

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

**Исследование электродинамических свойств П- и Н- волноводов с
выступами на ребрах и разработка СВЧ-устройства для равномерной
термообработки диэлектрических материалов на их основе**
НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 4 года обучения
направления 03.06.01 «Физика и астрономия»
физического факультета

Торгашова Евгения Алексеевича

Научный руководитель
профессор кафедры
радиотехники и электродинамики
д.ф.-м.н., профессор

_____ Давидович М.В.

Саратов 2017

Актуальность темы.

Актуальность работы связана с поиском новых высокоэффективных и экологически чистых технологий, предназначенных для термообработки диэлектрических материалов. Известно, что одним из способов повышения эффективности нагрева диэлектрических изделий является применение в качестве источников тепла энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ), которое обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными источниками тепловой энергии. Необходимо отметить, что применение источников микроволновой энергии позволяет обеспечить такие полезные свойства, как тепловая безинерционность процесса нагрева, прецизионность его регулировки, его саморегуляцию, избирательность нагрева многокомпонентных изделий, равномерность нагрева по объему обрабатываемых изделий при рациональном выборе частоты электромагнитных волн и параметров рабочих камер, равномерность нагрева независимо от теплопроводности обрабатываемых изделий, высокую чистоту нагрева, так как микроволновая энергия может подводиться к материалу через защитные диэлектрические оболочки, достаточно высокий коэффициент преобразования микроволновой энергии в тепловую энергию, возможность практического применения новых необычных видов нагрева, таких как избирательный, равномерный, сверхчистый и саморегулирующийся.

Учитывая сказанное, интенсифицировать термообработку диэлектрических материалов при высоком качестве обработки можно путем применения СВЧ-энергии, которая при проникновении электромагнитных волн в глубину материала обеспечивает объемное тепловыделение в нем, а рациональным выбором параметров и характеристик рабочей камеры можно обеспечить равномерный нагрев по всему объему обрабатываемого изделия. Таким образом, актуальной и перспективной является разработка СВЧ-устройств для равномерного нагрева диэлектрических материалов с потерями, параметры которых изменяются в процессе термообработки.

Проведенный в процессе выполнения работы сравнительный анализ известных конструкций микроволновых систем для равномерного нагрева диэлектрических материалов показал, что известные их разновидности, работающих в режиме бегущей волны, как правило, представляют собой, отрезки волноводов различных поперечных сечений или замедляющую систему и элементы их возбуждения. В случаях, для которых определяющим является требование сочетания малых габаритов с высокими электродинамическими параметрами и характеристиками, становится актуальным применение СВЧ-устройств на связанных посредством шлейфовых разветвлений волноводах .

В работе рассмотрена разновидность СВЧ-устройства на связанных посредством шлейфовых разветвлений волноводах, которая обеспечивает решение задачи равномерного объемного нагрева диэлектрических изделий с потерями. Необходимо отметить, что построение анализируемого устройства связано с обеспечением сильной связи основного (первичного) канала (волновода), выполненного на основе прямоугольного волновода (ПрВ), со вспомогательным (вторичным) каналом (волновода), в котором находится обрабатываемый диэлектрик. В качестве вторичного канала рассматриваемого микроволнового устройства для выравнивания плотности тепловых источников в поперечном сечении обрабатываемого изделия может быть использован П-волновод с выступами на ребре (ПВВР) или Н-волновод с выступами на ребре (НВВР), обеспечивающий изменение распределения электрической компоненты основной волны в его поперечном сечении.

Сказанное выше, делает актуальной задачу исследования электродинамических свойств ПВВР и НВВР , которые анализируются обычно одновременно, с целью определения возможности и эффективности применения рассматриваемых линий передачи в качестве базовых элементов СВЧ-устройства на связанных волноводах.

Особое внимание при разработке СВЧ-устройства на связанных ПрВ и ПВВР необходимо обратить на частотную зависимость коэффициентов

передачи шлейфовых разветвлений, которые должны обеспечивать однородную плотность тепловых источников по длине вторичного канала. При этом необходимо, чтобы передаточная характеристика шлейфовых разветвлений менялась незначительно в диапазоне длин волн во вторичном канале, обусловленном изменением диэлектрической проницаемости изделия в ходе нагрева. В связи с этим, актуальной является также задача, связанная с уменьшением неравномерности переходного ослабления шлейфовых разветвлений СВЧ-устройства на связанных ПрВ и ПВВР в рабочем диапазоне частот.

Цель работы состоит в исследовании электродинамических свойств П- и Н-волноводов с выступами на ребрах и разработка на их основе СВЧ-устройства на связанных по широкой стенке посредством шлейфовых разветвлений прямоугольном волноводе и П-волноводе с выступами на ребре для равномерного нагрева диэлектрических материалов.

Основными задачами данной работы являются:

1. Анализ конструкций микроволновых устройств, обеспечивающих равномерный нагрев диэлектрических материалов с потерями.
2. Исследования электродинамических свойств П- и Н-волноводов с выступами на ребрах
3. Разработка СВЧ-устройства на связанных по широкой стенке посредством шлейфовых разветвлений прямоугольном волноводе и П-волноводе с выступами на ребре.

Объектом и предметом исследований работы являются электродинамические свойства П- и Н-волноводов с выступами на ребрах и принципы построения СВЧ-устройства на связанных по широкой стенке посредством шлейфовых разветвлений прямоугольном волноводе и П-волноводе с выступами на ребре для термообработки диэлектрических материалов.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач были использованы методы

эквивалентных схем (МЭС) и конечных элементов (МКЭ), математической физики и линейной алгебры.

Обоснованность и достоверность результатов исследования обеспечиваются точностью используемых методов для анализа электродинамических свойств рассматриваемого СВЧ-устройства, согласованностью характеристик рассматриваемого СВЧ-устройства с имеющимися теоретическими и экспериментальными результатами, опубликованными в ведущих отечественных и зарубежных изданиях, широкой апробацией результатов работы, обсуждением результатов работы на конференциях.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Предложен основанный на совместном применении МЭС и МКЭ комбинированный численно-аналитический подход к исследованию электродинамических свойств ПВВР и НВВР, позволяющий существенно сократить вычислительные затраты.

2. На основе МЭС получены квазианалитические выражения для расчета критических длин основной и первой высшей волн, коэффициента широкополосности и волнового сопротивления ПВВР и НВВР.

3. С использованием полученных на основе МЭС соотношений проведен квазианалитический расчет электродинамических параметров ПВВР и НВВР с однородным диэлектрическим заполнением.

4. С применением МКЭ проведено моделирование структур полей поперечных электрических составляющих основных и первых высших волн ПВВР и НВВР с однородным диэлектрическим заполнением. Отмечено, что геометрические размеры ПВВР и НВВР оказывают существенное влияние на анализируемые структуры полей.

5. Показано, что, изменяя геометрические размеры ПВВР и НВВР, можно добиться выравнивания поперечных электрических компонент основных волн в их поперечных сечениях. Установлены геометрические размеры ПВВР и НВВР, при которых обеспечивается максимальное значение

области квазиравномерного электрического поля в его поперечном сечении.

6. Отмечено, что эффект выравнивания поперечной электрической составляющей основной волны при рациональном выборе размеров ПВВР и НВВР аналогичен влиянию диэлектрических пластин на поперечную электрическую составляющую основной волны в ПрВ.

7. Определено рациональное расположение диэлектрического материала в ПВВР и НВВР, при котором обеспечивается однородная плотность тепловых источников в его поперечном сечении, что является важным условием достижения равномерного нагрева диэлектрических материалов.

8. Определены параметры эквивалентных схем для квазианалитического расчета критических длин основной и первой высшей волн, а также коэффициента широкополосности ПВВР и НВВР со слоистым диэлектрическим заполнением. Отмечено, что полученные квазианалитические соотношения могут быть в дальнейшем адаптированы для расчета электродинамических параметров ПВВР и НВВР с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением.

9. Рассмотрены основные принципы построения СВЧ-устройства на связанных посредством шлейфовых разветвлений ПрВ и ПВВР, позволяющее осуществить объемный равномерный нагрев диэлектрических материалов без изменения продольного профиля вторичного канала и не требующее применения согласующих переходов между ПрВ, на основе которого, как правило, выполнен вывод энергии большинства микроволновых генераторов, и ПВВР с обрабатываемым изделием. Определены условия, которым должны удовлетворять коэффициенты передачи шлейфовых разветвлений для обеспечения однородной плотности тепловых источников по длине термообрабатываемого материала.

10. Рассмотрена методика инженерного расчета коэффициентов передачи шлейфовых разветвлений СВЧ-устройства на связанных по широкой стенке ПрВ и ПВВР со шлейфами сложных сечений, позволяющая

описать электродинамические параметры элементов связи простыми квазианалитическими выражениями, что значительно упрощает анализ влияния их геометрических размеров и электрофизических свойств диэлектрического заполнения на коэффициенты передачи шлейфовых разветвлений.

Теоретическая и практическая значимость исследования состоит в том, что с учетом проведенных исследований электродинамических свойств П- и Н-волноводов с выступами на ребрах, предложена конструкция СВЧ-устройства на связанных по широкой стенке посредством шлейфовых разветвлений прямоугольном и П-волноводе с выступами на ребре, позволяющая обеспечивать равномерный нагрев диэлектрических материалов, как в их поперечном сечении, так и по их длине.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Проведен сравнительный анализ конструкций микроволновых устройств, обеспечивающих равномерный нагрев диэлектрических материалов с потерями. На основе проведенного анализа были выделены конструкции СВЧ-устройств на связанных посредством шлейфовых разветвлений ПрВ и ВСС, которые позволяют выравнивать плотность электрического поля основной волны, как в поперечном сечении обрабатываемого изделия, так и по его длине, без изменения формы поперечного сечения линии передачи с диэлектрическим материалом в направлении распространения волны и применения согласующих переходов между ПрВ, на основе которого, как правило, выполнен вывод энергии большинства генераторов СВЧ-энергии, и ВСС.

2. Предложен основанный на совместном применении МЭС и МКЭ комбинированный численно-аналитический подход к исследованию электродинамических свойств ПВВР и НВВР, позволяющий существенно сократить вычислительные затраты.

3. На основе МЭС получены квазианалитические выражения для расчета критических длин основной и первой высшей волн, коэффициента широкополосности и волнового сопротивления ПВВР и НВВР.

4. С использованием полученных на основе МЭС соотношений проведен квазианалитический расчет электродинамических параметров ПВВР и НВВР с однородным диэлектрическим заполнением. Сравнение результатов расчетов критических длин основной и первой высшей волн, а также коэффициента широкополосности ПВВР и НВВР, полученных МЭС и МКЭ, показало, что рассмотренные в работе квазианалитические выражения позволяют в первом приближении оценить влияние геометрических размеров и электрофизических свойств диэлектрического заполнения анализируемых линий передачи на их электродинамические параметры.

5. С применением МКЭ проведено моделирование структур полей поперечных электрических составляющих основных и первых высших волн ПВВР и НВВР с однородным диэлектрическим заполнением. Отмечено, что геометрические размеры ПВВР и НВВР оказывают существенное влияние на анализируемые структуры полей.

6. Показано, что, изменяя геометрические размеры ПВВР и НВВР, можно добиться выравнивания поперечных электрических компонент основных волн в их поперечных сечениях. Установлены геометрические размеры ПВВР и НВВР, при которых обеспечивается максимальное значение области квазиравномерного электрического поля в его поперечном сечении. Отмечено, что эффект выравнивания поперечной электрической составляющей основной волны при рациональном выборе размеров ПВВР и НВВР аналогичен влиянию диэлектрических пластин на поперечную электрическую составляющую основной волны в ПрВ.

7. Определено рациональное расположение диэлектрического материала в ПВВР и НВВР, при котором обеспечивается однородная плотность тепловых источников в его поперечном сечении, что является

важным условием достижения равномерного нагрева диэлектрических материалов.

8. Определены параметры эквивалентных схем для квазианалитического расчета критических длин основной и первой высшей волн, а также коэффициента широкополосности ПВВР и НВВР со слоистым диэлектрическим заполнением. Отмечено, что полученные квазианалитические соотношения могут быть в дальнейшем адаптированы для расчета электродинамических параметров ПВВР и НВВР с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением.

9. Рассмотрены основные принципы построения СВЧ-устройства на связанных посредством шлейфовых разветвлений ПрВ и ПВВР, позволяющее осуществить объемный равномерный нагрев диэлектрических материалов без изменения продольного профиля вторичного канала и не требующее применения согласующих переходов между ПрВ, на основе которого, как правило, выполнен вывод энергии большинства микроволновых генераторов, и ПВВР с обрабатываемым изделием. Определены условия, которым должны удовлетворять коэффициенты передачи шлейфовых разветвлений для обеспечения однородной плотности тепловых источников по длине термообрабатываемого материала.

10. Рассмотрена методика инженерного расчета коэффициентов передачи шлейфовых разветвлений СВЧ-устройства на связанных по широкой стенке ПрВ и ПВВР со шлейфами сложных сечений, позволяющая описать электродинамические параметры элементов связи простыми квазианалитическими выражениями, что значительно упрощает анализ влияния их геометрических размеров и электрофизических свойств диэлектрического заполнения на коэффициенты передачи шлейфовых разветвлений.

11. Предложенная в работе конструкция СВЧ-устройства на связанных по широкой стенке посредством шлейфовых разветвлений ПрВ и ПВВР может быть с успехом использована при построении микроволновых

установок для объемного равномерного нагрева диэлектрических материалов.

Научно-квалификационная работа состоит из введения, трех глав, и заключения.

Во введении обосновывается актуальность работы, сформулированы цель работы, определены объект и методы исследований, изложена научная новизна, полученные в работе, показана ее практическая ценность, приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту. Представлены сведения об апробации работы и внедрении результатов работы, кратко раскрыто содержание разделов работы.

В первой главе работы проведен сравнительный анализ известные конструкции микроволновых устройств, обеспечивающих равномерное тепловыделение в обрабатываемом материале. Проведенный обзор этих устройств показал, что задача обеспечения равномерного объемного нагрева диэлектрических изделий распадается на две: первая связана с обеспечение равномерного тепловыделения в поперечном сечении обрабатываемого материала, вторая направлена на создание равномерного тепловыделения по его длине.

Кроме того, на основе проведенного сравнительного анализа были выделены конструкции микроволновых устройств на связанных посредством шлейфовых разветвлений ПРВ и ВСС, которые обеспечивают равномерный нагрев диэлектрического материала, как в его поперечном сечении, так и по его длине, без изменения профиля вторичного канала.

Во второй главе на основе комбинированного численно-аналитического подхода, базирующего на совместном применении МЭС и МКЭ и позволяющем существенно сократить вычислительные затраты, проведены исследования электродинамических свойств ПВВР и НВВР. С применением МЭС получены квазианалитические выражения для расчета критических длин основной и первой высшей волн, коэффициента широкополосности и волнового сопротивления ПВВР и НВВР с однородным

диэлектрическим заполнением, по которым проведен расчет их электродинамических параметров. Сравнение результатов расчетов критических длин основной и первой высшей волн, а также коэффициента широкополосности ПВВР и НВВР, полученных МЭС и МКЭ, показало, что рассмотренные в работе квазианалитические выражения позволяют в первом приближении оценить влияние геометрических размеров и электрофизических свойств однородного диэлектрического заполнения анализируемых линий передачи на их электро-динамические параметры.

С применением МКЭ в настоящей главе проведено моделирование структур полей поперечных электрических составляющих основных и первых высших волн ПВВР и НВВР с однородным диэлектрическим заполнением, показавшее, что геометрические размеры рассматриваемых линий передачи оказывают существенное влияние на анализируемые структуры полей. При этом показано, что, изменяя геометрические размеры ПВВР и НВВР, можно добиться выравнивания поперечных электрических компонент основных волн в их поперечных сечениях. В результате проведенных во второй главе исследований установлены геометрические размеры ПВВР и НВВР, при которых обеспечивается максимальное значение области квазиравномерного электрического поля в их поперечном сечении. Отмечено, что эффект выравнивания поперечной электрической составляющей основной волны при рациональном выборе размеров ПВВР и НВВР аналогичен влиянию диэлектрических пластин на поперечную электрическую составляющую основной волны в ПрВ. С учетом сказанного, было определено рациональное расположение диэлектрического материала в ПВВР и НВВР, при котором обеспечивается однородная плотность тепловых источников в его поперечном сечении, что является важным условием достижения равномерного нагрева диэлектрических материалов.

В заключении приведены основные результаты и выводы, полученные в результате выполнения работы, и перспективы их практического применения.

Полный объём работы составляет 94 страницы, включая 23 рисунка. Список литературы содержит 129 наименований.

Апробация работы.

Материалы работы докладывались и обсуждались на международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологии» (Саратов, 18–20 апреля 2011 г.; Пенза, 20–22 сентября 2011 г.; Волгоград, 29–31 мая 2012 г.; Харьков, 2–4 октября 2012 г.; Саратов, 22–26 апреля 2013 г.; Нижний Новгород, 27–30 мая 2013 г.), «Проблемы управления, обработки и передачи информации» (Саратов, 18–21 октября 2011 г.; Саратов, 23–26 сентября 2013 г.), всероссийской научной конференции «Микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 4–7 июня 2012 г.)

По результатам работы опубликовано 14 печатных работ, одна из которых входит в перечень ВАК для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата технических наук.

Публикации автора по теме работы в журналах, **включенных** в перечень ВАК:

1. Скворцов А. А., Торгашов Е. А., Соловьев М. А. Квазианалитический расчет широкополосности несимметричных двугребневого и четырехгребневого волноводов // Антенны. 2013. № 7. С. 11–13.

Публикации автора по теме работы в журналах, **не включенных** в перечень ВАК:

1. Скворцов А. А., Соловьев М. А., Торгашов Е. А. Квазистационарная оценка критической длины основной пяти- и десятигребневых волноводов // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXIV Междунар. науч. конф., Т. 10. Пенза: Пенз. гос. технол. академия, 2011. С.

87–88.

2. Скворцов А. А., Торгашов Е. А., Соловьев М. А. Моделирование структуры поля основной волны П- и Н-волноводов с выступами на ребрах // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXIV Междунар. науч. конф. Саратов: Сар. гос. тех. ун-т, 2011. С. 3,4.

3. Торгашов Е. А., Соловьев М. А. (науч. рук. Скворцов А. А.). Приближенно-аналитический расчет критической длины основной пяти- и десятигребневых волноводов // Математические методы в технике и технологиях: XXIV Междунар. науч. конф., сб. трудов. конф. молодых ученых и студентов СГТУ. Саратов: Сар. гос. тех. ун-т, 2011. С. 35–37.

4. Скворцов А. А., Торгашов Е. А., Соловьев М. А. Комбинированный подход к расчету структуры поля и критической длины основной волны П- и Н-волноводов с выступами на ребрах // Техническая электродинамика и электроника: сб. науч. трудов. Саратов: Сар. гос. тех. ун-т, 2011. С. 42–46.

5. Скворцов А. А., Соловьев М. А., Торгашов Е. А. Исследование влияния геометрических размеров П- и Н-волноводов с выступами на ребрах на структуры поля их основной волны // Проблемы управления, обработки и передачи информации: сб. трудов II Междунар. науч. конф., Т. 2. Саратов: Издат дом «Райт-Экспо», 2012. С. 123–124.

6. Скворцов А. А., Соловьев М. А., Торгашов Е. А. Квазистационарная оценка критической длины первой высшей волны П- и Н-волноводов с выступами на ребрах // Проблемы управления, обработки и передачи информации: сб. трудов II Междунар. науч. конф., Т. 2. Саратов: Издат дом «Райт-Экспо», 2012. С. 125–128.

7. Скворцов А. А., Торгашов Е. А., Соловьев М. А. Квазианалитическая оценка одноволнового режима работы П- и Н-волноводов с выступами на ребрах // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф., Т. 6. Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2012. С. 57–59.

8. Скворцов А. А., Соловьев М. А., Торгашов Е. А. К расчету

критической длины основной волны несимметричных дву- и четырехгребневого волноводов // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф., Т. 6. Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2012. С. 59–61.

9. Скворцов А. А., Соловьев М. А., Торгашов Е. А. Разработка СВЧ-устройства на связанных волноводах для равномерного нагрева диэлектрических материалов // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф., Т. 9. Харьков: Национ. техн. ун-т, 2012. С. 165–167.

10. Скворцов А. А., Торгашов Е. А., Соловьев М. А. Квазистационарный расчет критических длин основной и первой высшей волн и коэффициента широкополосности П- и Н-волноводов с выступами на ребрах // Микроэлектроника СВЧ: сб. трудов всеросс. науч. конф. СПб: Сакт-Петербург. гос. электротехн. ун-т, 2012. С. 292–296.

11. Торгашов Е. А. (науч. рук. Скворцов А. А.) Разработка СВЧ-устройства на П-волноводе с выступами на ребре для термообработки диэлектрических материалов // Математические методы в технике и технологиях. Участники школы молодых ученых и программы УМНИК: сб. трудов XXVI Междунар. науч. конф. Саратов: Сар. гос. тех. ун-т., 2013. Ч.1. С. 242–244.

12. Скворцов А. А., Соловьев М. А., Торгашов Е. А. О расчете критической длины первой высшей волны несимметричных дву- и четырехгребневого волноводов // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXVI Междунар. науч. конф., Т. 9. Саратов: Сар. гос. тех. ун-т, 2013. С. 373–374.

13. Скворцов А. А., Торгашов Е. А., Соловьев М. А. Применение П-волновода с выступами на ребре для равномерного нагрева диэлектрических материалов // Проблемы управления, обработки и передачи информации: сб. трудов III Междунар. науч. конф. Саратов: Издат дом «Райт-Экспо», 2013. Т.3 С. 163–169.