УДК 621.365.5+66.08+615.849.19+621.383 *05.12.07*

НИИ «ПРИКЛАДНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ, ФОТОНИКИ И ЖИВЫХ СИСТЕМ»: НАУЧНАЯ ШКОЛА «МИКРОВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ, ТЕХНОЛОГИИ И КОМПЛЕКСЫ»

Г.А. Морозов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, Казань, ул. Карла Маркса, 10

Аннотация. В работе приводится краткий обзор результатов фундаментальных и прикладных исследований, выполненных за последние десять лет в НИИ прикладной электродинамики, фотоники и живых систем представителями научной школы «Микроволновые процессы, технологии и комплексы» Казанского национально исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ).

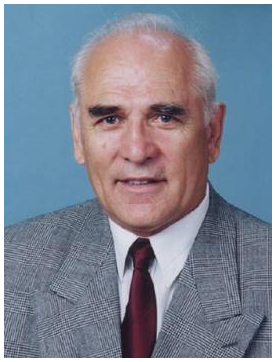
Ключевые слова: микроволновые процессы, технологии и комплексы, математическое моделирование, метрология, техническая электродинамика, радиофотоника.

Историческая справка. ОНИЛ МРП, НИЦ ПРЭ

Развитие Казанской научной школы «Антенны и техника СВЧ» в начале 50-х годов прошлого века началось с создания в КАИ радиотехнического факультета и кафедры радиоуправления, заведующий которой, кандидат технических наук Поповкин Василий Иванович, и стал ее основателем.

Им были заложены, а в работах его учеников были развиты научные основы теории синтеза антенн по заданной диаграмме направленности с использованием теории целых функций и некорректно поставленных задач, теории многомерной оптимизации и вероятностных методов и т.д.

Наравне с новыми научными и техническими решениями по разработке антенн, СВЧ-устройств и их технологий для радиоуправления, телекоммуникаций, задач электромагнитной совместимости, новым методам их проектирования и производства осуществляется изыскание рациональных путей построения антенн или антенных систем для новых областей использования радиоизлучения (технологий производства, биологии, медицины и т.д.), включая их метрологию.



Морозов Г. А.

С конца 80-х годов начинается история развития структурного научно-исследовательского подразделении КАИ, отраслевой НИЛ Минрадиопрома СССР (ОНИЛ МРП), на которую и были возложены эти функции.

Приказ Минрадиопрома от декабря 1987 года и фактическое создание ОНИЛ МРП в апреле 1988 года, которую возглавил к.т.н., доцент кафедры радиоуправления РТФ Морозов Г.А., становится стартовой точкой развития в КАИ нового научного направления – микроволновые технологии – и создания научной школы «Микроволновые процессы, технологии и комплексы» (НШ МВПТК).

Более чем 20-ти летняя история развития ОНИЛ МРП, преобразованная в 1994 году в научно-исследовательский центр прикладной

электродинамики (НИЦ ПРЭ) КГТУ-КАИ, который, в свою очередь, как ведущий центр возглавил в 1995 году секцию «Микроволновые технологии и устройства» при Головном Совете по радиоэлектронике РФ, достигла своей кульминации в 2000 году и ознаменовалась защитой директором НИЦ ПРЭ Морозовым Г.А. докторской диссертации на специальную тему.

Седельников Ю.Е.

В 2003 году в издательстве «Радиотехника» вышла в свет монография «Низкоинтенсивные СВЧ-технологии: проблемы и реализации» под редакцией Морозова Г.А. и Седельникова Ю.Е. [1].

Именно этот период является периодом развития фундаментальных и прикладных научных исследований, внедренных в реальные секторы экономики СССР и РФ, которые составили основу НШ МВПТК, и позволили говорить о ее формировании, как свершившемся факте.

Научная школа «Микроволновые процессы, технологии и комплексы».

Основатель научной школы: Морозов Г.А. д.т.н., профессор, Заслуженный работник высшей школы РФ, Заслуженный деятель науки и техники РТ, Заслуженный профессор КНИТУ-КАИ.

Руководитель научной школы – Морозов Г.А.

Состав научной школы: Морозов Г.А. д.т.н., профессор; Анфиногентов В.И. д.т.н., профессор; Морозов О.Г. д.т.н., профессор; Седельников Ю.Е. д.т.н., профессор; Веденькин Д.А. к.т.н., доцент; Галимов М.Р. к.т.н.; Гараев Т.Г. к.т.н., доцент; Гынку С.П. к.в.н.; Крыницкий П.П. к.т.н.; Лапочкин М.С. к.т.н.; Макаров А.Г. к.в.н.; Мягченков А.В. к.т.н.; Насыбуллин А.Р. к.т.н., доцент; Потапова О.В. к.т.н., доцент; Самигуллин Р.Р. к.т.н., доцент; Севастьянов А.А. к.т.н.; Смирнов С.В. к.т.н.; Стахова Н.Е. к.т.н., доцент; Степанов В.В. к.т.н.; Тахаув А.А. к.т.н.; Фархутдинов Р.В. к.т.н.; Шакиров А.С. к.т.н., доцент.

История развития ОНИЛ МРП и НИЦ ПРЭ, достигнутые в рамках НШ МВПТК результаты имеют богатую библиографию [2-18]. В конце 2021 года в журнале «Электроника, фотоника и киберфизические системы» [19] вышла антология НИОКТР, включающая все разработки ОНИЛ МРП, НИЦ ПРЭ и НШ МВПТК, выполненные в период с 1988 по 2021 годы.

Морозов О.Г.

Учитывая направления развития НШ МВПТК и достигнутые результаты, НИЦ ПРЭ в 2012 году преобразуется в НИИ прикладной электродинамики и живых систем. Возглавил НИИ ПРЭФЖС д.т.н., проф., зав. кафедрой телевидения и мультимедийных систем КНИТУ-КАИ Морозов О.Г.

Проф. Морозов Г.А. стал советником директора, возглавил в НИИ ПРЭФЖС научно-образовательный центр (НОЦ) «НИЦ ПРЭ» и является научным соруководителем другого НОЦ «Техническая электродинамика и фотоника живых систем».

Такое объединение кафедры и НИИ потребовало переформатирования образовательной и научной деятельности кафедры, которая стала фактически основателем нового научного направления – радиофотоника – и центром подготовки специалистов для него. В 2014 году кафедра нового формата получила название – кафедра радиофотоники и микроволновых технологий.

С 2012 года начинается новый интенсивный этап развития теоретических исследований и практических разработок обоих НОЦ НИИ ПРЭФЖС и НШ МВПТК, проводимых под руководством д.т.н., профессора, Заслуженного работника высшей школы РФ, Заслуженного деятеля науки и техники РТ, Заслуженного профессора КНИТУ-КАИ Морозова Г.А. Результатам и достижениям этого периода и посвящена настоящая статья.

1. Математическое моделирование СВЧ нагрева

Математическое моделирование СВЧ нагрева позволяет выбрать оптимальные режимы работы, которые обеспечивают при меньших энергетических и временных затратах получение требуемого качества обрабатываемого материала. Моделированием и исследованием процессов, происходящих в СВЧ камерах, занимаются многие ученые и институты, как в России, так и в странах ближнего и дальнего зарубежья.

Расчет электрического и температурного полей для сред с электрическими параметрами, зависящими от температуры, представляет собой весьма сложную математическую проблему - необходимость совместного решения уравнений Максвелла и уравнения теплопроводности, которое вызывает большие трудности даже с использованием ЭВМ.

В алгоритм расчета температурного поля приходится вводить мощность тепловых источников, равную дивергенции вектора Пойнтинга. Вектор Пойнтинга затруднительно найти вследствие отсутствия решения уравнений Максвелла для сред с параметрами, произвольно зависящими от температуры. Поэтому многие исследования микроволнового нагрева проводят с помощью численных методов решения этих задач: численное осесимметричное моделирование нагрева нефти под действием СВЧ электромагнитного излучения, оценки глубины прогрева, распределения температуры и скорости фильтрации на одномерных или двумерных моделях, подвижных и неподвижных сред.

Одной из серьезных проблем создания технологических СВЧ установок является формирование заданных температурных распределений в обрабатываемом материале. В большинстве случаев для эффективной СВЧ обработки материалов требуется обеспечение равномерного распределения энергии по их объему, в других же случаях - осуществление повышенной концентрации энергии в заданном месте.

Диэлектрические потери возрастают с ростом температуры, что способствует более интенсивному тепловыделению. Температура преимущественно увеличивается в местах, соответствующих максимумам напряженности электрического поля. При переходе через так называемую «критическую точку» рост температуры приобретает лавинообразный характер.

Равномерное распределение температурного поля по всему объему может быть достигнуто путем облучения среды двумя встречно направленными потоками электромагнитного излучения, или пропусканием электромагнитной волны через камеру нагрева поочередно, в противоположных направлениях.

При построении математических моделей СВЧ нагрева диэлектрического слоя конечной толщины уравнение теплопроводности и начальные условия задачи Коши остаются неизменными. Отличия между моделями заключаются в распространении СВЧ электромагнитной волны в среде. Электромагнитные поля в слое диэлектрика, образующиеся в зависимости от заданной математической модели, будут различны. Изменяется в уравнении, описывающем температурное поле, функция удельной мощности тепловых потерь.

Анфиногентов В.И.

Научной основой новых работ по указанному направлению после докторской диссертации Морозова Г.А. следует считать докторскую диссертацию проф. Анфиногентова В.И. «Математическое моделирование СВЧ нагрева диэлектриков». Изложенные в ней методы математического моделирования нашли продолжение в ряде кандидатских диссертаций.

Тахаув А.А.

2011. Тахаув А.А. «Математическое моделирование СВЧ нагрева диэлектрика с учетом фазовых переходов». Многообразие форм и физических свойств веществ, требующих применения СВЧ технологий в технологических процессах приводит к изучению важного класса нелинейных проблем теплообмена, который связан с процессами фазовых превращений (процессы плавления и затвердевания материалов). Задачи теплопереноса с подвижными границами, вызванными изменением агрегатного состояния вещества, получили название задач типа Стефана. Данный класс задач относится к одним из наиболее сложных задач математической физики. Классический вариант задачи Стефана, сформулированный для фазовых переходов типа плавление–кристаллизация, сводится к уравнению теплопроводности в области, с заранее неизвестной границей, разделяющей твердую и жидкую фазы и имеющей температуру, равную температуре фазового превращения. Подвижная граница раздела фаз обеспечивает нелинейность задачи. При исследовании данных проблем разработаны математические модели, обеспечивающие эффективность, равномерность и экономичность нагрева вещества с помощью СВЧ энергии, а также, в условиях задачи Стефана, равномерность движения фазовой границы.

Насыбуллин А.Р.

2012. Насыбуллин А.Р. «Разработка и исследование СВЧ-устройств для технологий переработки полиэтилентерефталата». Исследования и разработка перспективных химических технологий переработки ПЭТФ до уровня исходного мономера, отличающихся меньшими энергетическими затратами и экологической чистотой, является одним из актуальных и приоритетных направлений развития науки и техники развитых государств. Существенное улучшение качества протекающих реакций при химической переработке ПЭТФ, снижение энергетических затрат и сокращение продолжительности необходимого теплового воздействия можно обеспечить путем использования энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона. Достигнутая цель работы – создание лабораторных и промышленных электродинамических реакторов деполимеризации полиэтилентерефталата с адаптивным управлением параметрами электродинамического воздействия в ходе технологического процесса на основе разработанных СВЧ-устройств, основанные, в частности, на исследовании распространения ЭМП СВЧ-диапазона в используемой гетерогенной реакционной смеси и адаптивного технологического воздействия на указанную смесь с учетом изменения электрофизических свойств ее компонентов в ходе деполимеризации.

Лапочкин М.С.

2013. Лапочкин М.С. «Разработка и исследование СВЧ-устройств для плавления снежно-ледяной массы». Основной проблемой, ограничивающей возможность широкого применения электродинамических технологических установок СВЧ-диапазона для плавления снежно-ледяной массы (СЛМ) относится необходимость учета особенностей изменения диэлектрических параметров СЛМ в ходе технологического процесса с фазовыми переходами. Если для ряда некоторых задач найдены решения по возбуждению необходимых профилей ЭМП, регулировке мощности СВЧ-обработки, конструкциям аппликаторов и рабочих камер, то вопросы осуществления адаптивного управления параметрами СЛМ в процессе ее плавления практически не рассматривались. К таким задачам следует отнести: регулирование объема расплавляемой СЛМ; регулирование объемной доли компонент расплавляемой СЛМ, например, воды, которая характеризуется макси-

мальным поглощением энергии ЭМП СВЧ-диапазона; применение комбинированных воздействий с целью управления характеристиками межфазных слоев СЛМ; методы контроля параметров технологического процесса, позволяющих выработать воздействия для адаптивного управления параметрами СЛМ и их согласования, как параметров нагрузки с параметрами возбуждаемых ЭМП. Достигнутая цель работы – разработка принципов построения, методов анализа и синтеза СВЧ-устройств для создания электродинамических технологических установок для плавления снежно-ледяной массы на основе исследования распространения ЭМП СВЧ-диапазона в многослойной среде, состоящей из разных фаз воды, методов адаптивного управления ее параметрами посредством регулирования объема, уровня талой воды, энергии интенсифицирующего ультразвукового воздействия, и алгоритмов выработки управляющих решений с использованием контроля КСВ рабочей камеры в ходе технологического процесса.

2. Метрология. Диэлектрический СВЧ-контроль

Измерение интенсивности распределения электромагнитных и тепловых полей микроволновых технологических комплексов (МВТК) важно, по крайней мере, в двух аспектах. На этапе проектирования необходимо знать характер распределения интенсивности ЭМП в рабочей камере, т.к. степень его однородности (или неоднородности) существенным образом будет определять качество микроволновой обработки в проектируемом комплексе. На этапе эксплуатации характеристики распределения интенсивности ЭМП в рабочей камере необходимы для мониторинга МВТП и оперативного адаптивного управления его параметрами.

На этапе проектирования МВТК возможности оценки неоднородности распределения поля расчетным путем весьма ограничены. Поэтому наиболее реалистичным представляется ее экспериментальное определение. Для указанных задач, вообще говоря, требуется измерять пространственное распределение удельной поглощенной мощности, что может быть заменено измерением модуля напряженности электрического поля или даже измерением приращения температуры при условии кратковременного нагрева. Особенность измерений такого рода состоит в том, что требование их оперативности не является принципиальным.

На этапе эксплуатации измерение распределения полей производится с целью текущего контроля процесса микроволновой обработки или управления её параметрами в МВТК адаптивного типа. В этих случаях измерениям присущ ряд характерных особенностей. Во-первых, измерения должны проводиться весьма оперативно, что полностью исключает использование приемов, основанных на экспозиции чувствительных элементов с последующим считыванием информации вне рабочей камеры. Во-вторых, не представляется возможным использовать различные температурные датчики, например, резистивные, соединенные с регистрирующей аппаратурой металлическими проводниками. В-третьих, несколько иными являются требования к измеряемым величинам. Возможны две принципиально различные задачи: измерение (контроль) текущих пространственных распределений электромагнитных или тепловых полей и текущее определение (контроль) средней температуры материала в рабочей камере в процессе обработки. Перечисленные особенности сужают арсенал возможных средств измерений и весьма осложняют их реализацию.

Таким образом, в настоящее время не существует универсальных методов, пригодных для решения задач измерения распределения полей на различных этапах для различных типов комплексов и обрабатываемых материалов.

Их использованию должна предшествовать серьезная метрологическая проработка, причем при разработке практических методов измерений параметров электромагнитных и

тепловых полей следует иметь в виду, что различна и степень изученности методов по изучению диэлектрических характеристик обрабатываемых материалов.

Научной основой работ по указанному направлению после докторской диссертации Морозова Г.А. следует считать ранее указанную кандидатскую диссертацию доц. Насыбуллина А.Р. Изложенные в ней методы трансферта волоконно-оптических технологий в радиодиапазон и применения датчиков на фотонных СВЧ-кристаллах нашли продолжение в ряде кандидатских диссертаций.

Севастьянов А.А.

2014. Севастьянов А.А. «Брэгговские СВЧ-структуры в коаксиальном кабеле для систем контроля уровня жидких сред». Наблюдающаяся на современном этапе научно-технического развития тенденция трансфера оптических и радиочастотных технологий определила повышенный интерес к подобным устройствам как аналогам оптических фотонных кристаллов, брэгговских структур и метаматериалов. Исследование свойств таких устройств в одном диапазоне электромагнитных колебаний может способствовать открытию новых качеств и явлений в другом диапазоне. Одним из направлений обмена технологий являются сенсорные приложения. Примером может служить волоконно-оптическая брэгговская решетка, широко используемая в измерительной технике, аналогом которой в радиодиапазоне можно назвать коаксиальный волновод с периодическими неоднородностями в продольном сечении. Работа посвящена развитию научно-технических подходов к решению задач измерения параметров материальных сред и физических полей, базирующихся на использовании в качестве преобразовательного элемента брэгговской структуры в радиочастотном коаксиальном кабеле. В частности, исследуются свойства и характеристики преобразовательных элементов измерителей уровня жидких продуктов. Достигнутая цель работы создание научно-технических основ проектирования брэгговских сенсорных СВЧ-структур в коаксиальном кабеле, на принципе функционирования которых основываются преобразователи уровня жидких сред, подтвержденные результатами вычислительного и физического эксперимента на базе предложенных методов для оценки измерительных характеристик и свойств предложенных сенсорных структур.

Фахрутдинов Р.В.

2018. Фархутдинов Р.В. «Средства контроля диэлектрических параметров жидких сред на основе брэгговских СВЧ структур в коаксиальном волноводе». В последнее время рядом ученых ведутся исследования в области анализа и синтеза резонансных структур в виде отрезков периодических линий передач с эффектом брэгговского отражения для определения электрофизических параметров материалов и изделий. Наиболее значимые результаты в этом направлении получены в КНИТУ-КАИ (Казань), СГУ (Саратов) и СибГАУ (Красноярск). Настоящая работа посвящена развитию научно-технических подходов к решению задач измерения параметров материальных сред, базирующихся на применении в качестве преобразовательного элемента брэгговской структуры в СВЧ коаксиальном волноводе. Сформулированы общие принципы работы указанных средств измерительного контроля Разработаны математические модели различных конфигураций брэгговских структур, позволяющих использовать их при анализе характеристик и свойств чувствительных элементов, оценивать их метрологические характеристики, а также использовать в модели измерений для воплощения в инструментарии средств измерительного контроля диэлектрических параметров жидкостей. Представлены рекомендации к выбору параметров неоднородных волноводов для обеспечения одноволнового режима распространения электромагнитных волн в периоди-

ческой структуре. На основе разработанных математических моделей проведена оценка неопределенностей измерения диэлектрических параметров, сформулированы рекомендации для выбора варианта структуры при различных значениях их реальной и мнимой частей. Показано, что введение фазового сдвига в брэгговскую СВЧ структуру, представляющую дефект в изменении периодичности в середине структуры, позволяет получить высокодобротную резонансную область в характеристике коэффициента отражения. Данный эффект позволяет с высокой точностью оценить диэлектрические параметры жидкостей с малыми потерями. Введение квази-периодических профилей в брэгговской структуре, такие как аподизация и чирпирование по различным законам позволило получить различную форму характеристики отражения, уменьшить влияние побочных резонансов.

Смирнов С.В.

2021. Смирнов С.В. «Многосенсорная система контроля температуры и влажности для реализации адаптивных процессов СВЧ-обработки органических отходов животноводства». Существенное улучшение качества процесса переработки органических отходов птицеводства и коневодства, снижение энергетических затрат и сокращение продолжительности необходимого теплового воздействия можно обеспечить путем использования экологически чистой энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона, а затраты на проектирование, совершенствование и оптимизацию устройств СВЧ-нагрева существенно уменьшаются за счет построения и исследования математических моделей процессов, происходящих в рабочих камерах. Наиболее совершенным, с точки зрения возможностей достижения требуемых показателей качества СВЧ-обработки органических отходов птицеводства и коневодства, являются технологические СВЧ-установки и комплексы, управление которыми основано на принципах адаптивной организации. Для организации адаптивного контроля и управления процессами обработки органических отходов птицеводства и коневодства, необходимо разработать многосенсорную систему контроля температуры и влажности обрабатываемой среды, встроенную в СВЧ-комплекс, непосредственно влияющих на электрофизические параметры обрабатываемой среды. Достигнуто решение научной и практической задач диссертации, которые состояли в исследовании диэлектрических характеристик птичьего помета и конского навоза, их зависимостей от температуры и влажности, исследовании влияния на них энергии ЭМП СВЧ -диапазона в ходе технологических процессов СВЧ-обработки, в частности, нагрева и сушки; разработке алгоритмов адаптивного управления их протеканием, а также создании СВЧ-датчиков влажности резонансно-планарного типа с улучшенными характеристиками по добротности и точности измерений, сгруппированных с адресными волоконно-оптическими датчиками температуры, организованных в единую многосенсорную сеть для получения информации о текущих значениях температуры и влажности в ходе СВЧ-обработки, являющихся входными параметрами для контура адаптивного управления.

3. Радиофотонные сети квази-распределенного контроля тепловых и электромагнитных полей в адаптивных СВЧ-комплексах

В решении ряда важнейших социальных и научно-технических проблем мирового развития радиофотоника занимает одно из важнейших мест. Эффективность радиофотонных методов определяется, прежде всего, высокой скоростью, эффективностью и помехозащищенностью обработки радиочастотных сигналов в оптическом диапазоне. Наглядным примером радиофотонных систем являются телекоммуникационные волоконно-оптические системы, в которых на оптической несущей передаются, обрабатываются и принимаются информационные сигналы в полосе частот 10, 40, а теперь уже 100 и 400 ГГц.

С их развитием неразрывно связано развитие техники сенсорных волоконно-оптических систем и применение в них волоконно-оптических датчиков (ВОД), строящихся на базе волоконных брэгговских структур (ВБС), в частности, решеток (ВБР). Возросшие возможности телекоммуникационных технологий позволяют создавать различные ВБС и пространственно-разнесенные сенсорные сети на их основе, применяемые в системах контроля процессов в МВТК. Благодаря присущим ВБС преимуществам, таким как малый размер и вес, невосприимчивость к электромагнитным полям, простота мультиплексирования, определенным природой волокна, они лежат в основе измерения температуры, механических деформаций, коэффициента преломления, как раздельно, так и комплексированно, в силу мультипликативности брэгговского отклика.

Классически ВОД можно разделить на три большие группы: точечные, квази-распределенные и распределенные. Точечные ВОД на основе ВБС или их квази-распределенная последовательность условно представляют собой устройства с прямым кодированием «длина волны – измеряемая величина» и, как правило, преобразуют в измеряемую величину сдвиг центральной длины волны спектрального резонансного отклика, либо некоторой спектральной резонансной особенности в нем. При этом методы интеррогации распределенных ВОД не сильно отличаются от предложенных для ВБР, поскольку имеют схожую с решетками природу информативного контура, а именно, сверхузкополосные контура усиления или поглощения, вызванные рассеянием Мандельштама-Бриллюэна, или сверхширокополосные контура стоксовой и антистоксовой составляющих, вызванные рассеянием Рамана. Поэтому объединение всех трех типов ВОД в единую сенсорную сеть представляется вполне обоснованным и перспективным.

НуреевИ.И.

Сахабутдинов А.Ж.

Кузнецов А.А.

Интеррогаторы – приборы, с помощью которых опрашиваются ВБС, строятся, как правило, на основе сложных дорогостоящих оптико-электронных устройств: оптических анализаторов спектра (ОАС), сканирующих или пространственных оптических фильтров с ПЗС, оптического узкополосного фильтра с зависящей от длины волны спектральной характеристикой склона. В последнее время развиваются более простые и дешевые методы, основанные на оптической рефлектометрии во временной (OTDR) и частотной (OFDR) областях. Радиофотонные методы интеррогации значительно упростят интеррогацию, и, практически, позволят отказаться от интеррогатора в его классическом понимании.

Научной основой работ по указанному направлению после докторской диссертации Морозова Г.А. следует считать докторские диссертации Морозова О.Г. «Симметричная двухчастотная рефлектометрия в лазерных системах контроля параметров природной и искусственных сред», Нуреева И.И. «Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных волоконно-оптических датчиков», Сахабутдинова А.Ж. «Радиофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах и их применение для решения практических задач», Кузнецова А.А. «Методы и средства радиофотонного векторного анализа на основе сверхузкополосного пакета дискретных частот как нового типа зондирующего излучения». Изложенные в них

методы построения радиофотонных сетей квази-распределенного контроля, в том числе, тепловых и электромагнитных полей в адаптивных СВЧ-комплексах нашли продолжение в ряде кандидатских диссертаций.

Денисенко П.Е.

2015. Денисенко П.Е. «Волоконно-оптические брэгговские датчики со специальной формой спектра для систем климатических испытаний». Для построения волоконно-оптических сенсорных систем используются телекоммуникационные волокна, например, SMF-28, с различными покрытиями, сохраняющими свою работоспособность при температурах от - 100 до 300 °С. Значительное внимание в области ВОСС отводится использованию квази-распределенных и точечных технологий измерений. В этом случае волокно используется только как среда передачи информации от ВОД, мультиплексированных по различным технологиям. В работе проведен анализ возможности синтеза ВБР с вогнутой, треугольной симметричной и ассиметричной формами спектра с целью построения на их основе датчиков температуры и влажности с линеаризованными характеристиками; проведено моделирование измерительных характеристик датчиков на основе указанного типа решеток с использованием метода обратного преобразования Фурье; дано теоретическое обоснование способов измерения температуры и влажности на основе четырехчастотного зондирования ВБР со специальной формой спектра; разработаны практические рекомендаций по созданию оптико-электронной измерительной аппаратуры волоконно-оптических систем климатических испытаний на основе применения в них ВБР со специальной формой спектра и четырехчастотных способов зондирования.

Алюшина С.Г.

2016. Алюшина С.Г. «Методы и средства двухчастотного симметричного зондирования селективных элементов пассивных оптических сетей для контроля их спектральных характеристик и температуры». Пассивные оптические сети (ПОС) являются основным физическим уровнем для предоставления услуг и построения квази-распределенных сенсорных сетей по технологиям «волокно-до-х» (от англ. «fiber-to-the-x (FTTx)», где х – область измерения). Революционное развитие технологии «волокно-до-х» не позволяет более игнорировать стоимость эксплуатации, управления и обслуживания ПОС, и требует ее учета на том же приоритетном уровне, как и стоимость строительства. При контроле ПОС ее конфигурация является важным фактором, определяющим выбор метода мониторинга. Основная структура ПОС с временным мультиплексированием (TDM) определяется некоторым числом сетевых сенсоров или их групп, условно обозначаемых как оптические сетевые терминалы или узлы ОСТ/У, которые связаны с центральным офисом, в котором установлен оптический линейный терминал ОЛТ, оптической подсистемой распределения ОПР, содержащей множество волокон, соединенных, как правило, по древовидной топологии сплиттерами. На сегодняшний день активно развивается второе поколение ПОС, основанное на гибридной технологии временного и волнового мультиплексирования (TWDM), в которых наравне со сплиттерами или в комбинации с ними используются упорядоченные волноводные решетки (УВР) для волнового мультиплексирования. В работе проведено исследование оптомеханики волновых эталонов ОЛТ на основе интерферометров Фабри-Перо на базе двух ВБР, УВР ОПР и ВБР с фазовым п-сдвигом как датчика температуры с целью оценки возможности применения универсального способа для их двухчастотного симметричного зондирования; теоретическое обоснование варианта универсального способа измерительного преобразования и получения информации о сдвиге центральной длины волны и/или температуре сенсора на основе комплексного при-

менения УВР и ВБР; проведение вычислительных и физических экспериментов для подтверждения работоспособности и оценки преимуществ универсального способа и его вариантов.

Куревин В.В.

2017. Куревин В.В. «Информационные технологии и волоконно-оптические средства обеспечения экологической безопасности потенциально опасных объектов». Анализ существующих систем мониторинга контроля качества окружающей среды (количественные методы измерений) показал, что в настоящее время для получения и передачи информации они не используют оптоволоконные системы, несмотря на их очевидное преимущество перед электрическими и биохимическими системами по фактору потенциальной пожаровзрывоопасности, помехоустойчивости, малому весу и габаритам. Практика эксплуатации систем мониторинга говорит о чрезвычайно важности человеческого фактора при возникновении чрезвычайных ситуаций, что требует максимальной степени автоматизации процессов принятия решений при ОЭБ ПОО с использованием информационных технологий и волоконно-оптических средств измерений. Указанные обстоятельства определили актуальность темы настоящего исследования, направленного на разработку и совершенствование математических моделей, методов, информационных технологий и технических средств (волоконно-оптических) для обеспечения принятия эффективных решений при хранении, транспортировке и переработке объектов, обладающих высокой потенциальной экологической опасностью. В работе предложен новый фазовый метод организации инструментального контроля параметров пожаровзрывоопасных объектов с помощью волоконно-оптических датчиков на брэгговских решётках. Разработан новый фазовый метод для калибровки и обеспечения температурных режимов роутеров и мультиплексоров волоконно-оптических сенсорных сетей, в которых трансиверы и датчики разнесены на достаточно большие расстояния. Оба метода обеспечивают по сравнению с существующими большую точность и меньшую стоимость систем инструментального контроля. Практическая ценность данных решений подтверждена их включением в каталог предметов снабжения вооружённых сил РФ с федеральным номенклатурным номером 7031571613590 и принятием на рассмотрение предложенной автором структуры Экологической службы для особых базисных складов Росрезерва. Указанные разработки были также использованы в проектах НШ «Микроволновые процессы, технологии и комплексы» для контроля протекания микроволновых технологических процессов, внешнее излучение которых является опасным экологическим фактором.

Иванов А.А.

2020. Иванов А.А. «Радиофотонные системы измерения мгновенной частоты множества радиосигналов СВЧ-диапазона на основе амплитудно-фазовых методов модуляционного преобразования оптической несущей». С развитием радиофотоники оптико-электронные системы (ОЭС) и технологии измерения мгновенной частоты радиосигналов (ИМЧР) СВЧ-диапазона становятся все более перспективными инструментами как в военной (радиотехническая разведка, радиоэлектронная борьба), так и в гражданской области (оценка электромагнитной обстановки, контроль радиоизлучений СВЧ-диапазона и т.д.), построенных на принципах комплексной обработки радиосигналов в оптическом диапазоне электромагнитных волн. Радиофотонные технологии позволяют проводить обработку радиосигналов в оптическом диапазоне и использовать такие присущие им достоинства как широкий диапазон измерений (по частоте и амплитуде) с заданной точностью, малые потери, невосприимчивость к электромагнитным помехам, легкая конструкция и малый размер. В сравнении с ними чисто радиотехнические методы могут также обеспечить

широкий диапазон измерений с заданной точностью, но будут характеризоваться наличием в устройствах ИМЧР множества узкополосных каналов, низкой помехоустойчивостью, существенным потреблением энергии и значительными размерами. В работе решена основная научная задача – разработка принципов построения и методов анализа радиофотонных систем измерения мгновенной частоты множества радиосигналов СВЧ-диапазона, основанных на применении в них способов амплитудно-фазового модуляционного преобразования радиосигналом одночастотного лазерного излучения оптической несущей в симметричное двухчастотное и многочастотное излучения и применения измерительного преобразования типа «частота-амплитуда» в волоконных брэгговских решетках, с доказательством возможности с их помощью создания многоканальной радиофотонной системы измерения мгновенной частоты радиосигналов СВЧ-диапазона и обеспечения стабильности рабочих режимов устройств, реализующих указанные преобразования в условиях изменяющихся температур.

4. Техническая электродинамика: приложения в живых системах

Исторически, использование электромагнитной энергии для целей уничтожения микрофлоры, было одним из первых направлений их развития. Позднее было выполнено значительное число исследований, приведших к разработке методов (а в ряде случаев и аппаратуры) для пастеризации пищевых продуктов, стерилизации инструментов и материалов, обеззараживания тепличных грунтов, уничтожения семян и проростков сорной растительности и ряда других. Цели и задачи в данном случае состоит в том, чтобы показать наличие значительных резервов для сокращения затрат электромагнитной энергии в ряде задач инактивации микроорганизмов, дезинсекции и т.д. Кроме того, многочисленные исследования позволили утверждать, что при определенных интенсивности и длительности воздействия ЭМП СВЧ и КВЧ улучшаются посевные свойства семян, быстрее развиваются проростки, что, в конечном счете, приводит к повышению урожайности.

Важнейшей составной частью агроценозов являются почвенные микроорганизмы, деятельность которых определяет плодородие почв и доступность растениям питательных веществ. Комплекс почвенных микроорганизмов — это сложнейшая биосистема, обладающая рядом особенностей, которые позволяют ее отнести к довольно устойчивым системам. Однако воздействие какого-либо сильного внешнего фактора может значительно изменить соотношение определенных групп почвенных микроорганизмов или их физиологическую активность, что может привести к нарушению внутреннего равновесия системы (гомеостаза), вплоть до необратимых изменений, а в конечном итоге потере урожайности. В связи с этим встает новая задача – проверить влияние предпосевной обработки семян ЭМП СВЧ и КВЧ на разные физиологические группы микроорганизмов ризосферы проростков семян, которая высоко чувствительна к загрязнению среды и практически не встречается в сильно загрязненных районах, с целью компенсации угнетающих факторов.

Существует также ряд менее изученных возможностей, основанных на более тонких эффектах физического и биологического характера. Отметим наиболее интересные на наш взгляд из них:

— факт избирательного нагрева. Биологические объекты и продукт, в котором они находятся, имеют различные электрофизические параметры, причем во многих случаях биологические объекты обладают свойством большего удельного поглощения. В результате, при воздействии ЭМП они нагреваются быстрее, чем окружающий их продукт, и инактивация происходит при меньшем нагреве собственно продукта;

— не очевиден вопрос об оптимальном соотношении между температурой нагрева и длительностью воздействия. Последнее становится особенно важным, так как на нарушение

жизненных функций достаточно широкого круга биологических объектов влияет скорость изменения температуры окружающей их среды;

— из известных работ следует, что в ряде случаев инактивация микроорганизмов происходит более эффективно (и что немаловажно, при меньшем нагреве собственно продукта) при использовании импульсных ЭМП;

— наконец, имеются предварительные данные, свидетельствующие о наличии резонансных эффектов угнетения при низкоинтенсивных воздействиях ЭМП КВЧ-диапазона.

Перечисленные обстоятельства дают основания считать направление исследования воздействия СВЧ полей на живые системы сверх актуальным, а использование в них высокотехнологичного оборудования сверх критичным.

Стахова Н.Е.

Научной основой работ по указанному направлению после докторской диссертации Морозова Г.А. следует считать кандидатские диссертации, посвященные применению микроволновых технологий в ветеринарии, защищенные при его консультациях, а также кандидатскую диссертацию доц. Стаховой Н.Е. «Разработка методов и средств управления микроволновыми технологическими установками». Изложенные в ней методы построения микроволновых установок для обработки семян сельскохозяйственных и лесных культур, обеспечивающих оптимальное соотношение энергозатрат и качества обработки нашли продолжение в ряде защищенных и готовящихся к защите кандидатских диссертаций.

Крыницкий П.П.

2019. Крыницкий П.П. «Встроенные системы ЯМР релаксометрии для мониторинга качества микроволновой обработки биотехнологической продукции». Биотехнологический процесс представляет из себя сложный многоуровневый комплекс операций, целевая реализация которых - получение продукции с заданными количественными и качественными характеристиками. В основе большинства биотехнологических производств в настоящее время лежит деятельность микроорганизмов. Использование электромагнитного излучения крайне высоких частот позволяет значительно повысить эффективность процесса получения биотехнологических продуктов. Положительный эффект в этом случае достигается за счет активизации адаптационных сил организма без изменения его физической и генетической структуры. Кроме того, такое воздействие малоэнергозатратно. В результате разработаны научные основы создания оперативного МВТК на основе низкоинтенсивных электромагнитных технологий, предназначенного для интенсификации и контроля качества промышленного производства хлебопекарных дрожжей. Проведены комплексные исследования влияния миллиметровых волн на хлебопекарные дрожжи по их основным параметрам. Определены оптимальные режимы микроволновой обработки – частота 60,2 ГГц, длительность – 5 минут, минимальная удельная мощность ЭМП – 50 мкВт/см^2. В этом случае наблюдается прирост биомассы на 50%, подъемной силы дрожжей на 12,5%. Показана эффективность применения микроволновой обработки для деконтаминации готовой продукции от посторонней микрофлоры для сохранения технологических свойств дрожжей во время хранения. Определены параметры оптимального режима обработки – частота 61,7 ГГц, длительность – 1 минута, удельная мощность ЭМП – 50 мкВт/см^2. Методом ЯМР низкого разрешения проведены исследования структурно-динамического состояния микроорганизмов, результаты которых обеспечивают получение оперативной информации о физиологическом и технологическом статусах дрожжей и их отклике на микроволновую обработку. Разработана система неразрушающего ЯМР-контроля качества продукции дрожжевого производства.

Готовятся к защите работы Степуры А.В., Кувшинова П.Е., Петровой (Абдуллаевой А.З.), посвященные как методам предпосевной обработке семян различных культур, так и методам контроля за протеканием этих процессов.

Заключение

В 2022 году начинается подготовка к подведению промежуточных итогов 35 летней истории развитии научной школы «Микроволновые процессы, технологии и комплексы».

За свою историю НШ МВПТК имеет библиографию из более чем 1000 публикации в советских, российских и международных научных журналах высшего уровня, около 150 авторских свидетельств СССР и патентов РФ, в том числе на промышленные образцы, около 35 монографий, включая изданные в ведущих российских и зарубежных издательствах, 70 учебных пособий, в том числе с грифом Минобрнауки РФ. Выполнено более 100 НИОКТР регионального и федерального уровня с внедрением результатов исследований и конструкторских работ в промышленность, в том числе постановку продукции на снабжение Вооруженных сил РФ и Росрезерва. В рамках НШ МВПТК к 2023 году можно будет говорить о защите 10 докторских диссертаций и более 40 кандидатских работ.

Ежегодно вопросы развития научных направлений НШ МВПТК обсуждаются и апробируются на более чем 10 международных научно-технических конференция в России и за рубежом, включая базовую конференцию НИИ ПРЭФЖС – Молодежную международную научно-техническую конференцию «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2022», которая в этом году прошла в девятый раз, а юбилейная Х-ая состоится в 2023 году и будет посвящена 35-летию НИИ ПРЭФЖС/НИЦ ПРЭ/ОНИЛ МРП.

Таких результатов вряд ли можно было бы достигнуть без создания в КАИ в 1988 году ОНИЛ МРП – центра притяжения внутриинститутской науки со всех факультетов КАИ и межвузовской науки различных республик СССР, на площадке которой сейчас, в НИИ ПРЭФЖС, эффективно сотрудничают три научные школы: НШ МВПТК, НШ «Антенны и устройства СВЧ» (основатель Поповкин В.И., руководитель Седельников Ю.Е.) и НШ «Симметрия и асимметрия в радиофотонике» (основатель Польский Ю.Е., руководитель Морозов О.Г.).

В связи со сменой поколений на новый уровень выходит сотрудничество в рамках триумвирата ВУЗов Поволжья – КНИТУ-КАИ, ПГУТИ+СОНИИР (Самара), УГАТУ (Уфа). Можно смело утверждать, что сегодня можно говорить уже о пентаверате с участием ПГТУ (Йошкар-Ола) и НГТУ им Р.Е. Алексеева (Н. Новгород).

Будем надеяться, что история НШ МВПТК достигнет свое апогея в делах и начинаниях наших учеников и продолжателей.

Шифрин Я.С.

А что касается прошлого, то хочется отдать дань уважения и вспомнить еще одного нашего Учителя – Якова Соломоновича Шифрина, советского, позднее украинского радиофизика, специалиста в области теории антенн и распространения радиоволн, создателя статистической теории антенн, Заслуженного деятеля науки и техники Украины, IEEE Fellow, который внес неоценимый вклад в развитие всех научных школ, упомянутых в статье.

Автор выражает огромную признательность своему соратнику и научному консультанту по докторской диссертации, заместителю директора НИЦ ПРЭ, главному научному сотруднику НИИ ПРЭФЖС, Почётному работнику высшего профессионального образования РФ, Заслуженному работнику науки и техники РТ, Заслуженному профессору КНИТУ-КАИ проф. Седельникову Ю.Е., директору НИИ ПРЭФЖС с 2012 по 2021 год Почетному работнику сферы образования РФ, Заслуженному работнику высшей школы РТ, проф. Морозову О.Г.,

директору НИИ ПРЭФЖС с 2021 года проф. Нурееву И.И. за информационную поддержку и полезные дискуссии по содержанию настоящей статьи.

Список литературы

1. Морозов Г.А. Низкоинтенсивные СВЧ-технологии (проблемы и реализации) / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, Ю.Е. Седельников и др. /Под ред. Г.А. Морозова и Ю.Е Седельникова. - М.: Радиотехника. - 2003. - 112 с.

2. Морозов Г.А. 15 лет НИЦ ПРЭ. Реальность и перспективы/ Г.А. Морозов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. - 2003. - № 3.- С. 24-30.

3. Морозов Г.А. Микроволновые технологии. Результаты и новые задачи / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2006. - Т.9. - № 3. - С. 82-91.

4. Морозов Г.А. Прикладные научные исследования и подготовка высококвалифицированных специалистов в научно-исследовательском центре прикладной электродинамики КГТУ-КАИ / Г.А. Морозов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2007. - Т. 10. - № 4-2. - С. 23-28.

5. Гынку С.П. Информационные технологии в исследованиях воздействия энергии КВЧ диапазона на водные растворы и их применение в ветеринарной медицине / С.П. Гынку, Г.А. Морозов, М.Ш. Шакуров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2007. - Т. 10. - № 4. - С. 73-76.

6. Морозов Г.А., Анфиногентов В.И., Морозов О.Г., Румянцев Д.С. Микроволновые технологические комплексы с адаптивным управлением для обработки водонефтяных эмульсий / Г.А. Морозов, В.И. Анфиногентов, О.Г. Морозов, Д.С. Румянцев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2007. - Т. 10. - № 3. - С. 125-129.

7. Морозов Г.А. Модели микроволновых технологий очистки труб от асфальто-смоло-парафиновых отложений / Г.А. Морозов, И.Г. Орлов, А.С. Шакиров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2010. - Т. 13. - № 3. - С. 125-130.

8. Морозов Г.А. Микроволновая обработка семян хвойных пород деревьев: достигнутые результаты и направления перспективных исследований / Г.А. Морозов, Ю.Е. Седельников, Н.Е. Стахова и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2011. - Т. 13. - № 4-4. - С. 1197-1202.

9. Морозов Г.А., Морозов О.Г., Шангараева Я.Н. Современные подходы к построению адаптивных СВЧ технологических комплексов обработки высоковязких водонефтяных смесей / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, Я.Н. Шангараева // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2012. - Т. 15. - № 4. - С. 59-66.

10. Морозов Г.А., Морозов О.Г., Самигуллин Р.Р., Насыбуллин А.Р., Шакиров А.С. Функционально адаптивные СВЧ-технологии в задачах переработки термопластичных полимерных материалов / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, Р.Р. Самигуллин и др. // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2011. - № 3 (13). - С. 13-24.

11. Лапочкин М.С. Повышение энергоэффективности микроволнового нагрева снежно-ледяной массы посредством применения водоотвода / М.С. Лапочкин, О.Г. Морозов, Г.А. Морозов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2012. - Т. 15. - № 1. - С. 84-88.

12. Морозов Г.А. Микроволновые процессы, технологии и комплексы (теория, техника, результаты работы за 25 лет НИЦ ПРЭ) / Г.А. Морозов // в сборнике: Проблемы и перспективы развития наукоемкого машиностроения. Международная научно-техническая конференция. - 2013. - С. 7-8.

13.Самигуллин Р.Р. СВЧ анализаторы фракционного состава сырой нефти: анализ состояния, определение направлений, методов и средств совершенствования / Р.Р. Самигуллин, О.Г. Морозов, Г.А. Морозов и др. // Вопросы электротехнологии. - 2014. - № 3 (4). - С. 49-56.

14. Морозов Г.А. Коаксиальные брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2014. - Т. 17. - № 3. - С. 65-70.

15. Морозов Г.А. Исследование воздействия электромагнитных полей крайне высоких частот на свойства агроценозов сельскохозяйственных культур / Г.А. Морозов, И.П. Таланов, Н.Е. Стахова и др.// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2015. - Т. 18. - № 3-1. - С. 11-15.

16. Веденькин Д.А. Третья международная научно-техническая конференция "Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы - 2016" / Д.А. Веденькин, О.Г. Морозов, Г.А. Морозов и др.// Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2016.- № 2 (30). - С. 90-99.

17. Веденькин Д.А. Четвёртая международная научно-техническая конференция "Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы - 2017" / Д.А. Веденькин, О.Г. Морозов, Г.А. Морозов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2017. - № 2 (34). - С. 80-87.

18. Морозов О.Г. От радиофотоники к радиоквантонике / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов // в сборнике: Ядерные технологии: от исследований к внедрению - 2021. Сборник материалов научно-практической конференции. Нижний Новгород, 2021. - С. 166-168.

19. Морозов Г.А. Тематика научных исследований и опытно-конструкторских разработок НИИ ПРЭФЖС (антология НИОКТР 1988 – 2021 г.) / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2021. - Т. 1(2) - С. 75-86. URL: elphoto.kai.ru/article/view/340.

RESEARCH INSTITUTE "APPLIED ELECTRODYNAMICS, PHOTONICS AND LIVING SYSTEMS": SCIENTIFIC SCHOOL «MICROWAVE PROCESSES, TECHNOLOGIES AND COMPLEXES»

G.A. Morozov

Kazan National Research Technical University after named A.N. Tupolev-KAI
10, st. Karl Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. The paper provides a brief overview of the results of fundamental and applied research carried out over the past ten years at the Research Institute of Applied Electrodynamics, Photonics and Living Systems by representatives of the scientific school "Microwave Processes, Technologies and Complexes" of Kazan National Research Technical University named after A.I. N. Tupolev (KNRTU-KAI).

Keywords: microwave processes, technologies and complexes, mathematical modeling, metrology, technical electrodynamics, radio photonics.

Статья представлена в редакцию 26 декабря 2022 г.