подаче СВЧ мощности на входной преобразователь часть мощности преобразуется в МСВ, а часть, за счет электромагнитной связи, передается в приемный преобразователь. МСВ, пройдя через волноведущую структуру, преобразуется в электромагнитную волну выходным преобразователем.

Первый рассмотренный метод восстанавливает ход дисперсионной зависимости из АЧХ интерференции сигнала, прошедшего через волноведущую структуру, и электромагнитной наводки между преобразователями. Такой метод позволяет быстро оценить характер дисперсионной кривой, но число точек, используемых для построения дисперсионной кривой, ограничено и, как правило, невелико.

Второй метод [5] позволяет построить дисперсионную характеристику волноведущей структуры из анализа зависимостей амплитуды измеренной интерференции при постоянной частоте от расстояния между подвижными преобразователями. Помимо длины волны этот "метод подвижного преобразователя" позволяет измерить амплитуды МСВ и наведенного сигнала, а также величину затухания МСВ.

Изученные методы не подходят для измерения малых волновых чисел.

В разделе 2.2 описан модифицированный автором метод подвижного преобразователя (рисунок 2).

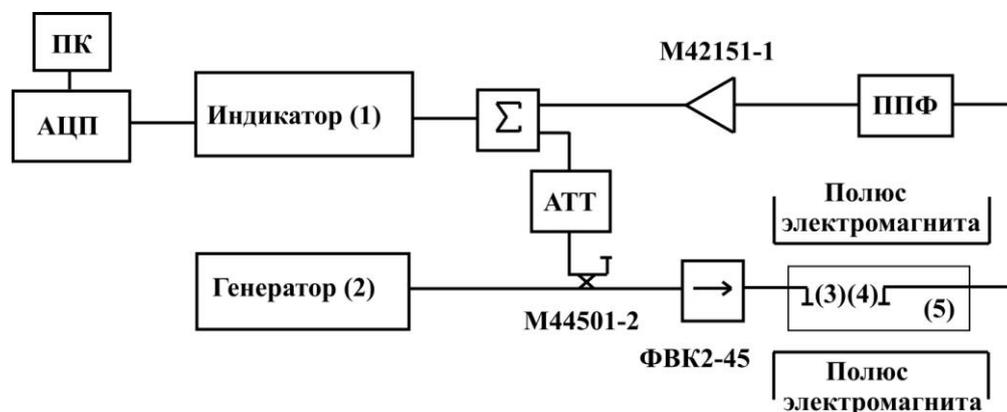


Рисунок 2 – Блок-схема измерительной установки. 1 – Индикатор КСВН и ослабления Я2Р-67; 2 – ГКЧ Р2-42; 3 – входной преобразователь; 4 – выходной преобразователь; 5 – ФП.

Часть мощности генератора (2) в режиме качания частоты ответвлялась в качестве опорного сигнала, амплитуда которого регулировалась аттенюатором (АТТ). Вентиль использовался для согласования тракта с преобразователем (3). МСВ, прошедшая через волноведущую структуру (5), регистрировалась зондом (4), через фильтр и усилитель суммировалась с ответвленным сигналом и регистрировалась индикатором (1).

Амплитуду прошедшего через ферритовую пленку сигнала можно записать

в виде $u(t) = U(\omega, l) \cos(\omega t - k(\omega)l)$. Амплитуда ответвленной быстрой электромагнитной волны представима как $v(t) = V(l) \cos(\omega t)$. Результирующая амплитуда определяется выражением:

$$A^2 = V^2(l) + U^2(\omega, l) + 2V(l)U(\omega, l) \cos(k(\omega)l)$$

Сигнал, измеряемый детектором, является средним значением выходной мощности на периоде усреднения $\frac{2\pi}{\omega}$ и описывается формулой:

$$A(\omega, l) = \frac{1}{\pi} \sqrt{V^2(l) + U^2(\omega, l) + 2V(l)U(\omega, l) \cos(k(\omega)l)}$$

Функция $A(\omega, l)$ достигает максимумов при $k(\omega)l = 2\pi n$ и минимумов при $k(\omega)l = \pi(2n + 1)$.

Пусть при расстоянии между преобразователями l_1 на частоте ω_1 функция $A(\omega, l)$ имеет максимум. Следующий ее максимум появится на частоте ω_1 при перемещении подвижного преобразователя на расстояние l_2 от излучателя МСВ. Тогда волновое число на частоте ω_1 можно найти как $k(\omega_1) = 2\pi / (l_2 - l_1)$.

Модифицированный метод подвижного преобразователя восстанавливает ход дисперсионной характеристики, анализируя изменение АЧХ интерференции ответвленного сигнала и сигнала, прошедшего через волноведущую структуру при перемещении подвижного преобразователя. При этом на результаты измерения не влияют изменения амплитуды, связанные с затуханием МСВ или ухудшением контакта приемного преобразователя с ФП.

В разделе 2.3 приведена конструкция измерительной установки.

Для создания магнитного поля до 159,1 кА/м в установке применялся электромагнит с жестким каркасом. На полюсные наконечники наклеивались эластичные пластины поглотителя марки ХВ-3,2. Электромагнит питался от высокостабильного источника тока с пропорционально-интегральной обратной связью.

На каркас магнита крепилась механическая система, состоящая из крепления зонда (1), направляющих (3,7), кареток (2,6), микрометрических винтов (4,5), позволяющая перемещать датчик-зонд по двум координатным осям с шагом

от 10 мкм и погрешностью 4 мкм.

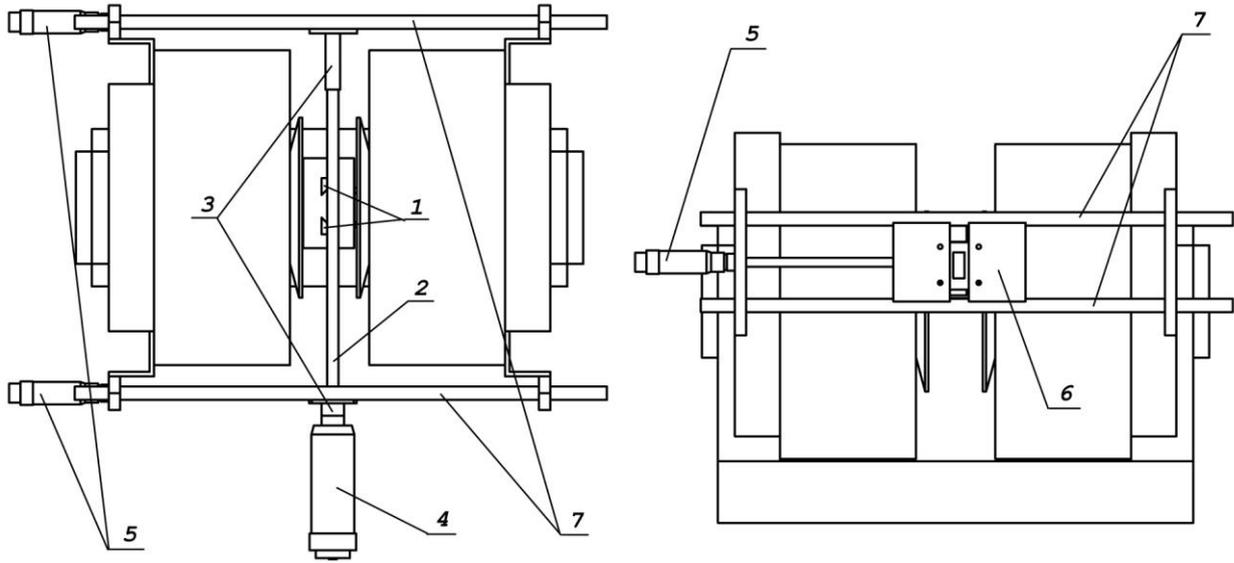


Рисунок 3 – Эскиз измерительной установки. 1 – крепление зонда; 2,6 – каретки; 3,7 – направляющие; 4,5 – микрометрические винты.

В разделах 2.4, 2.6 дано подробное описание экспериментального исследования дисперсионных характеристик ПМСВ и ООМСВ в ДФД структурах.

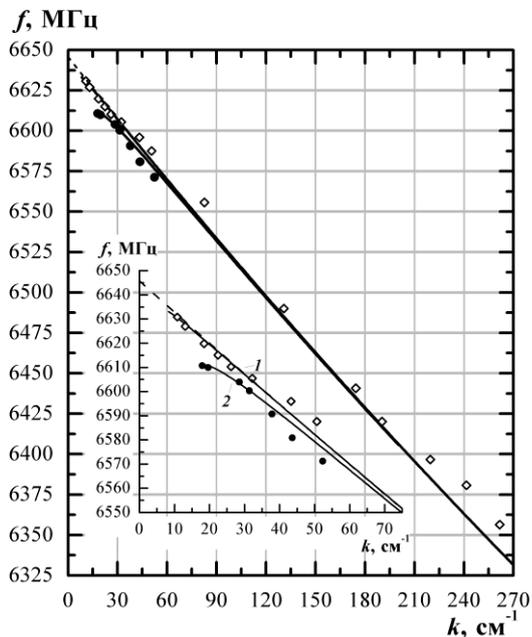


Рисунок 4 – Дисперсионные кривые ООМСВ. 1- структура воздух–ЖИГ–ГГГ; 2 – структура В100–ЖИГ–ГГГ.

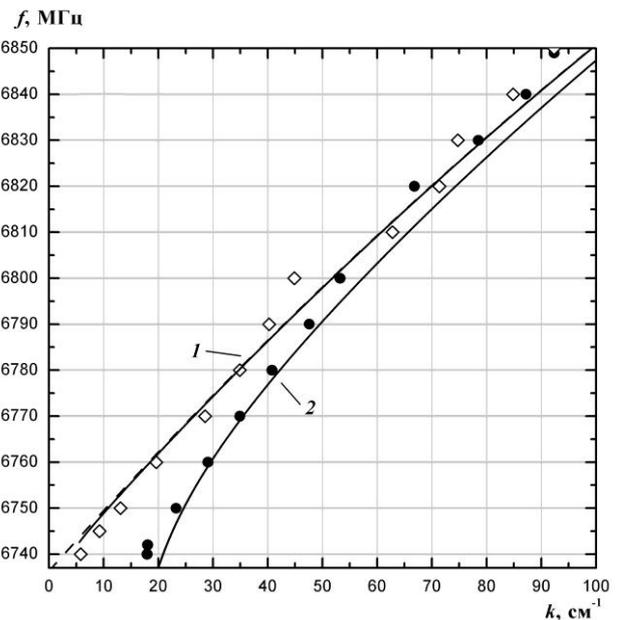


Рисунок 5 – Дисперсионные кривые ПМСВ. 1 – структура воздух–ЖИГ–ГГГ; 2 – структура В100–ЖИГ–ГГГ.

Исследовались дисперсионные характеристики волноведущих структур воздух–ЖИГ–ГГГ и В100–ЖИГ–ГГГ, где В100 – диэлектрическая подложка с $\epsilon = 100 \pm 1$, в диапазоне частот от 5,6 до 6,9 ГГц при величине внешнего поля

подмагничивания от 103,4 до 135,2 кА/м, направленного касательно ФП. Использовались пленки ЖИГ толщиной 6 и 15 мкм, имеющие размеры 20x20 мм и 20x8 мм, соответственно.

Исследовались дисперсионные зависимости ПМСВ и ООМСВ для указанных волноведущих структур в области волновых чисел от 4 до 200 см⁻¹. Измерения волновых чисел от 30 до 200 см⁻¹ проводились методом подвижного преобразователя, а от 4 до 30 см⁻¹ – модифицированным методом.

Сравнение рассчитанных и измеренных дисперсионных характеристик ПМСВ и ООМСВ приведены в **разделе 2.5** и **разделе 2.7**.

Дисперсионные кривые ООМСВ и ПМСВ, рассчитанные электродинамическим методом, показаны на рисунках 4, 5 сплошными линиями, полученные в магнитостатическом приближении – пунктиром.

Представленные расчеты и измерения дают возможность сравнить верхнюю и нижнюю границы частотного диапазона для магнитостатического и электродинамического методов, а также минимально возможные волновые числа для структур воздух–ЖИГ–ГГГ и В100–ЖИГ–ГГГ. Из графиков видно, что в области малых волновых чисел электродинамический и магнитостатический методы дают разные результаты.

В **третьей главе** описаны численный и экспериментальный методы исследования профилей пучка ООМСВ.

В **разделе 3.1** представлен обзор метода расчета профиля пучка ООМСВ, возбуждаемого линейным преобразователем конечной длины в режиме бегущей волны тока. Этот метод использовался для численного исследования дифракционных профилей пучка ООМСВ.

В **разделе 3.2** изложены экспериментальные методы измерения распределения амплитуды МСВ в ФП. Рассмотрены: метод зондового измерения, интерференционный метод подвижного преобразователя [5] (раздел 2.1) и оптический метод [6].

В **разделе 3.3** описана модификация зондового метода измерения распределения амплитуды МСВ.

Для уменьшения времени измерения был применен генератор в режиме качания частоты и индикатор Я2Р-67 с АЦП в качестве самописца. При проведении измерений зондовым методом возникли следующие трудности. Электромагнитная волна от входного преобразователя наводилась на зонд, вызывая интерференцию измеренной индикатором мощности, зависящей от положения зонда. Для уменьшения наводки преобразователи были тщательно согласованы с трактом и экранированы друг от друга. Влияние электромагнитной помехи также удалось уменьшить, используя противофазный радиосигнал.

Зондовый метод оказался пригодным для измерений, но очень трудоемким при подготовке и обработке данных, поэтому применялся только в начале исследования.

В разделе 3.4 представлены результаты исследования дифракционных профилей пучка ООМСВ. Расчет профилей был выполнен методом, описанным в разделе 3.1, а измерение проведено методом подвижного преобразователя на пленке ЖИГ квадратной формы размером 20x20 мм, толщиной 6 мкм и намагниченностью насыщения $4\pi M_0 = 0,175$ Тл в диапазоне частот от 4 до 5 ГГц. Пленка подмагничивалась до состояния насыщения постоянным внешним полем \vec{H} величиной от 71,6 кА/м до 79,6 кА/м, направленным касательно к поверхности пленки.

В разделе 3.5 приведены расчетные и экспериментальные профили пучка ООМСВ, возбуждаемые на частотах $f = 4,58$ ГГц, 4,57 ГГц и 4,56 ГГц. Профили получены для трех значений расстояния между излучателем и зондом: $z_1 = 6\lambda_0$, $z_2 = 12\lambda_0$ и $z_3 = 18\lambda_0$. Из графиков (Рисунок 6) видно, что луч ООМСВ распространяется вдоль пленки, имеет колоколообразную форму, расширяясь и уменьшаясь по амплитуде по мере увеличения расстояния между излучающим и приемным преобразователем (зондом).

Сравнение графиков носит качественный характер, так как расчет проводился для линейного тока, возбуждающего ООМСВ в пленке ЖИГ бесконечной длины и ширины, а в эксперименте использовался

короткозамкнутый проволочный преобразователь, возбуждающий ООМСВ стоячей волной тока, и ФП ограниченного размера.

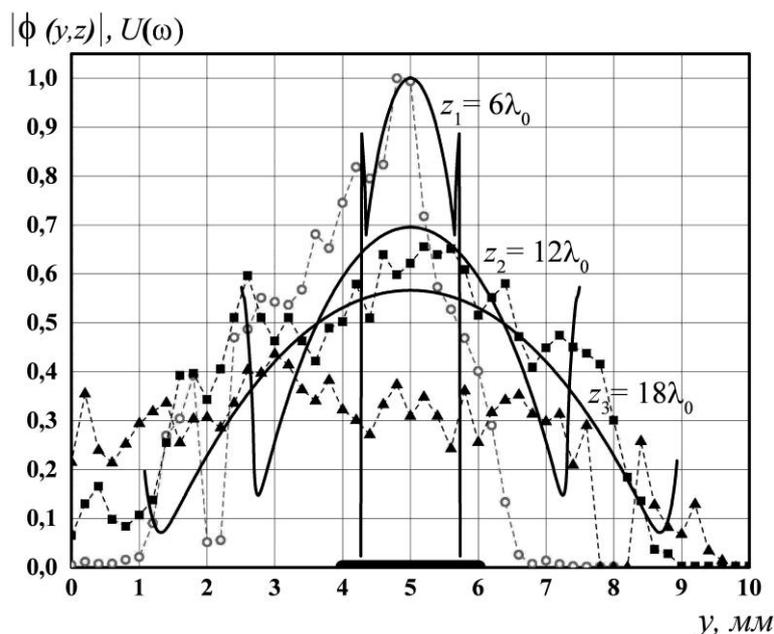


Рисунок 6 – Профили пучка ООМСВ.

В **четвертой главе** описаны численный и экспериментальный методы исследования рассеяния ПМСВ на неоднородности в касательно намагниченной пленке.

В **разделе 4.1** представлен обзор метода расчета рассеяния ПМСВ на неоднородности. Метод позволяет рассчитывать отражение и рассеяние ПМСВ от одиночных дефектов, имеющих размеры порядка длины волны, и применялся для прогнозирования результатов экспериментального исследования.

В **разделе 4.2** приводятся результаты экспериментального исследования рассеяния ПМСВ на неоднородности.

Экспериментально рассеяние ПМСВ исследовано оптическим методом, основанным на изменении волноводных свойств ферритовой пленки при воздействии на нее оптического излучения длиной волны менее 500 нм [6].

При исследовании распределения амплитуды ПМСВ генератор (2) работал в одночастотном режиме. Линейный детектор через усилитель соединялся с выходным преобразователем. Модулированное оптическое излучение, сфокусированное на ФП, вызывало модуляцию участка фронта ПМСВ. С помощью АЦП амплитуда, измеренная детектором, вводилась в компьютер и с

использованием преобразования Фурье в программе LabVIEW измерялась амплитуда ПМСВ на участке ФП, облучаемом оптическим излучением. Посредством такого сканирования оптическим лучом поверхности намагниченной ФП измерялось распределение амплитуды ПМСВ на поверхности ФП.

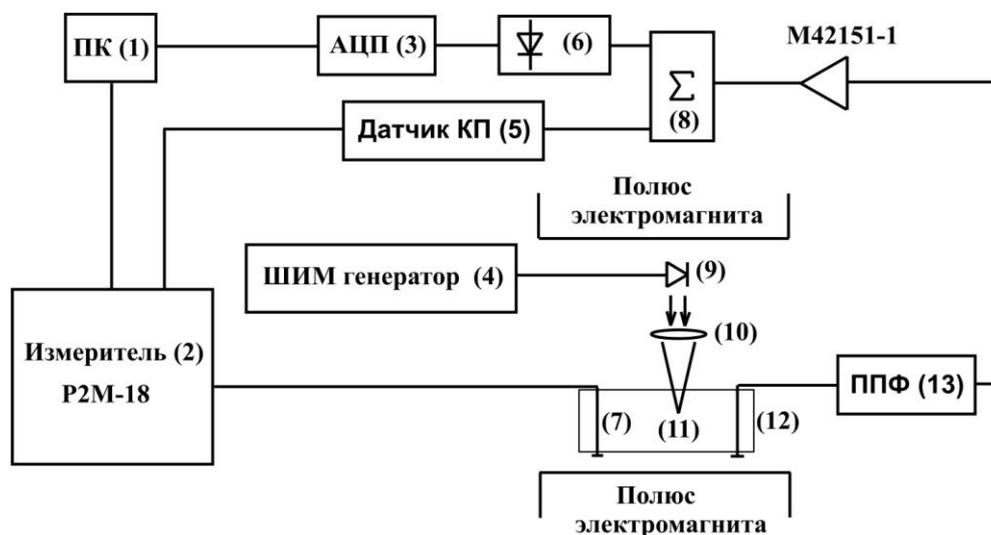


Рисунок 7 – Блок-схема измерения распределения амплитуды ПМСВ оптическим методом. 1 – персональный компьютер; 2 – измеритель модуля коэффициента передачи и отражения; 3 – аналого-цифровой преобразователь; 4 – источник тока лазерного диода; 5 – датчик коэффициента передачи из состава измерителя; 6 – детектор; 7 – входной преобразователь; 8 – сумматор мощности; 9 – лазерный диод; 10 – фокусирующая линза; 11 – пленка ЖИГ; 12 – выходной преобразователь; 13 – фильтр.

В разделе 4.3 представлены результаты измерения пространственного распределения амплитуд ПМСВ. В качестве неоднородности использовалась поликоровая пластина квадратной формы 0,75x0,75 мм, толщиной 0,5 мм с односторонним медным покрытием.

Из графиков АЧХ на рисунке 8 видно, что ПМСВ, проходя через неоднородность, имеет резонансные минимумы, зависящие от формы и типа неоднородности.

На рисунках 9 и 10 представлены графики распределения амплитуд ПМСВ, измеренные для частот экстремумов коэффициента передачи (КП).

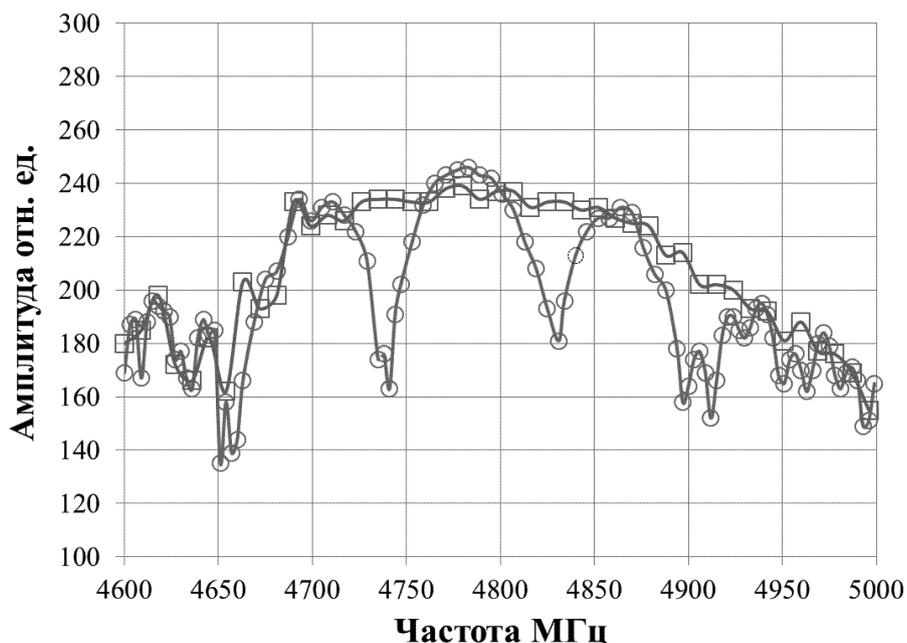


Рисунок 8 - Графики коэффициента передачи. Квадратами обозначены точки коэффициента передачи без неоднородности, кружками – с неоднородностью.

Графики распределения амплитуд ПМСВ на частоте минимума коэффициента передачи 4740 МГц (Рисунок 9): (а) – в отсутствии неоднородности; (б) – с неоднородностью. Белым квадратом обозначено положение неоднородности. Из графиков видно, что ПМСВ на частоте минимума КП, проходя через неоднородность, испытывает сильное затухание.

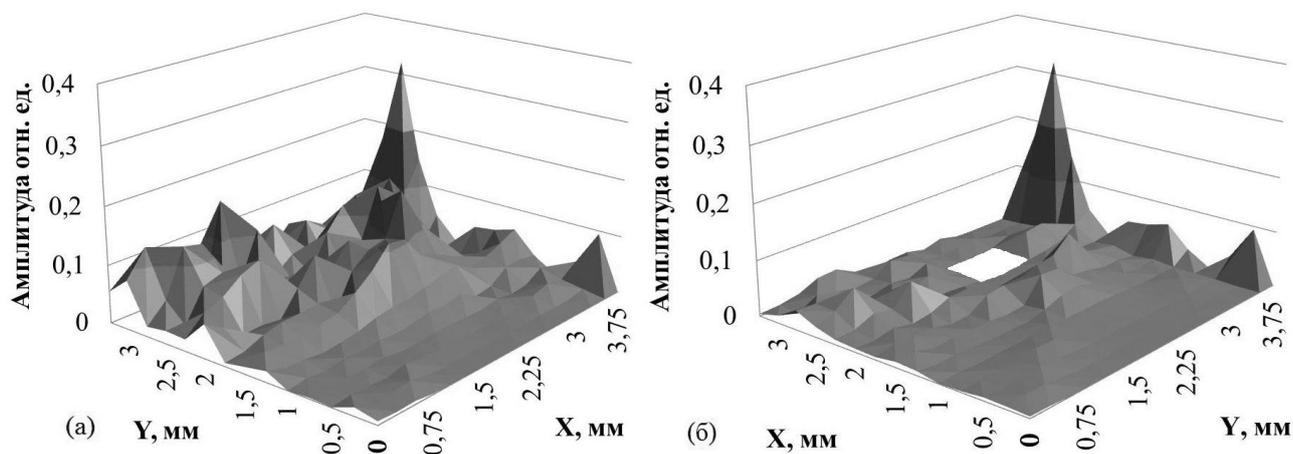


Рисунок 9 – Распределение амплитуд ПМСВ на частоте 4740 МГц.

Графики распределения амплитуд ПМСВ на частоте максимума коэффициента передачи 4773 МГц (Рисунок 10): (а) – в отсутствии неоднородности; (б) – с неоднородностью. Белым квадратом обозначено положение неоднородности. Из графиков видно, что ПМСВ на частоте максимума КП, проходя через неоднородность, меняется незначительно.

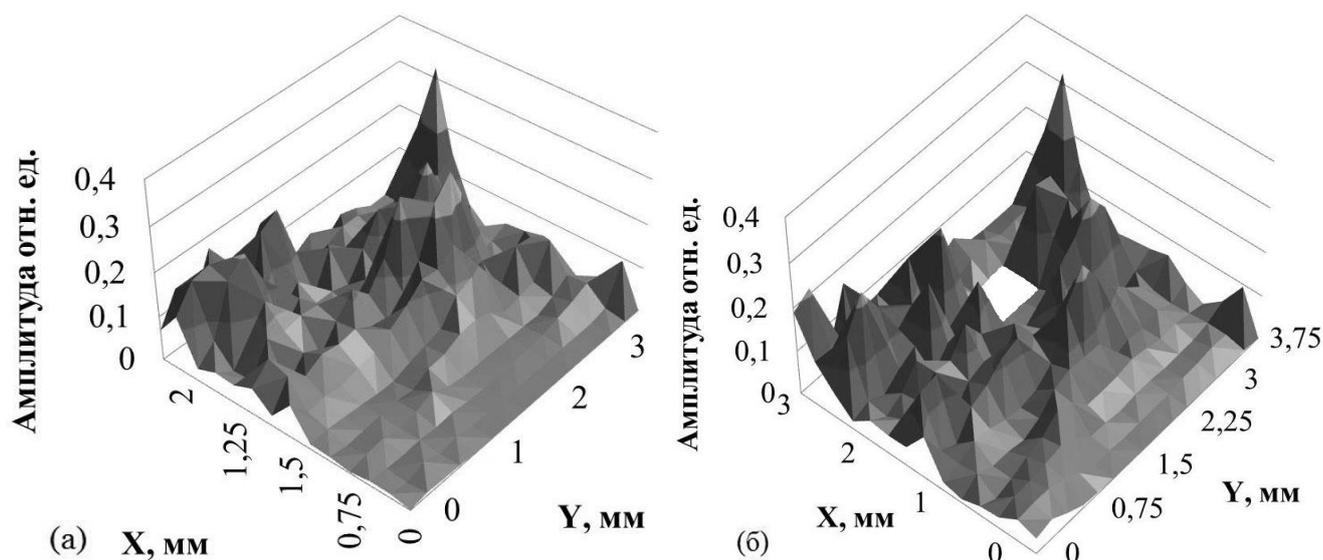


Рисунок 10 – Распределение амплитуд ПМСВ на частоте 4773 МГц.

В приложении приводится описание работы ШИМ генератора, входящего в состав установки для измерения распределения амплитуды ПМСВ оптическим методом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:

1. Создана измерительная установка, позволяющая экспериментально исследовать ДФД структуры тремя методами: методом подвижного преобразователя, методом сканирующего зонда, оптическим методом «визуализации» распределения интенсивности МСВ.

2. Для измерения дисперсионных характеристик ПМСВ и ООМСВ в области малых волновых чисел разработан модифицированный метод подвижного преобразователя, позволивший повысить точность и технологичность, а также значительно снизить затраты времени на проведение измерений и обработку результатов.

3. Экспериментально обнаружено расширение пучка ООМСВ, возбуждаемого линейным короткозамкнутым преобразователем конечной длины. Проведено сравнение профилей пучка ООМСВ, возбуждаемых линейным короткозамкнутым преобразователем, полученных экспериментально и рассчитанных в электродинамическом приближении, для линейного преобразователя, возбуждающего ООМСВ бегущей волной тока.

4. Экспериментально исследованы дисперсионные характеристики ПМСВ и ООМСВ в плоскостой ДФД структуре. Изучено влияние на дисперсионные характеристики таких параметров, как диэлектрическая проницаемость сред, окружающих ФП, толщина ФП и величина внешнего

магнитного поля. Экспериментальные результаты совпадают с дисперсионными кривыми, рассчитанными электродинамическим методом.

5. Оптическим методом впервые проведена «визуализация» распределения интенсивности ПМСВ в пленке ЖИГ при рассеянии МСВ на металлической неоднородности.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Вашковский А. В. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот / А. В. Вашковский, В. С. Стальмахов, Ю. П. Шараевский. - Саратов: Изд. Сарат. ун-та, 1993. 312 с.

[2] Вашковский А. В. Свойства обратных электромагнитных волн и возникновение отрицательного отражения в ферритовых пленках / А. В. Вашковский, Э. Г. Локк // УФН. - 2006. - Т. 176. - № 4. - С. 403-414.

[3] Вашковский А. В. Прямые и обратные неколлинеарные волны в магнитных пленках / А. В. Вашковский, Э. Г. Локк // УФН. - 2006. - Т. 176. - № 5. - С. 557-562.

[4] Вашковский А. В. Влияние диэлектрической подложки и магнитных потерь на дисперсию и свойства поверхностной магнитостатической волны / А. В. Вашковский, Э. Г. Локк // Радиотехника и электроника. - 2001. - Т. 46. - № 6. - С. 729-738.

[5] Зильберман П. Е. Раздельное измерение параметров полезного сигнала и наводки в линиях передачи магнитостатических волн / П. Е. Зильберман, Г. Т. Казаков, В. В. Тихонов // «Радиотехника и электроника». - 1985, - Т. 30, - № 6, - С. 1164 - 1169.

[6] Маковкин А. В. Оптическая визуализация пространственного распределения интенсивности спиновых волн в пленке феррита / А. В. Маковкин Ю. К. Фетисов // Радиотехника и электроника. - 2004 - Т. 49 - № 5 – С. 629 – 632.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

[A1] Нистратов Н. П. Экспериментальное исследование дисперсионных характеристик поверхностных магнитостатических волн / Вяткина С. А., Нистратов Н. П., Бабичев Р. К., Иванов В. Н. // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. - 2012. - Т. 20. - № 5. - С. 84-96.

[A2] Нистратов Н. П. Дисперсия обратных объемных магнитостатических волн в структуре «диэлектрик-феррит-диэлектрик» / Вяткина С. А., Нистратов Н. П., Бабичев Р. К., Натхин И. И. // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2012. - Т. 17. - № 6. - С. 76-80.

[A3] Нистратов Н.П. Экспериментальное исследование дисперсии поверхностных магнитостатических волн / Вяткина С. А., Нистратов Н. П., Бабичев Р. К., Иванов В. Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2012. - Т. 17. - № 10. - С. 43-46.

[A4] Нистратов Н. П. Дисперсионные характеристики поверхностных магнитостатических волн в слоистых структурах, содержащих касательно намагниченную ферритовую пленку / Вяткина С. А., Нистратов Н. П., Иванов В.

Н., Бабичев Р. К. // Труды международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» (ИРЭМВ-2011) – Таганрог – Дивноморское: ТТИ ЮФУ. - 2011. - С. 77-80.

[A5] Нистратов Н. П. Дисперсия поверхностных магнитостатических волн в слоистых структурах, содержащих касательно намагниченную ферритовую пленку / Вяткина С. А., Нистратов Н. П., Иванов В. Н., Бабичев Р. К. // Сборник трудов XIII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» («Волны-2011»). Секция 4. Волновые процессы в неоднородных средах – Звенигород: МГУ. - 2011. - С. 10-14.

[A6] Нистратов Н. П. Экспериментальное исследование дисперсии поверхностных магнитостатических волн, распространяющихся в слоистых структурах, содержащих касательно намагниченную ферритовую пленку / Вяткина С. А., Нистратов Н. П., Бабичев Р. К., Иванов В. Н. // Материалы XIX международной конференции «Электромагнитное поле и материалы» – Москва – Фирсановка: МЭИ (ТУ). - 2011. - С. 107-112.

[A7] Нистратов Н. П. Экспериментальное исследование дисперсионных характеристик поверхностных магнитостатических волн / Вяткина С. А., Нистратов Н. П., Бабичев Р. К., Иванов В. Н. // Материалы XV международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике – Саратов. - 2012. - С.91.

[A8] Нистратов Н. П. Дисперсия обратных объемных магнитостатических волн в слоистых структурах, содержащих касательно намагниченную ферритовую пленку / Вяткина С. А., Нистратов Н. П., Бабичев Р. К., Натхин И. И. // Материалы XX международной конференции «Электромагнитное поле и материалы». – Москва: НИУ «МЭИ». - 2012. - С. 300-305.

[A9] Нистратов Н. П. Экспериментальное исследование пучка ПМСВ, возбуждаемого преобразователем конечной длины / Вяткина С. А., Нистратов Н. П., Бабичев Р. К. // Материалы XXI международной конференции «Электромагнитное поле и материалы» – Москва: НИУ МЭИ». - 2013. - С. 249-253.

[A10] Нистратов Н. П. Экспериментальное исследование профиля обратных объемных магнитостатических волн, возбуждаемых узким преобразователем / Вяткина С. А., Нистратов Н. П., Бабичев Р. К., Тимошенко П. Е. // Материалы XII международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2014) – Саратов. - 2014. - С. 199-204.

[A11] Нистратов Н. П. Экспериментальное исследование профиля волн, возбуждаемых узким преобразователем в структуре диэлектрик-феррит-диэлектрик / Вяткина С. А., Нистратов Н. П., Бабичев Р. К. // Материалы XXII международной конференции «Электромагнитное поле и материалы» – Москва: НИУ МЭИ». - 2014. - С. 259-264.

[A12] Нистратов Н. П. Исследование влияния металлической неоднородности на распределение амплитуд магнитостатических волн по поверхности ферромагнитной пленки / Нистратов, Н. П. Вяткина, С. А. Тимошенко, П. Е. Бабичев, Р. К. Натхин, И. И. // Труды МНК «Излучение и рассеяние электромагнитных волн». – 2015. - С.152-155.