

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

Исследование температурного поля при электронно-лучевой сварке никелевых сплавов

Р.Ю. Киреев, А.Б. Булков, В.Р. Петренко, В.П. Чумарный	4
Технологические особенности получения материала для средств автоматизированной выкладки на примере MAG Viper 1200	
М.Ю. Воскобойник, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Д.В. Полухин.....	8

Информатика, вычислительная техника и управление

Моделирование промышленных процессов полимеризации на основе метода моментов

С.Л. Подвальный.....	11
Адаптивные поисковые алгоритмы обучения искусственных нейронных сетей	
С.Ю. Белецкая, Д.Н. Лицман, А.Д. Поваляев, А.В. Гаганов	17
Оптимизационные модели формирования структуры развивающихся мультисервисных сетей информационного обслуживания населения	
Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский.....	20
Исследование эффективности генетических алгоритмов многокритериальной оптимизации	
С.Ю. Белецкая, Ю.А. Асанов, А.Д. Поваляев, А.В. Гаганов.....	24
Управление потенциально опасным производством сушки барды с использованием нечеткого регулятора	
И.С. Макаш, А.В. Бурковский.....	28
Программная реализация многовариантного математического моделирования тепловых полей	
М.Н. Аралов, А.В. Ачкасов, В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный.....	32
Организация информационного обеспечения подсистемы сбыта промышленного холдинга	
Д.В. Тонких, А.Д. Данилов.....	35
Визуализация тепловых полей с использованием библиотек OpenGL и TaoFramework	
М.Н. Аралов, А.В. Барабанов, Н.И. Гребенникова.....	39
Формирование экспертного вывода на основе теории свидетельств	
Е.А. Ганцева, В.А. Каладзе, А.М. Поляков.....	42
Организация интерфейса распределённой системы оценки стойкости полупроводниковых изделий	
Е.С. Пашковская, М.Е. Пашковский, В.Ф. Барабанов.....	47

Физика

Физико-механические свойства стеклопластика, полученного с применением полиэфирной смолы по методу вакуумной инфузии

К.С. Габриельс, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Е.В. Кулакова.....	52
Плотность и микротвердость композиционных покрытий, содержащих углеродные наноматериалы	
О.Д. Козенков, Т.В. Пташкина, А.Т. Косилов.....	56
Магнитные свойства наночастиц никеля в матрице оксида ниобия	
А.А. Гребенников, О.В. Стогней, Е.О. Буловацкая, К.И. Семененко А.Дж. Аль-Малики.....	61

Исследование процессов структурообразования в высококонцентрированных спиртовых суспензиях нанопорошков оксида меди и углеродного наполнителя в условиях воздействия механоактивации	65
Ю.В. Панин, С.Ю. Панков.....	

Радиотехника и связь

Теоретические основы для решения граничных задач электродинамики в киральных средах	
К.П. Пискунов, О.А. Соколова, А.В. Тишуков, А.П. Ярыгин.....	70
Однослойные антенные решетки вытекающей волны с центральным питанием	
Д.Н. Борисов, Д.А. Ерошенко, А.И. Климов, Ю.Б. Нечаев, В.И. Юдин.....	74
Моделирование линз Люнеберга в полосковом исполнении	
А.С. Авдюшин, К.О. Волков, К.А. Разинкин, С.М. Фёдоров.....	79
Рассеяние электромагнитных волн на цилиндре, расположенном в двумерно-неоднородном поглощающем плазменном образовании	
А.Н. Косенков, А.П. Ярыгин.....	84
Обработка результатов измерений координат источников радиоизлучения в пассивных разностно-дальномерных системах методом кластерного анализа данных	
Б.В. Матвеев, В.П. Дубыкин, Д.Ю. Крюков, Ю.С. Курьян, В.В. Жилин.....	89
Электромагнитные кристаллы, их особенности и применение	
А.С. Авдюшин, М.Ю. Власов, Ю.Г. Пастернак, А.П. Ярыгин.....	93
Методы определения действующей высоты и эффективной площади случайных антенн в широкой полосе частот	
С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет.....	104
Исследование свойств разностно-дальномерной системы произвольной конфигурации с итерационным алгоритмом	
Б.В. Матвеев, В.П. Дубыкин, Д.Ю. Крюков, Ю.С. Курьян, Е.М. Кирпичев.....	109

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

Р.Ю. Киреев, А.Б. Булков, В.Р. Петренко, В.П. Чумарный

В статье представлены результаты ЭЛС жаропрочных никелевых сплавов на различных скоростях и математического моделирования тепловых полей

Ключевые слова: тепловые поля, никелевый сплав, изотермы

При электронно-лучевой сварке (ЭЛС) шов и околшовная зона (ОШЗ) находятся под действием напряжений, образующихся вследствие неравномерного нагрева и охлаждения металла и несвободной усадки металла шва при кристаллизации, уровень которых зависит от состава и свойств свариваемого материала. Также на уровень напряжений, возникающих в процессе сварки, может оказывать влияние процесс распада упрочняющей γ' - фазы в зоне термического влияния (ЗТВ). Низкая теплопроводность жаропрочных никелевых сплавов способствует повышению градиента температур при ЭЛС, что приводит к локализации напряжений в малых объемах материала. Результатом суммарного влияния этих напряжений является растрескивание сплава [1].

Трещины, возникающие при сварке никелевых сплавов, обычно имеют межзёренный характер и располагаются как на поверхности, так и внутри металла. В [2] отмечается, что раскрытие трещин при сварке и термообработке происходит в плоскости, перпендикулярной линии сплавления. Путем анализа возможных причин трещинообразования в околшовной зоне соединений выявлено, что если сварку производить после циклов термообработки, то за счёт быстрого роста температуры в ОШЗ и последующего быстрого охлаждения происходит растворение карбидов и упрочняющей γ' – фазы. Это способствует разупрочнению тела зерна и повышению относительной прочности границ зёрен. Внутренние трещины также возникают преимущественно в околшовной зоне и распространяются от линии сплавления в направлении основного металла, реже - в сварном шве [3,4].

Для определения размеров и формы температурного поля использовалось физико-математическое моделирование методом конечных

элементов и экспериментальное измерение температуры с помощью термопар.

Целью расчетов является определение объёмов металла шва и ЗТВ пребывающего при температуре свыше 800°C , в которых происходит процесс распада упрочняющей γ' - фазы, что возможно приводит к увеличению уровня напряжений в сварном соединении.

Эксперименты проводились на пластинах размером $100 \times 40 \times 17$ мм из сплава ВЖЛ-14. Параметры режима ЭЛС: ускоряющее напряжение - 25 кВ; ток эмиссии – 0,18...0,240А; скорость ЭЛС – 2,78 мм/с (10м/ч), 4,17 мм/с (15 м/ч), 5,56 мм/с (20м/ч) и 11,1 мм/с (40м/ч); диаметр луча на поверхности тела 0,5...0,8 мм. Форма и размеры зоны проплавления определялись на шлифах сварных соединений.

Экспериментальное измерение температуры осуществлялось хромель-алюмелевыми термопарами, расположенными на поверхности тела и в каналах, просверленных в одной из пластин. Схема установки термопар приведена на рис.1.

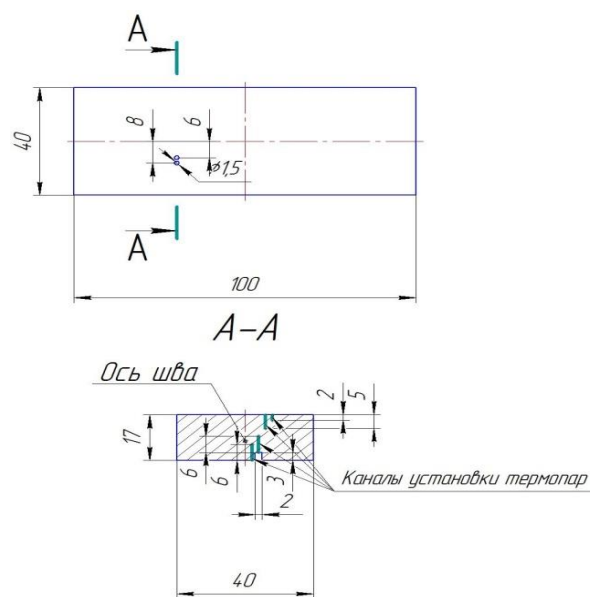


Рис. 1. Схема установки термопар

Экспериментальные исследования показали, что в исследованном диапазоне параметров режима ЭЛС поперечное сечение швов имеет сложную

Киреев Роман Юрьевич – ВГТУ, аспирант, тел. 8-951-871-61-79

Булков Алексей Борисович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. +7(473) 278-38-84

Петренко Владимир Романович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. +7(473) 278-38-91

Чумарный Владимир Петрович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8 (473) 246-40-67

форму, характеризующую кинжальным проплавлением в средней и корневой частях и значительным расширением сварочной ванны ближе к поверхности (рис. 2).

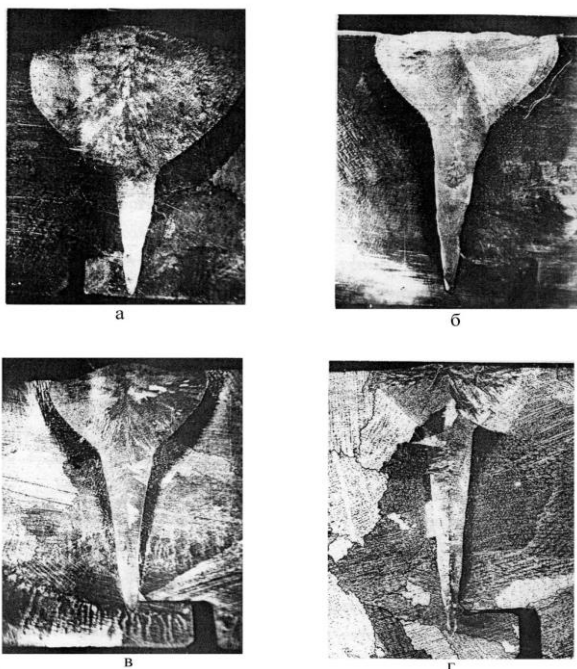


Рис. 2. Поперечные сечения швов, полученные при различных скоростях сварки: а – 2.78 мм/с (10 м/ч); б – 4.17 мм/с (15 м/ч); в – 5.56 мм/с (20 м/ч); г – 11.1 мм/с (40 м/ч)

Такая форма объясняется тем, что при рассеивании электронного луча в облаке ионизированных паров металла, испаряющихся из зоны кинжального проплавления, над поверхностью возникает источник теплоты, нагревающий достаточно большую площадь поверхности тела. Результаты экспериментов свидетельствуют, что чем меньше скорость сварки, тем больше энергии рассеивается над поверхностью тела и, соответственно, больше ширина и глубина верхней зоны проплавления (грибовидность), в то время как размеры корневой части шва остаются приблизительно постоянными. В соответствии с [5] известно, что размеры изотермических поверхностей при нагреве подвижным источником теплоты зависят от геометрии источника и величины погонной энергии. Описание одного источника, который обеспечивает различный по интенсивности и геометрии нагрев в направлении толщины пластины является сложной математической задачей. Поэтому было принято решение использовать для моделирования принцип суперпозиции и считать, что нагрев одновременно производится двумя источниками: нормально-круговым поверхностным на верхней плоскости тела и коническим с нормальным распределением энергии в сечении - по оси шва.

Схема распределения мощности источников теплоты показана на рис. 3.

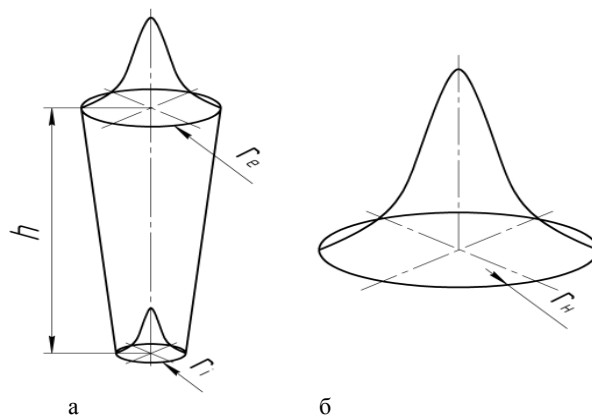


Рис. 3. Схема распределения мощности источников теплоты: а) конического с нормальным распределением энергии; б) поверхностного нормально-кругового, где r_e - радиус конического источника теплоты на верхней плоскости пластины, r_i - радиус конического источника теплоты на нижней плоскости пластины, r_n - радиус действия поверхностного источника теплоты

Правильность подбора геометрических параметров и погонной энергии источников для каждого режима сварки определялась сравнением результатов моделирования с формами шва в поперечном сечении и показаниями термопар.

Для скорости 2.78 мм/с (10 м/ч) не удалось подобрать расчётные параметры, которые давали хорошую сходимость с экспериментальными данными, поэтому дальнейшее сравнение результатов будет проводиться только по трём скоростям ЭЛС.

В результате серии расчетов выбраны параметры источников теплоты.

Для скорости ЭЛС 4,17 мм/с (15 м/ч):

– поверхностный – $r_n = 3,0$ мм., $q/v = 270$ Дж/мм; – конический – $r_e = 0,7$ мм; $r_i = 0,5$ мм., $h = 16$ мм., $q/v = 310$ Дж/мм.

Для скорости ЭЛС 5.56 мм/с (20 м/ч):

– поверхностный – $r_n = 2,5$ мм; $q/v = 205$ Дж/мм; – конический – $r_e = 0,7$ мм; $r_i = 0,5$ мм; $h = 16$ мм; $q/v = 295$ Дж/мм.

Для скорости ЭЛС 11.1 мм/с (40 м/ч):

– поверхностный – $r_n = 1,7$ мм; $q/v = 105$ Дж/мм; – конический – $r_e = 0,7$ мм; $r_i = 0,5$ мм; $h = 16$ мм; $q/v = 275$ Дж/мм.

По результатам эксперимента установлено, что образец, который сваривался со скоростью 5.56 мм/с (20 м/ч), имел меньшее количество и суммарную протяжённость трещин, чем другие. Поэтому основное сравнение математической модели вели по поперечным сечениям этого образца.

Распределение температуры в продольном сечении модели пластины при скорости сварки 5.56 мм/с (20 м/ч) показаны на рис. 4.

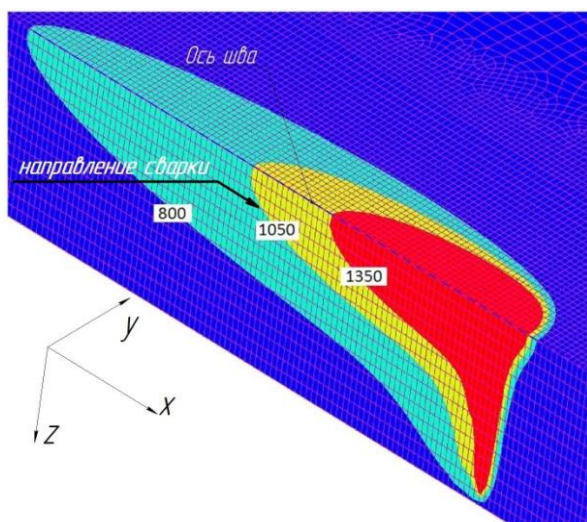


Рис. 4. Распределение температуры в продольном сечении модели пластины

На модели сечения пластины виден значительный градиент температур по толщине в продольном направлении по оси шва, который может оказывать влияние на уровень напряжений, возникающих в процессе ЭЛС и, соответственно, на растрескивание сплава.

Вследствие инерционности распространения теплоты и относительно низкой теплопроводности жаропрочных никелевых сплавов максимальная ширина металла, пребывающего при критических температурах ($800 \div 1350$ °C), наблюдается не в плоскости, совпадающей с осью источника, а на некотором расстоянии за ней. Для более точного определения размеров зоны нагрева до температур 800, 1050 и 1350 °C на рис. 5 приведены изотермы для сечений в плоскостях, находящихся позади источника теплоты на некотором расстоянии. Ширина зоны нагрева до температуры 800°C определена наложением соответствующих изотерм и показана на рис. 5(з).

Аналогичным образом обработаны результаты расчетов для скоростей ЭЛС 4.17 мм/с (15 м/ч) и 11.1 мм/с (40 м/ч.)

Наложение полученных изотерм на шлифы поперечного сечения сварных швов (рис. 6) показывает, что выбранные параметры источников теплоты обеспечивают хорошую сходимость расчетных данных с экспериментальными для формы поперечного сечения швов.

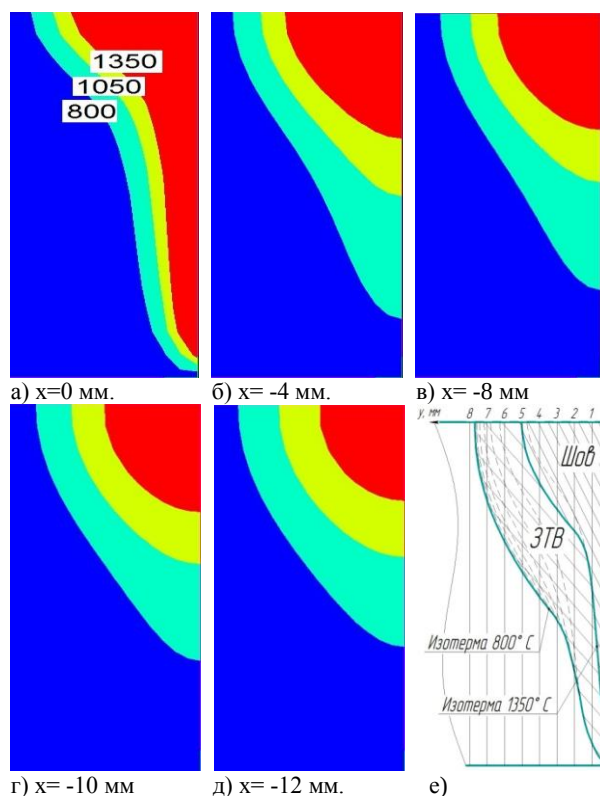


Рис. 5. Изотермы для сечений при скорости ЭЛС 5.56 мм/с (20м/ч), находящихся в плоскости действия источника теплоты а); позади него на расстоянии, мм: б – 4, в – 8, г – 10, д – 12; результирующая изотерма для 800 °C (е)

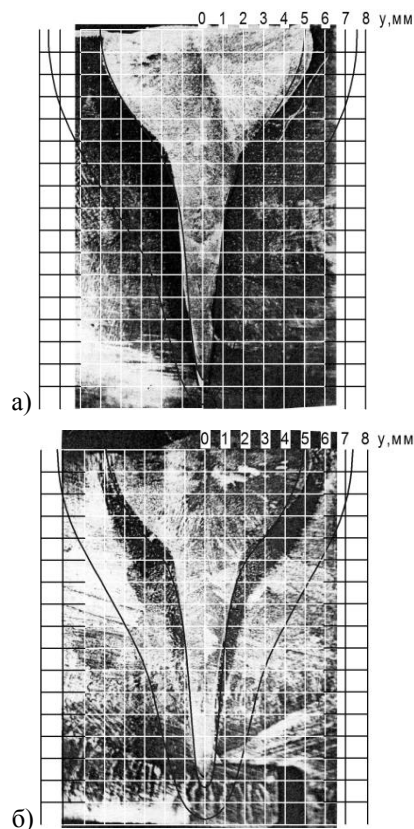


Рис. 6. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных для поперечного сечения швов при скорости ЭЛС: а – 4.17 мм/с (15 м/ч.), б – 5.56 мм/с (20 м/ч.), в – 11.1 мм/с (40 м/ч.)

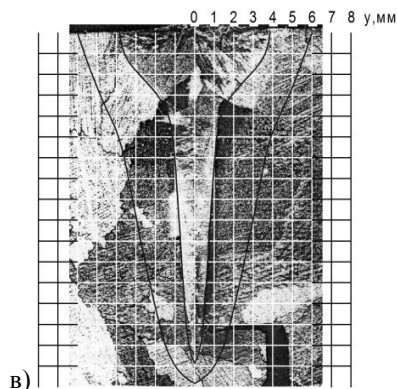


Рис. 6. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных для поперечного сечения швов при скорости ЭЛС: а – 4,17 мм/с (15 м/ч.), б – 5,56 мм/с (20 м/ч.), в – 11,1 мм/с (40 м/ч.) (продолжение)

В таблице представлены площадь поперечного сечения металла шва, ЗТВ, мощность луча и отношение мощности луча к скорости сварки.

$V_{св}$ мм/с	$S_{ш}$ мм ²	ЗТВ мм ²	$Q_{св}$ Вт	$Q/V_{св}$	к-во тр-н, шт.	сред. длина тр-н, мм
,78	-	-	3930	1413,7	13	14,8
4,17	8,7	9,2	4250	1019,2	6	4,84
5,56	1,5	2,8	4462	802,61	5	0,77
11,1	9,6	0,8	4993	449,5	5	2,27

По результатам экспериментальных данных и процесса моделирования электронно-лучевой сварки жаропрочного сплава типа ВЖЛ-14 с расчётом тепловых полей, возможно, определение объёма металла ЗТВ, пребывавшего при критических температурах от 800 °С до 1350 °С.

При скорости ЭЛС 4,17мм/с (15 м/ч) наблюдается значительная «грибовидность» как по ширине, так и по глубине сварного шва. Формирование в верхней части шва большого объёма расплавленного металла шва увеличивает градиент температуры по толщине свариваемых заготовок. Эти факторы в совокупности с другими приводят к появлению трещин на поверхности и внутри сварного соединения. Наружные трещины располагаются перпендикулярно оси шва и направлены от линии сплавления в сторону основного металла. Внутренние трещины так же, как наружные идут от линии сплавления основного металла с металлом шва, но плоскость раскрытия этих трещин перпендикулярна плоскости раскрытия наружных, что приводит к расслоению свариваемых образцов по толщине металла. Эти трещины распространяются от линии сплавления в ЗТВ

длиной до 2,5 мм, что соответствует ширине области температур (800÷1350 °С).

При увеличении скорости ЭЛС до 5,56 мм/с (20 м/ч) происходит существенное снижение количества трещин в 2,5 раза и суммарной длины трещин в 19 раз. По всей видимости, это связано с уменьшением «грибовидности» шва и снижением градиента температур по толщине образца т.к. уменьшилась площадь поперечного сечения, объём металла шва и ЗТВ пребывающего при критических температурах.

При скорости ЭЛС 11,1 мм/с (40 м/ч) размеры «грибовидности» продолжают уменьшаться как по ширине, так и по глубине сварного шва и происходит незначительное уменьшение ЗТВ. Количество трещин не изменяется, а суммарная протяжённость трещин возрастает в три раза. Возможно, увеличение скорости ЭЛС ведёт к увеличению темпа нарастания деформации, а уменьшение площади сечения металла шва и ЗТВ приводит к снижению уровня релаксации напряжений, что и приводит к увеличению суммарной длины трещин.

Исходя из полученных результатов эксперимента и математической модели, предлагается уменьшить «грибовидность» сварного шва и ширину ЗТВ от изотермы 1350°С до изотермы 800 °С за счёт снижения градиента температур по толщине металла и получения оптимальной формы проплавления сварного шва применением горизонтально расположенного, колеблющегося вдоль стыка электронного пучка на высоких скоростях с предварительным подогревом.

Литература

1. Сорокин, Л.И. Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов [Текст] / Л.И. Сорокин // Сварочное производство. - 1999. - №12. - С. 11-17.
2. Исследование трещинообразования и технология ЭЛС жаропрочного сплава ВЖЛ-14 [Текст] / В.П. Чумарный, В.М.Плетенев, А.В. Башкатов, В.Р. Петренко // Электронно-лучевая сварка: сб. науч. тр. X Всесоюз. конф. - Л. - 1988. - С. 30 - 31.
3. Эйдельман, В.Е. Высокотемпературная деформация и образование околошовных трещин при сварке сплава типа нимоник [Текст] / В.Е. Эйдельман, Б.Ф. Якушин, В.И. Столбов // Автоматическая сварка. - 1976. - №11. - С.40-44.
4. Морочко, В.П. Повышение сопротивляемости жаропрочных сплавов образованию горячих трещин при электроннолучевой сварке [Текст] / В.П. Морочко, Ю.П. Панов, А.П. Соколов// Автоматическая сварка. - 1979. - №8. - С.52-55.
5. Рыкалин, Н.И. Основы электроннолучевой обработки материалов [Текст] / Н.И. Рыкалин, И.В. Зуев, А.А. Углов. - М.: Машиностроение, 1978. - 239 с.

Воронежский государственный технический университет

INVESTIGATION OF TEMPERATURE FIELDS DURING ELECTRON BEAM WELDING OF NICKEL ALLOYS

R.Yu. Kireev, A.B. Bulkov, V.R. Petrenko, V.P. Chumarniy

In the article presents the results of EBW heat resisting of nickel alloys at different speeds and Mathematical Modelling of thermal fields

Key words: thermal fields, nickel alloy, isotherms

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА ДЛЯ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКИ НА ПРИМЕРЕ MAG VIPER 1200

М.Ю. Воскобойник, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Д.В. Полухин

Разработана технология получения безуткового препрега на основе углеродной однонаправленной ленты и расплавленного клеевого связующего в качестве исходного материала для системы автоматизированной выкладки MAG Viper 1200 с номинальной шириной ленты 6,35 мм в соответствии с техническими требованиями оборудования

Ключевые слова: углеродная лента, клеевое связующее, безутковый препрег, полимерные композиционные материалы, автоматизированная выкладка

Введение

Повышение производительности труда является одним из ключевых факторов обеспечения конкурентоспособности в авиастроении. Развитие и внедрение современных технологий автоматизированного получения композиционных материалов позволяет существенно сократить трудоемкость, исключив ручной труд, нарастить объемы производства и, как следствие, повысить производительность.

Разработка новых технологий и автоматизация операций в производстве позволяют наладить крупносерийный выпуск изделий. В авиастроении применение автоматизированной выкладки изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) позволяет добиться повторяемости конечного результата, повысить такие характеристики, как скорость выкладки, точность укладки слоев и степень их уплотнения. Современные высокотехнологические комплексы систем автоматизированной выкладки волокна позволяют изготавливать элементы и детали различной сложности с высокой точностью укладки волокна [1]. Одним из таких комплексов является система автоматизированной выкладки волокна MAG Viper 1200.

Система выкладки волокна MAG Viper 1200 была разработана специально для обеспечения процесса изготовления (производства) простых или сложных, симметричных или асимметричных, цельных или трехслойных

деталей в одном цикле из высококачественных композитных материалов в авиастроении.

Основным структурным элементом комплекса выкладки волокна является выкладочная головка.

Она имеет уникальную конструкцию, которая точно распределяет, отрезает, закрепляет и возобновляет до 12 отдельных пропитанных термореактивными смолами композитных жгутов номинальной шириной 6,35 мм.

В качестве исходного сырья используют препреги [2] в виде непрерывных волокон или лент (жгутов). К данным материалам предъявляются высокие технологические и технические требования, обусловленные спецификой комплекса MAG Viper 1200.

Целью данной работы было исследование и разработка технологических режимов получения углеродных лент (жгутов) в соответствии с техническими требованиями комплекса автоматизированной выкладки MAG Viper 1200.

Методика эксперимента

Совершенствование конструкции систем автоматизированной выкладки волокна сопровождается повышением технических требований к исходному сырью и, как следствие, вызывает необходимость в разработке новых материалов и технологий получения полуфабрикатов на их основе.

Существуют различные технологии получения сырья для процесса автоматизированной выкладки, среди которых основными являются следующие:

- получение полуфабриката по препреговой технологии в виде широкой однонаправленной ленты с последующей порезкой на жгуты номинальной ширины;

- метод формирования ленты или жгута из однонаправленных нитей (волокон) с требуемыми геометрическими параметрами.

Наиболее актуальным методом получения сырья для процесса автоматизированной вы-

Воскобойник Максим Юрьевич – НВЛ «Композиционные материалы» ВГТУ, инженер, e-mail: vgtu.nvl.km@gmail.com

Караева Оля Анатольевна – НВЛ «Композиционные материалы» ВГТУ, мл. науч. сотрудник, e-mail: olgakaraeva9@mail.ru

Кудрин Алексей Михайлович – НВЛ «Композиционные материалы» ВГТУ, заведующий лабораторией, e-mail: nvl.pkm@gmail.com

Полухин Денис Вадимович – НВЛ «Композиционные материалы» ВГТУ, инженер, e-mail: vgtu.nvl.km@gmail.com

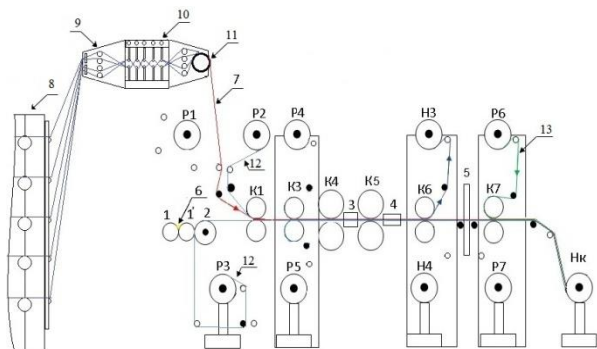
кладки MAG Viper 1200 является получение полуфабриката по препреговой технологии [3] в виде широкой однонаправленной ленты с последующей порезкой на жгуты необходимой ширины.

Технология получения безутковых препрегов на основе углеродных однонаправленных лент и расплавных связующих является наиболее перспективной. Общая схема процесса изготовления препрегов по данной технологии представлена на рисунке.

Для создания направления однонаправленной ленты используются углеродные нити, которые поступают со шпулярика на узел площения, где происходит формирование однонаправленной ленты без зазоров шириной до 400 мм с заданной поверхностной плотностью от 80 до 300 г/м².

Нанесение клеевого связующего на сформированный поток однонаправленной углеродной ленты осуществляется методом горячего расплава (hot -melt).

Клеевое связующее, предварительно нагретое до необходимой температуры (для придания заданной вязкости), наносят тонким слоем заданной ширины и толщины на антиадгезивную бумагу.



Схематическое изображение технологии изготовления безутковых препрегов на основе однонаправленных лент и расплавного связующего:

1 – дозирующие валы; 2 – ламинирующий вал; 3 – нагревательная панель; 4 – охлаждающий стол; 5 – система контроля качества препрега QMS-12 MАНЛО; 6 – связующее; 7 – сформированная лента; 8 – шпулярик; 9 – ролики с желобами; 10 – система натяжителей; 11 – мастер-цилиндр; 12 – бумага; 13 – упаковочная пленка; P1-P7 – размотчики; H1-H4 – намотчики; K1-K7 – каландры; ● – тензодатчики; ○ – вспомогательные валы или ролик

На следующем этапе технологического процесса пропитки на ленту с двух сторон накатывается бумага с заранее нанесенным слоем связующего, пропускается через прижимные ролики и поступает в печь или обогреваемые каландры, где происходит плавление и пропитка армирующего материала и

формирование необходимой толщины монослоя. После пропитки происходит охлаждение препрега на охлаждающем столе и удаление бумаги.

Перед нанесением защитной пленки осуществляют контроль поверхностной плотности препрега.

Заключительным этапом технологического процесса получения полуфабриката является намотка полученного препрега в рулон на бобину.

Для использования полученного полуфабриката в виде пропитанной однонаправленной углеродной ленты шириной 400 мм на установке Viper 1200 необходимо произвести порезку препрега на жгуты номинальной ширины.

Технологический процесс формирования жгутов с номинальной шириной заключается в следующем: нити со шпулярика поступают на блок площения, где по определенной схеме происходят укладка и площение специализированными направляющими роликами (представляющими собой валы с заданным шагом желобов) углеродной ленты необходимой ширины.

Процесс пропитки лент аналогичен технологическому режиму получения полуфабрикатов в виде широких безутковых препрегов.

Результаты и обсуждение

Технологические особенности получения жгутов с номинальной шириной 6,35 мм позволяют сделать вывод о том, что наиболее оптимальной технологией, удовлетворяющей требованиям установки автоматизированной выкладки Viper 1200, является получение полуфабриката по препреговой технологии с последующей порезкой на жгуты необходимой ширины. Эта технология является наиболее перспективной, поскольку имеет ряд преимуществ перед технологией формирования лент из однонаправленных нитей с требуемыми геометрическими параметрами, таких как высокая точность качественного и количественного процесса нанесения связующего и контроля поверхностной плотности получаемого препрега.

Главным недостатком изготовления жгутов является сложность формирования лент заданной ширины и ее контроль на протяжении всего технологического процесса в пределах допустимых значений, указанных в технических требованиях к установке автоматизированной выкладки.

Заключение

В ходе выполненной работы была разработана технология получения препрегов на основе безутковых однонаправленных углеродных лент и расплавленного клеящего с последующей порезкой на жгуты номинальной ширины 6,35 мм для их использования в качестве исходного сырья в системе автоматизированной выкладки MAG Viper 1200 при производстве изделий из полимерных композиционных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки в рамках госзадания на 2015 год.

Литература

1. Чернышов, Е.А. Современные технологии производства изделий из композиционных материалов [Текст] / Е.А. Чернышов, А.Д. Романов // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 2. – С. 46-51.
2. Сироткин, О.С. Новые конструкционные и функциональные ПКМ на основе термопластов и технологии их формования [Текст] / О.С. Сироткин, М.А. Андрушина, Э.Я. Бейдер // Авиационная промышленность. – 2012. – № 4. – С. 43-47.
3. Технология получения и физико-химические свойства препрегов ЛУ-П-0,1 + ЭНФБ и углепластиков на их основе [Текст] / О.А. Караева, А.М. Кудрин, А.В. Калгин, О.В. Овдак // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 6. – С. 60-62.

НВЛ «Композиционные материалы» Воронежского государственного технического университета

TECHNOLOGICAL FEATURES OF PRODUCING MATERIAL FOR AUTOMATED FIBER PLACEMENT MACHINE AS MAG VIPER 1200

M.Yu. Voskoboinik, O.A. Karaeva, A.M. Kudrin, D.V. Poluhin

The technology of the weft-free prepreg based on a carbon unidirectional tape and hot-melt resin, as a material for an automated fiber placement machine as MAG Viper 1200 with the 6,35 mm nominal width of the tape, in accordance with the specifications of the equipment have been developed

Key words: carbon tape, hot-melt resin, weft-free prepreg, polymeric composite materials, automated fiber placement

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОМЕНТОВ

С.Л. Подвальный

Проведен обзор применения метода моментов при моделировании и оптимизации процессов синтеза полимеров с использованием метода моментов. В качестве основного приложения анализируются кинетические данные: результаты частично распространены на каскадно-реакторные схемы

Ключевые слова: метод моментов, кинетические модели, вычислительные алгоритмы

Введение

Метод моментов был предложен в [1] для описания динамических и установившихся режимов процессов полимеризации на кинетическом и каскадно-реакторном уровне. Одновременно был построен ряд моделей, исходя из различных предположений о кинетическом механизме процесса для разработки системы типовых и универсальных модулей [2-5]. В последующие годы на основании уникальных экспериментов построены несколько других типов моделей, ориентированные на новые каталитические системы и измерение молекулярно-массовых распределений методом гель-хроматографии. Ниже приводятся краткие аннотации таких работ с необходимыми авторскими комментариями.

Пособие [6] посвящено прикладной теории построения информационно-управляющих систем реального времени, предназначенных для мониторинга в пространстве и времени параметров состояния сложных объектов и, в частности, непрерывных процессов полимеризации при их описании билинейными динамическими системами. Основной упор при этом делается на процедуры косвенного контроля при переходе от пространства состояний (модели в моментах) к пространству измерений: различным физико-механическим характеристикам. Некоторые параметры представлены далее в [22, 36, 37, 49].

В монографии [7] рассмотрено использование метода моментов для построения математического описания непрерывного процесса многоцентральной полимеризации; разработаны алгоритмы и программное обеспечение для численного решения динамической задачи моделирования с адаптивной подстройкой шага.

В монографии [8] приведено описание проблемно-ориентированной системы моделирования сложных технологических процессов. В качестве примера с использованием разработанной системы проведено исследование двух динамических процессов в условиях периодического изменения входных параметров. Такие задачи часто связаны с разработкой современных информационно-управляющих систем [22].

В монографии [9] рассматриваются теоретические основы и методология построения моделей и алгоритмов диагностики критических состояний в системах компьютерного мониторинга с учетом статистических особенностей объекта контроля.

Рассмотрены методы модульного синтеза имитационных моделей, статистической идентификации гибких технологических объектов, теоретические аспекты реализации аппарата имитационного моделирования в контуре управления технологическими объектами, в том числе для оценки и выбора оптимальных проектных решений [10].

Изложены вопросы существования и единственности решений класса L2 (обобщенные решения) различных типов краевых и начально-краевых задач для уравнений эллиптического, параболического и гиперболического типов с распределенными параметрами [11]. Коэффициенты уравнений зависят только от пространственной переменной, дифференциальные уравнения имеют представления, часто встречающиеся в математических моделях, описывающих тепловые и волновые процессы.

Исследованы возможности и особенности применения методов решения обратных кинетических задач при изучении процессов ионно-координационной полимеризации диенов. Сопоставлены кинетический и статистический подходы к моделированию процессов полимеризации. В качестве модельного объекта использовался процесс полимеризации бутадиена на каталитической системе, содержащей комплекс NdCl_3 с тремя молекулами трибутилфосфата и триизобутилалюминий [12].

На основе моделирования совместно протекающих процессов химического превращения и теплообмена при синтезе каучука СКДК изучено влияние условий проведения процесса полимеризации с учетом реакций передачи цепи и сшивки на его молекулярно-массовые характеристики и потребительские свойства. Определены оптимальные режимы синтеза каучука СКДК в каскаде реакторов непрерывного действия [13].

Построена математическая модель процесса полимеризации бутадиена на неодимсодержащей каталитической системе с учетом кинетической

неоднородности. Приводится методика решения прямой кинетической задачи расчета молекулярных характеристик полимера. Выявлена зависимость средних молекулярных масс образованного в системе полимера от средних молекулярных масс полимера, полученного на каждом типе активных центров [14].

Разработана математическая модель процесса полимеризации бутадиена на кобальтовом катализаторе в каскаде реакторов непрерывного действия. Обобщенная модель совмещенных процессов химического превращения и теплообмена представлена совокупностью уравнений теплового баланса и начальных моментов молекулярно-массового распределения в стационарном режиме. С помощью полученной модели исследовались зависимости молекулярно-массовых характеристик процесса и температуры в реакторах каскада от концентрации мономера и инициатора, определялись оптимальные режимы исследуемого процесса [15].

Описывается метод моделирования процессов синтеза полимеров, позволяющий проводить оперативную идентификацию класса молекулярно-массового распределения в динамике на основе статистических инвариантов. Приводятся результаты моделирования процессов полимеризации [17], показано, что при заданном механизме процесса как на кинетическом, так и на реакторном уровне ММР меняются от величины конверсии, сохраняя при этом устойчивость в пространстве кинетических инвариантов.

В работе представлена методика решения обратной кинетической задачи для процессов полимеризации диенов на ванадийсодержащих каталитических системах. Показано, что предложенная методика позволяет определять значения кинетических констант на основании экспериментальных значений конверсии и среднечисленной молекулярной массы с малой погрешностью, не превышающей погрешности эксперимента [18].

Рассмотрены постановка и некоторые подходы к решению задач выбора оптимальной структурной схемы непрерывного процесса многоцентровой полимеризации [20].

Построены молекулярно-массовые распределения полимера, полученного в каскаде реакторов идеального смешения с помощью пакета символьных вычислений Mathematica. Показано влияние интенсивности передачи цепи на полимер на распределение макромолекул по степени полимеризации и числу активных центров [21].

В работе представлена методика решения прямой и обратной кинетических задач для процессов полимеризации диенов на каталитических системах Циглера-Натта с учетом динамики активных центров. Показано, что предложенная методика позволяет оценить влияние реакций переходов активных центров на кинетику процесса [23].

В работе представлена кинетическая модель полимеризации бутадиена на двухцентровой титансодержащей каталитической системе с учетом изменения концентрации активных центров в ходе процесса и предложена методика решения обратной кинетической задачи. Показано влияние стадии перехода активных центров на молекулярно-массовое распределение путем использования математического моделирования кинетики полимеризации 1,4-полибутадиена на неодимовой анионно-координационной каталитической системе, установлено, что наиболее вероятным является существование в каталитической системе трех различающихся по активности центров полимеризации. Разработанная модель позволяет прогнозировать молекулярно-массовые характеристики полибутадиена [24].

Разработана математическая модель периодического процесса полимеризации под влиянием каталитической системы версатат неодима–диизобутилалюминийгидрид–гексахлор-п-ксилон с учетом ее полицентровости и передачи цепи на полимер. Предложен механизм процесса полимеризации 1,3-бутадиена в присутствии изучаемой каталитической системы. Предполагается, что полимеризация бутадиена протекает на двух типах активных центров с переходом центров с большей активностью в центры с меньшей активностью. Построенная математическая модель адекватно описывает экспериментальные данные, что подтверждает предложенный механизм процесса [25, 26].

В работе построена математическая модель кинетической схемы процесса сополимеризации. При моделировании используется метод моментов. При переходе к непрерывным промышленным реакторным системам учитывается влияние гидродинамического и энергетического уровней [27].

В работе построена математическая модель процесса сополимеризации бутадиена со стиролом в эмульсии. Решена прямая задача и проведен анализ молекулярно-массового распределения полимера. Разработан алгоритм решения обратной задачи для поиска кинетических параметров путем аппроксимации конверсионной зависимости. Математическая модель позволяет предсказывать распределение продуктов сополимеризации в зависимости от конверсии [28].

В работе построена математическая модель кинетической схемы процесса сополимеризации бутадиена со стиролом в эмульсии. Решена прямая задача и исследовано распределение сополимера [29].

Для задач оптимальной динамической стабилизации полимеризационных процессов введен новый класс многоальтернативных систем с переменной структурой управления, рассмотрена содержательная и математическая постановка задачи, которая трактуется как обеспечение заданной нормы N_s в пространстве состояний [30].

Построена математическая модель кинетической схемы процесса сополимеризации бутадиена со стиролом в эмульсии. При моделировании используется метод производящих функций. При переходе к непрерывным промышленным реакторным системам учитывается влияние гидродинамического и энергетического уровней. Получены результаты, показавшие удовлетворительное согласование с экспериментальными данными, полученными в центральной заводской лаборатории ОАО «Синтез-Каучук» (г. Стерлитамак) [31].

Построена математическая модель процесса эмульсионной сополимеризации бутадиена со стиролом. Решена прямая кинетическая задача для расчета характеристик молекулярно-массового распределения. При моделировании использован метод моментов в сочетании с методом производящих функций. Решена обратная задача путем аппроксимации конверсионной зависимости и найдены кинетические константы скоростей реакций рекомбинации и диспропорционирования. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений характеристической вязкости, среднечисленных и среднемассовых молекулярных масс от времени. Результаты расчетов показывают удовлетворительное согласование с экспериментальными данными [32].

Исследован химический процесс производства промышленных эмульсионных синтетических каучуков, протекающий по свободнорадикальному цепному механизму. При построении математической модели использован кинетический подход. Решены прямая задача прогнозирования основных свойств получаемого продукта и обратная задача уточнения кинетических параметров, характеризующих скорость реакций обрыва цепи по механизмам диспропорционирования и рекомбинации. С уточненными значениями кинетических параметров проведено исследование химического размера и состава макромолекул [33].

В статье рассматриваются методы решения прямых и обратных задач в зависимости от сложности химической системы. Для анализа методов был разработан программный комплекс, написанный на объектно-ориентированном языке программирования C#. Приводятся результаты, показанные методами на конкретной кинетической задаче [34].

Рассмотрены особенности и технология определения градиента при оптимизации динамических систем в классе обыкновенных дифференциальных уравнений [35], что удобно использовать в моделях на кинетическом уровне.

При производстве этиленпропиленовых каучуков главным показателем качества является вязкость M_h по Муни, которая характеризует упругие свойства полимера. Трудности оперативного измерения M_h обусловлены слабой изученностью связи реологических характеристик полимеров, которые относятся к неньютонским

жидкостям, с характеристиками качества полимеров из-за непостоянства условий измерения вязкости. В статье приведены результаты исследования зависимости между вязкостью M_h и косвенно измеряемой динамической вязкостью полимера при различных условиях измерения на вискозиметре ротационного типа. Сделан вывод о возможности расчета M_h по результатам измерения динамической вязкости при обеспечении определенных условий измерения [36].

Решение задач оперативного определения показателей качества продуктов производства и обеспечения технико-экономической эффективности управления технологическими процессами по этим показателям базируется на использовании моделей, параметры которых должны периодически корректироваться по данным с поточных анализаторов или лабораторным данным. Для коррекции параметров моделей обычно требуется достаточно большой объем данных, получить которые за короткий интервал времени часто не удается. В связи с этим при изменении технологических параметров, качества сырья, параметров оборудования точность оценки показателей качества падает, что отрицательно влияет на показатели эффективности управления процессами. В статье предлагается метод оперативной адаптации, который требует минимального объема экспериментальных данных. На примере производства этиленпропиленовых каучуков исследовано влияние технологических параметров и качества сырья (факторов) на показатель качества (вязкость по Муни). Показано, что коэффициенты модели, определяющие чувствительность показателя качества к факторам изменяются незначительно. Это позволяет проводить адаптацию модели изменением величины смещения при сохранении коэффициентов факторов. Приведены структура автоматической системы управления по показателям качества с контуром адаптации и алгоритм получения значений показателя качества с заданной точностью [37].

В статье рассмотрены типовые задачи оптимизации каскадно-реакторных схем при проведении процессов полимеризации. Решается несколько задач: структурной и параметрической оптимизации, а также динамической стабилизации в многоальтернативной системе с переменной структурой управления. Для определения градиента используется сопряженная система [38].

В статье изложен опыт разработки типовых модулей градиентной оптимизации при проведении процессов полимеризации в каскаде реакторов. Решены несколько задач оперативного управления, которые объединены одним общим подходом: для определения градиента используется метод сопряженных систем [39].

В статье рассматривается алгоритм понижения порядка решаемой системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Приводятся результаты сравнения явного метода Рунге-Кутты 4-

го порядка с методом Рунге-Кутты 4-го порядка с использованием понижения порядка решаемой системы обыкновенных дифференциальных уравнений [40].

В статье изложен подход к разработке САПР, позволяющий определить минимальный состав и оптимальную структуру как проектируемого технологического процесса, так и математического обеспечения, при которых достигаются наилучшие результаты функционирования САПР [41].

В статье рассматривается структура программного обеспечения многоальтернативного моделирования процессов полимеризации. Представлен пример предварительного расчета номограммы соответствия полидисперсности M_w/M_n полимера при полимеризации в реакторах непрерывного и периодического действия [42].

Рассмотрен общий подход к оптимизации задач проектирования и управления сложным производством путем декомпозиции на участки со слабыми связями по затратам материальных и энергетических ресурсов [43].

Рассматривается дифференциальная система, для которой состояние определяется как решение (слабое решение) для уравнения с частными производными параболического типа с присоединенными краевыми и начальными условиями. Для начально-краевой задачи строится разностная схема и исследуются ее свойства: аппроксимация, устойчивость, сходимость [44].

Закключение. Метод моментов для моделирования процесса синтеза полимеров в настоящее время развивается в направлении учета изменения параметров во времени и пространстве, что приводит к необходимости развития более сложных алгоритмов в рамках систем многоальтернативного моделирования [45-49].

Литература

1. Подвальный, С.Л. Моделирование промышленных процессов полимеризации [Текст] / С.Л. Подвальный. – М., 1979.
2. Подвальный, С.Л. К вопросу о разработке универсальных математических моделей нестационарных процессов реакторов-полимеризаторов [Текст] / С.Л. Подвальный, М.П. Семенов // Журнал прикладной химии. - 1979. - Т. 41, № 7. - С. 1561.
3. Barabanov, A.V. Structural modeling of continuous multi-center polymerization processes [Text] / A.V. Barabanov, S.L. Podval'nyi // Automation and Remote Control. - 2012. - Т. 73, № 7. - Р. 1265-1268.
4. Podvalny, S.L. Mathematical model of a heterogeneous polymerization process with association of active chains [Text] / S.L. Podvalny, M.P. Semenov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. - 1978. - Т. 12, № 5. - Р. 632.
5. Zak, A.V. Mathematical description of stereospecific polymerization of isoprene in a cascade of stirred reactors [Text] / A.V. Zak, B.A. Perlin, S.L. Podvalny // Journal of Applied Chemistry. - 1976. - Т. 48, № 8. - С. 1917.
6. Подвальный, С.Л. Информационно-управляющие системы мониторинга сложных объектов [Текст] / С.Л. Подвальный. - Воронеж, 2010.
7. Подвальный, С.Л. Структурно-молекулярное моделирование непрерывных технологических процессов многоцентровой полимеризации [Текст] / С.Л. Подвальный, А.В. Барабанов. - Воронеж, 2011.
8. Барабанов, В.Ф. Интерактивные средства моделирования сложных технологических процессов [Текст] / С.Л. Подвальный, А.В. Барабанов. - Воронеж, 2000.
9. Подвальный, Е.С. Модели индивидуального прогнозирования и классификации состояний в системах компьютерного мониторинга [Текст] / Е.С. Подвальный. - Воронеж, 1998.
10. Подвальный, С.Л. Имитационное управление технологическими объектами с гибкой структурой [Текст] / С.Л. Подвальный, В.Л. Бурковский. - Воронеж. 1988.
11. Провоторов, В.В. Начально-краевые задачи с распределенными параметрами на графе [Текст] / В.В. Провоторов, А.С. Волкова. - Воронеж, 2014.
12. Обратная кинетическая задача ионно-координационной полимеризации диенов [Текст] / Т.С. Усманов, Э.Р. Максютлова, И.К. Гатауллин, С.И. Спивак, С.М. Усманов, Ю.Б. Монако // Высокомолекулярные соединения. - 2003. - Т. 45, № 2. - С. 181-187.
13. Определение оптимальных параметров ведения процесса полимеризации при синтезе каучука СКДК [Текст] / Г.А. Аминова, Г.В. Мануйко, Т.В. Игнашина, В.В. Бронская, О.В. Захарова, Г.С. Дьяконов // Химическая промышленность сегодня. - 2004. - № 3. - С. 41-48.
14. Максютлова, Э.Р. Влияние кинетической неоднородности неодимсодержащих каталитических систем на расчет молекулярных характеристик полимера [Текст] / Э.Р. Максютлова, С.И. Спивак, Ю.Б. Монаков // Системы управления и информационные технологии. - 2005. - № 2 (19). - С. 20-23
15. Исследование совместно протекающих процессов химического превращения и теплообмена при синтезе каучука СКДК в каскаде из двух реакторов непрерывного действия [Текст] / Г.А. Аминова [и др.] // Инженерно-физический журнал. - 2005. - Т. 78, № 3. - С. 115-122.
16. ABSTRACTS OF COMMUNICATIONS. PART II [Text] / Yu.V. Prokhorov, A.N. Bestuzheva, L.F. Vyunenkov, E.F. Zhigalko, V.I. Khokhlov // Обзорные прикладной и промышленной математики. - 2005. - Т. 12, № 2. - С. 265-575.
17. Поздняков, Д.Н. Моделирование процессов полимеризации с использованием статистических инвариантов [Текст] / Д.Н. Поздняков // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2006. - Т. 2, № 5. - С. 99-107.
18. Абдулова, Э.Н. О решении обратной кинетической задачи для процессов полимеризации диенов на ванадийсодержащих катализаторах [Текст] / Э.Н. Абдулова, Э.Р. Максютлова, Ю.Б. Монаков // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. - 2007. -Т. 50, № 1. - С. 48-51.
19. Легонькова, О.А. Физико-механические свойства гибридных полимерных композиционных материалов [Текст] / О.А. Легонькова, Ю.Л. Гордеева, Е.С. Оболонкова // Все материалы: энциклопедический справочник. - 2007. - № 8. - С. 34-39.
20. Барабанов, А.В. Структурное моделирование непрерывных процессов многоцентровой полимеризации [Текст] / А.В. Барабанов, С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. - 2008. - № 2.2 (32). - С. 216-218.
21. Расчет молекулярно-массового распределения полимера, полученного в каскаде реакторов, с учетом

передачи цепи на полимер [Текст] / Г.В. Мануйко [и др.] // Теоретические основы химической технологии. - 2008. - Т. 42, № 3. - С. 348-351.

22. Дорофеев, Д.В. Автоматизированная система управления технологическим процессом полимеризации бутадиен-стирольного синтетического каучука с применением математической модели контроля качественных показателей в режиме реального времени [Текст] / Д.В. Дорофеев // Информационные технологии моделирования и управления. - 2009. - № 1 (53). - С. 115-119.

23. Методика решения прямой и обратной кинетических задач процесса полимеризации диенов на полицентровых каталитических системах [Текст] / Э.Н. Абдулова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. - 2009. - Т. 52, № 4. - С. 108-111.

24. Решение обратной кинетической задачи для процесса полимеризации бутадиена на каталитической системе $TiCl_4 - Al(i-C_4H_9)_2Cl$ [Текст] / Э.Н. Абдулова [и др.] // Вестник Башкирского университета. - 2009. - Т. 14, № 2. - С. 373-376.

25. Математическое моделирование процесса полимеризации бутадиена на неодимовых металлокомплексных каталитических системах [Текст] / А.М. Гумеров [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. - 2010. - № 9. - С. 291-299.

26. Математическое моделирование процесса полимеризации 1,3-бутадиена на неодимсодержащем катализаторе с учетом полицентровости и передачи цепи на полимер в реакторе периодического действия [Текст] / Г.В. Мануйко [и др.] // Теоретические основы химической технологии. - 2010. - Т. 44, № 2. - С. 151-161.

27. Мифтахов, Э.Н. Математическое моделирование технологической схемы процесса сополимеризации [Текст] / Э.Н. Мифтахов, Л.И. Насырова // Журнал Средневолжского математического общества. - 2010. - Т. 12, № 3. - С. 96-101.

28. Мифтахов, Э.Н. Моделирование и теоретические исследования процесса эмульсионной сополимеризации непрерывным способом [Текст] / Э.Н. Мифтахов, С.А. Мустафина // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. - 2011. - Т. 15, № 5 (45). - С. 98-104.

29. Мифтахов, Э.Н. Исследование размер-состав распределения продукта сополимеризации бутадиена со стиролом [Текст] / Э.Н. Мифтахов, С.А. Мустафина // Журнал Средневолжского математического общества. - 2011. - Т. 13, № 3. - С. 94-100.

30. Подвальный, С.Л. Многоальтернативные системы с переменной структурой автоматического управления процессами непрерывной полимеризации [Текст] / С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. - 2011. - Т. 46, № 4.1. - С. 175-178.

31. Мифтахов, Э.Н. Математическое моделирование процесса сополимеризации бутадиена со стиролом в эмульсии [Текст] / Э.Н. Мифтахов, С.А. Мустафина, И.Ш. Насыров // Башкирский химический журнал. - 2011. - Т. 18. - № 1. - С. 21-24.

32. Решение прямой и обратной кинетических задач для процесса эмульсионной сополимеризации бутадиена со стиролом [Текст] / Э.Н. Мифтахов [и др.] // Вестник Башкирского университета. - 2011. - Т. 16, № 2. - С. 336-338.

33. Мифтахов, Э.Н. Моделирование процесса свободнорадикальной сополимеризации бутадиена со стиролом в производстве эмульсионных каучуков [Текст]

/ Э.Н. Мифтахов, И.Ш. Насыров, С.А. Мустафина // Вестник Казанского технологического университета. - 2012. - Т. 15, № 24. - С. 78-81.

34. Подвальный, С.Л. Методы решения прямой и обратной кинетических задач в зависимости от сложности химической системы [Текст] / С.Л. Подвальный, А.М. Белянин, А.В. Плотников // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. - Т. 8, № 5. - С. 18-21.

35. Подвальный, С.Л. Сопряженные системы и градиент при оптимизации динамических систем [Текст] / С.Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. - Т. 8, № 12-1. - С. 57-62.

36. Веревкин, А.П. Исследование связи между динамической вязкостью и вязкостью полимеров по Муни на примере этиленпропиленовых каучуков для целей управления процессом [Текст] / А.П. Веревкин, О.В. Кирюшин, Ш.Ф. Уразметов // Башкирский химический журнал. - 2012. - Т. 19, № 4. - С. 16-19.

37. Метод адаптации моделей оперативной оценки показателей качества нефтехимических производств (на примере производства этиленпропиленовых каучуков) [Текст] / А.П. Веревкин [и др.] // Нефтегазовое дело. - 2013. - № 11-4. - С. 127-132.

38. Подвальный, С.Л. Решение задач градиентной оптимизации каскадно-реакторных схем с использованием сопряженных систем [Текст] / С.Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, № 2. - С. 27-32.

39. Подвальный, С.Л. Решение задач градиентной оптимизации процессов непрерывной полимеризации с использованием сопряженных систем [Текст] / С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. - 2013. - Т. 52, № 2. - С. 8-14.

40. Белянин, А.М. Алгоритм понижения порядка решаемой системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменным шагом на примере прямой кинетической задачи [Текст] / А.М. Белянин, С.Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, № 3-1. - С. 35-38.

41. Холопкина, Л.В. Моделирование и оптимизация проектирования процессов непрерывной полимеризации [Текст] / Л.В. Холопкина // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, № 4. - С. 87-90.

42. Подвальный, С.Л. Модульная структура системы многоальтернативного моделирования процессов полимеризации [Текст] / С.Л. Подвальный, А.В. Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, № 5.1. - С. 41-43.

43. Подвальный, Е.С. Системный анализ проблем автоматизации проектирования и оптимизации процессов полимеризации в производстве каучука [Текст] / Е.С. Подвальный, И.К. Черных, С.М. Пасмурнов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, № 6.1. - С. 20-22.

44. Провоторов, В.В. Разностная схема для параболического уравнения с распределенными параметрами на графе [Текст] / В.В. Провоторов // Системы управления и информационные технологии. - 2014. - Т. 55, № 1.1. - С. 187-190.

45. Podval'ny, S.L. Intelligent modeling systems: design principles [Text] / S.L. Podval'ny, T.M. Ledeneva // Automation and Remote Control. - 2013. - Т. 74, № 7. - P. 1201-1210.

46. Barabanov, A.V. Structural modeling of continuous multi-center polymerization processes [Text] / A.V. Barabanov, S.L. Podval'ny // Automation and Remote Control. - 2012. - Vol. 73. - №7. - P. 1265-1268.

47. Барабанов, В.Ф. Многовариантное моделирование динамических систем эволюционного типа для управления в экстремальных ситуациях [Текст] / В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный, О.С. Плахотнюк. – Воронеж, 2007.

48. Проблемы разработки интеллектуальных систем многоальтернативного моделирования [Текст] / С.Л.

Подвальный, Т.М. Леденева, А.Д. Поваляев, Е.С. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, № 3.1. - С. 19-23.

49. Дорофеев, Д.В. Автоматизированный способ оценивания на основе ДПМ-подхода вязкости по Муни сополимера [Текст] / Д.В. Дорофеев, В.А. Каладзе // Информационные технологии моделирования и управления. - 2011. - Т. 68, № 3. - С. 306-313.

Воронежский государственный технический университет

MODELING OF INDUSTRIAL POLYMERIZATION PROCESSES BASED ON THE METHOD OF MOMENTS

S.L. Podvalny

A review of the application of the method of moments in the simulation and optimization of the synthesis of polymers using the method of moments. As the main application kinetic data are analyzed: the results partially extended to cascade-reactor circuit

Key words: method of moments, kinetic models, computational algorithms

АДАПТИВНЫЕ ПОИСКОВЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

С.Ю. Белецкая, Д.Н. Лицман, А.Д. Поваляев, А.В. Гаганов

Рассматриваются задачи обучения искусственных нейронных сетей. Для их решения предлагаются адаптивные алгоритмы поисковой оптимизации, построенные на основе рандомизированного подхода

Ключевые слова: обучение нейронной сети, весовые коэффициенты, рандомизация, случайный вектор, адаптивные поисковые алгоритмы

В настоящее время при решении задач проектирования и управления в различных предметных областях широкое применение находят нейросетевые технологии. При этом эффективность нейросетевого моделирования и адекватность построенных моделей во многом зависят от используемых алгоритмов обучения сетей. В этой связи в современных исследованиях большое внимание уделяется разработке и совершенствованию алгоритмов обучения искусственных нейронных сетей [1].

Задача обучения нейронной сети состоит в определении таких значений весовых коэффициентов, которые обеспечивали бы минимальное отклонение выходных сигналов сети от ожидаемых эталонных значений. Обучение с учителем осуществляется на основе обучающей выборки:

$$\langle X^k, D^k \rangle, k = \overline{1, p},$$

где p - количество обучающих пар, X^k - вектор значений входных сигналов сети; D^k - вектор требуемых значений выходных сигналов [1,2].

Пусть Y^k - вектор выходных сигналов нейронной сети, полученный для входного вектора X^k . Тогда задача обучения сводится к задаче минимизации целевой функции, зависящей в конечном итоге от вектора весовых коэффициентов W :

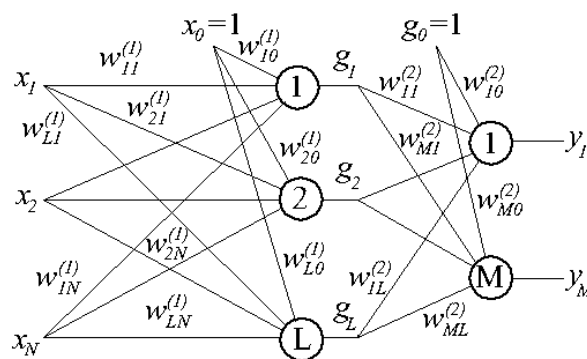
$$F(W) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^M (y_i - d_i)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где M - количество выходных сигналов.

Если рассматривается единичная обучающая выборка $\langle X, D \rangle$, критерий (1) принимает вид:

$$F(W) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (y_i - d_i)^2 \rightarrow \min.$$

Формирование целевой функции для задачи обучения проиллюстрируем на примере многослойного персептрона. На рисунке представлена структурная схема двухслойного персептрона. Здесь $x_1, x_2, \dots, x_N$ - входные сигналы нейронной сети, $g_1, g_2, \dots, g_L$ - выходные сигналы первого слоя, $y_1, \dots, y_M$ - выходные сигналы сети, $w_{ij}^{(m)}$ - значения весов. При этом верхние индексы в скобках (m) означают номер слоя нейрона.



Двухслойный персептрон

Выходные сигналы нейронных слоев определяются следующим образом:

$$g_l = f \left(\sum_{j=0}^N w_{lj}^{(1)} \cdot x_j \right), l = \overline{1, L},$$

$$y_i = f \left(\sum_{l=0}^L w_{il}^{(2)} \cdot g_l \right) = f \left(\sum_{l=0}^L w_{il}^{(2)} \cdot f \left(\sum_{j=0}^N w_{lj}^{(1)} \cdot x_j \right) \right), i = \overline{1, M}. \quad (2)$$

Здесь f - функция активации, одинаковая для всех нейронов сети.

С учётом (2) критерий оптимальности (3) примет вид

$$F(W) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^M \left(f \left(\sum_{l=0}^L w_{il}^{(2)} \cdot f \left(\sum_{j=0}^N w_{lj}^{(1)} \cdot x_j \right) \right) - d_i \right)^2 \rightarrow \min.$$

Аналогично можно определить критерии оптимальности в задаче обучения при произвольном числе слоёв. При этом формируемые критерии ха-

Белецкая Светлана Юрьевна – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. (473) 243-77-04

Лицман Дмитрий Николаевич – ВГТУ, аспирант, тел. (473) 243-77-04

Поваляев Анатолий Дмитриевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, профессор, тел. (473) 246-12-07

Гаганов Александр Владимирович – ВГТУ, директор НОЦ, e-mail: gaganov@hotmail.ru

рактируются сложной структурой, значительной нелинейностью, высокой размерностью, что обуславливает повышенные требования к используемым алгоритмам обучения.

В статье рассматриваются адаптивные поисковые алгоритмы обучения нейронных сетей. Они строятся на основе вероятностной переформулировки (рандомизации) решаемой задачи (1) и перехода к осредненному критерию оптимальности [3]:

$$G(W) = M[F(W)] \rightarrow \min_{\{W\}}, \quad (3)$$

где M – математическое ожидание. При этом множество возможных решений (значений весовых коэффициентов) W расширяется до множества случайных векторов $\{W\}$.

Рандомизированные итерационные процедуры перестройки весовых коэффициентов нейронной сети имеют следующий вид:

$$W^{N+1} = W^N + \alpha_N H^N, \quad (4)$$

где N – номер итерации; H^N – направление движения; α_N – значение шага. При этом вектор H^N также является случайным.

При дальнейшей алгоритмизации поисковая процедура (4) переформулируется с использованием различных вероятностных характеристик случайных векторов. Так, переходя в формуле (4) к математическим ожиданиям, получим

$$M[W^{N+1}] = M[W^N] + \alpha_N M[H^N]. \quad (5)$$

В работах [2,3] рассмотрены математические основы построения адаптивных поисковых алгоритмов. При этом на каждой N -й итерации осуществляется замена исходной целевой функции некоторой потенциальной функцией $v(W)$ с последующим использованием для её оптимизации процедур градиентного типа. Градиент потенциальной функции $v(W)$ статистически оценивается в процессе поиска по реализациям случайных векторов и адаптивно перестраивается на основе текущей информации. В конечном итоге формируется обобщенная рандомизированная процедура поиска оптимальных вариантов, которая затем может быть переформулирована в различных вероятностных характеристиках. Так, в работе [3] сформирована итерационная поисковая схема с использованием математического ожидания:

$$m^{N+1} = m^N + \alpha_N \cdot M_{W^N} M_{U^N} \left[\frac{\Psi(f(U^N) - c_N)}{\omega_n |W^N - U^N|^n} (W^N - U^N) \right], \quad (6)$$

где $m^N = M[W^N]$; ω_n – площадь поверхности единичной сферы в пространстве R^n ; U^N – вспомогательный случайный вектор; $c_N = \text{const}$ – средний уровень целевой функции, который используется для анализа текущей информации;

$\Psi(\cdot)$ – монотонная неубывающая функция, удовлетворяющая условиям: $\Psi(t) \cdot t > 0 \quad \forall t \neq 0$; $\Psi(0) = 0$.

Процедура (6) носит обобщенный характер и служит основой для построения комплекса адаптивных алгоритмов поискового типа, использующих только значения критерия оптимальности. При этом вариант алгоритмической схемы зависит от способов получения реализаций случайных векторов W и U , выбора функции $\Psi(t)$, вариантов определения уровня c_N , а также от выбранных стратегий статистической оценки математического ожидания. Так, если использовать одну реализацию вектора U^N , а в качестве реализации вектора W^N выбрать его математическое ожидание $m^N = M[W^N]$, можно перейти к следующей схеме [4,5]:

$$m^{N+1} = m^N + \alpha_N \left[\frac{\Psi(f(u^N) - c_N)}{\omega_n |m^N - u^N|^n} (m^N - u^N) \right], \quad (7)$$

где через u^N обозначена реализация случайного вектора U^N . Процедура (7) является адаптивным расширением метода переменного многогранника. При этом в качестве вершин многогранника рассматриваются реализации случайных векторов, а в качестве центра тяжести многогранника – перестраиваемое математическое ожидание m^N .

Таким образом, для алгоритмизации рассматриваемых задач настройки весовых коэффициентов нейронной сети может быть использована следующая обобщенная вычислительная схема:

1. Инициализация начальных значений весовых коэффициентов $W^0 = (w_1^0, \dots, w_n^0)$, где n – общее количество весовых коэффициентов по всем слоям нейронной сети. При этом $N=0$, где N – номер итерации.

2. Получение k -реализаций случайного вектора U^N : $u^{N,i}$, $i = \overline{1, k}$. Каждая реализация $u^{N,i}$ представляет собой n -мерный вектор $u^{N,i} = (u_1^{N,i}, \dots, u_n^{N,i})^T$. При этом в качестве первой реализации выбирается начальный вектор весовых коэффициентов сети, задаваемый в начале работы алгоритма: $u^{N,1} = W^0$. Если количество реализаций k равно $n+1$, то реализации $u^{N,i}$ могут рассматриваться как вершины переменного многогранника в пространстве R^n .

3. Вычисление значений целевой функции $F(u^{N,i})$, $i = \overline{1, k}$. После получения всех значений $F(u^{N,i})$ реализации $u^{N,i}$ упорядочиваются по

возрастанию значений целевой функции:
 $F(u^{N,1}) \leq \dots \leq F(u^{N,k})$.

4. Определение среднего уровня целевой функции $c_N = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k F(u^{N,i})$.

5. Разделение реализаций на группы перспективности в зависимости от значения уровня c_N :

$\Omega_p : f(u^{N,i}) \leq c_N$ - перспективная группареализаций;

$\Omega_v : f(u^{N,i}) > c_N$ - неперспективная группа.

6. Вычисление математического ожидания m^N по r перспективным реализациям:

$$m^N = \sum_{j=1}^r p_j^N u^{N,j}, \quad \sum_{j=1}^r p_j^N = 1.$$

При этом вероятности p_j^N определяются следующим образом:

$$p_i^N = \left| F(u^{N,i}) - c_N \right| / \sum_{j=1}^r \left| F(u^{N,j}) - c_N \right|, \quad i = \overline{1, r}.$$

7. Движение в случайных векторах и определение значения m^{N+1} . При этом используются обобщенная рандомизированная процедура (6) или ее различные варианты (например, схема (7)). Если движение осуществляется на основе схемы (7), то данная итерационная процедура применяется к реализации $u^{N,k}$ с наибольшим значением целевой функции.

8. Адаптивное уточнение шага α_N по схеме:

$$\alpha_N = \begin{cases} \alpha_N \gamma_1, & \text{если } F(m^{N+1}) \leq c_N \\ \alpha_N \gamma_2, & \text{если } F(m^{N+1}) > c_N \end{cases},$$

где $\gamma_1 > 1$; $0 < \gamma_2 < 1$. Параметры γ_1 и γ_2 задаются пользователем в начале работы алгоритма.

9. Корректировка списка реализаций следующим образом:

$$u^{N+1,k} = m^{N+1}, \quad F(u^{N+1,k}) = F(m^{N+1}).$$

10. Проверка сходимости в соответствии с условием

$$\sigma_N^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (F(u^{N,i}) - c_N)^2 < \varepsilon,$$

где ε – точность, задаваемая на входе алгоритма.

11. Если сходимость не достигнута, осуществляется переход к шагу 3 (при этом $N = N + 1$).

Воронежский государственный технический университет

ADAPTIVE SEARCH ALGORITHMS OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TRAINING

S.Yu. Beletskaja, D.N. Litsman, A.D. Povalyaev, A.V. Gaganov

The problems artificial neural networks training are considered. For solving of this problems the adaptive search engine optimization algorithms, based on randomized approach, are suggested

Key words: neural networks training, weights, randomization, random vector, adaptive search algorithms

После окончания работы алгоритма результирующие значения весовых коэффициентов нейронной сети W_{opt} определяются следующим образом:

$$W_{opt} = u^{N,1},$$

где $u^{N,1}$ – реализация с наименьшим значением целевой функции.

В работе [3] показано, что рассматриваемые адаптивные алгоритмы поисковой оптимизации имеют нелокальный характер. Доказываются теоремы о выходе итерационного процесса из зон локальных экстремумов и о сходимости в заданную область.

Необходимо заметить, что на основе различных интерпретаций обобщенной рандомизированной процедуры (6) могут быть построены и другие варианты адаптивных поисковых алгоритмов. Используемые при построении данных алгоритмов принципы рандомизации позволяют вынести поиск оптимальных решений на уровень множества случайных векторов, что обеспечивает возможность выявления статистических закономерностей в свойствах оптимизируемой функции и позволяет повысить эффективность оптимизационного процесса при обучении нейронных сетей.

Литература

1. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования [Текст] / И.П. Норенков. - М.: МГТУ им. Баумана, 2002. 448 с.
2. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. - М.: Горячая линия Телеком, 2013. - 384 с.
3. Каплинский, А.И. Моделирование и алгоритмизация слабоформализованных задач выбора наилучших вариантов систем [Текст] / А.И. Каплинский, И.Б. Русман, В.М. Умывакин. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 1990. - 234 с.
4. Львович, Я.Е. Адаптивные методы оптимального проектирования [Текст] / Я.Е. Львович, С.Ю. Белецкая // Информационные технологии. - 2010. - № 7. - С. 1-32.
5. Батищев, Д.И. Оптимизация в САПР [Текст] / Д.И. Батищев, Я.Е. Львович, В.Н. Фролов. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 1997. - 416 с.
6. Проблемы разработки интеллектуальных систем многоальтернативного моделирования [Текст] / С.Л. Подвальный, Т.М. Леденева, А.Д. Поваляев, Е.С. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - № 3-1. - С. 19-23.
7. Основы автоматизации проектирования, тестирования и управления жизненным циклом изделия [Текст] / В.Ф. Барабанов, А.Д. Поваляев, С.Л. Подвальный, С.В. Тюрин. - Воронеж. 2011.

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ РАЗВИВАЮЩИХСЯ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ

Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский

В статье рассматривается структура процесса принятия решений в мультисервисных сетях информационного обслуживания населения. Описывается постановка задачи принятия решений по формированию структуры развивающихся мультисервисных сетей с применением аппарата динамического программирования

Ключевые слова: принятие решений, мультисервисные сети, динамическое программирование, дискретное программирование

В настоящее время мультисервисные сети предоставляют многоцелевые услуги транспортировки и коммутации данных. Структура мультисервисной информационной сети должна поддерживать все типы передаваемых данных и предоставлять все типы услуг на данной территории в любое время и с необходимым качеством. В связи с этим процесс принятия проектных решений требует реализации комплексных процедур выбора оптимальной структуры сети прежде всего в условиях ее развития [1].

Для операторов связи реализация мультисервисных сетей позволяет расширить клиентскую базу за счет привлечения широкого круга как корпоративных, так и персональных пользователей. Это достигается путем предоставления новых сервисов и дополнительных

услуг по единой инфраструктуре передачи данных. Для конечных пользователей услуг единая инфраструктура подразумевает наличие единой точки входа для выполнения операций для обеспечения таких услуг, как оплата, смена тарифного плана и подключения новых сервисов. Таким образом, использование мультисервисных сетей является перспективным как для операторов связи, предоставляющих услуги, так и для конечных пользователей [2].

На рисунке представлена обобщенная схема процесса принятия решений по развитию структуры сети. Включение узлов в сеть связано с выбором необходимых для их функционирования технических средств. Процесс реорганизации линий связи требует принятия решения о структуре сети в целом [3, 4].



Обобщенная схема процесса принятия решений по формированию структуры развивающихся мультисервисных сетей информационного обслуживания населения

Елизаров Дмитрий Эдуардович – ВГТУ, аспирант, e-mail: elizarovdm@list.ru

Бурковский Виктор Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvl@vorstu.ru

Таким образом, в процессе развития системы информационного обслуживания клиентов мультисервисной сети необходимо решить две главных задачи. Первая связана с оптимальным размещением включаемых в сеть дополнительных

узлов. Вторая - с выбором оптимального состава включенных в сеть узлов из множества альтернативных устройств и программных продуктов различных производителей.

Данные задачи являются жестко связанными. В зависимости от выбора состава узлов степень влияния информационной системы на пользователей и масштаб охвата категорий пользователей является различной, что приводит к изменениям в структуре и характеристиках связей в системе. Реконфигурация структурных связей или количества узлов в рамках информационной системы приводит к необходимости оперативного выбора оптимального состава всех узлов с целью охвата максимально возможного количества пользователей [3].

Для формального рассмотрения задачи размещения узлов введем следующие обозначения:

$J = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ - множество узлов сети u_j , $j = \overline{1, n}$;

$I = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ - множество альтернативных мест размещения узлов сети a_i , $i = \overline{1, m}$;

c_j - величина затрат на введение в состав сети узла u_j ;

p_{ij} - затраты на размещение узла u_j в альтернативном месте a_i .

Введем также следующие дискретные переменные:

z_j - булева переменная, показывающая, вводится ли узел u_j в состав сети;

x_{ij} - булева переменная, показывающая, размещается ли узел u_j в месте a_i .

С использованием введенных обозначений и переменных задача размещения вводимых узлов сети сводится к минимизации суммарных затрат на введение узлов в состав сети и их размещение. Данная задача может быть сведена к задаче линейного целочисленного программирования.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^n c_j z_j \rightarrow \min \quad (1)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{узел } u_j \text{ размещается в месте } a_i; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

$$z_j = \begin{cases} 1, & \text{узел } u_j \text{ вводится в состав сети;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3)$$

$$z_j \geq x_{ij} \quad (4)$$

Ограничение (4) в данном случае гарантирует, что узел, который не входит в состав сети, не может быть размещен.

Перейдем к рассмотрению задачи оптимизации комплекса технических средств. Для этого введем следующие обозначения:

$S = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ - множество сервисов r_s , предоставляемых сетью, $s = \overline{1, k}$;

$E = \{b_1, b_2, \dots, b_h\}$ - множество альтернативных вариантов оборудования b_e , допустимого для установки, $e = \overline{1, h}$;

q_e - затраты на вхождение в состав узла оборудования b_e ;

g_{es} - затраты на предоставление оборудованием b_e услуги r_s .

Также введем следующие целочисленные переменные:

k_e - булева переменная, показывающая, входит или нет оборудование b_e в состав узла;

u_{es} - булева переменная, указывающая, используется или нет входящее в состав системы оборудование b_e для предоставления услуги r_s .

Задача оптимизации комплекса технических средств для конкретного узла сети сводится к минимизации суммарных затрат на установку и предоставление услуг оборудованием. Запишем ее как задачу линейного целочисленного программирования с использованием введенных обозначений.

$$\sum_{e \in E} q_e k_e + \sum_{e \in E} \sum_{s \in S} g_{es} u_{es} \rightarrow \min \quad (5)$$

$$u_{es} = \begin{cases} 1, & \text{оборудование } b_e \text{ используется} \\ & \text{для предоставления услуги } r_s; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

$$k_e = \begin{cases} 1, & \text{оборудование } b_e \text{ входит в состав узла;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (7)$$

$$k_e \geq u_{es} \quad (8)$$

Здесь ограничение (8) означает невозможность предоставления услуг оборудованием в случае, если оно не входит в состав узла.

Для обеспечения устойчивости и конкурентоспособности компании на рынке предоставления телекоммуникационных услуг крайне важно создать условия не только для оперативного, но и долгосрочного планирования структуры и технического обеспечения сети. Зачастую возникает задача разработки проекта развития структуры сети в условиях растущей потребности пользователей в услугах и с учетом ограниченности бюджета [2].

Данную задачу следует рассматривать в формате динамического программирования.

В условиях известного спроса на услуги сети требуется решить две главные задачи, описанные выше. Задача размещения вводимых в состав сети узлов может быть решена отдельно, с применением

аппарата линейного целочисленного программирования.

Задача выбора оптимального состава комплекса технических средств требует рассмотрения ее в зависимости от растущего спроса и может быть сведена к динамической задаче дискретного программирования [5].

Введем следующие обозначения:

$E = \{b_1, b_2, \dots, b_h\}$ - множество альтернативных вариантов оборудования b_e , допустимого для установки, $e = \overline{1, h}$;

c_e - затраты на приобретение и установку оборудования b_e ;

m_k - количество установленных узлов для интервала k , определяется заранее решением задачи о размещении узлов;

v_e - объем потребности в услугах, реализуемый устройством e ;

$\tilde{t}_k \in [0; T]$ - k -й временной подынтервал из рассматриваемого интервала $[0; T]$;

$x_e(t_{ki})$ - булева переменная, показывающая, устанавливается или нет устройство типа e в момент времени k для узла i .

Рассмотрим данную задачу на детерминированном временном интервале $[0; T]$ как динамическую задачу о ранце. В каждый момент времени $\tilde{t}_k \in [0; T]$, где необходимо в состав каждого узла включить такое количество оборудования разных видов, чтобы затраты на его установку были минимальными (10). Будем считать, что решать задачу для каждого узла $i \in [0; m_k]$ будем в отдельный момент времени t_{ki} .

$$\sum_{k=\bar{1}}^K \sum_{i=\bar{1}}^{m_k} \sum_{e=\bar{1}}^n c_e x_e(t_{ki}) \rightarrow \min \quad (9)$$

$$x_e(t_{ki}) = \begin{cases} 1, & \text{оборудование } b_e \text{ устанавливается} \\ & \text{в момент времени } t_{ki}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (10)$$

$$t_{ki} \in [t_{k0}; t_{km_k}] \quad (11)$$

$$\tilde{t}_k \in [0; T] \quad (12)$$

Введем следующие ограничения. Суммарные затраты на приобретение и установку оборудования не должны превышать заранее выделенной на нее суммы $S_{\max}$:

$$\sum_{k=\bar{1}}^K \sum_{i=\bar{1}}^{m_k} \sum_{e=\bar{1}}^n c_e x_e(t_{ki}) \leq S_{\max}. \quad (13)$$

Затраты на установку оборудования для каждого интервала также не должны превышать заранее выделенной суммы $s_{\max}(\tilde{t}_k)$.

$$\sum_{i=\bar{1}}^{m_k} \sum_{e=\bar{1}}^n c_e x_e(t_{ki}) \leq s_{\max}(\tilde{t}_k). \quad (14)$$

Будем считать, что оборудование конкретного типа может удовлетворить заранее известный объем потребности пользователей в услугах сети v_e . Суммарный объем потребности, реализуемый на интервале $\tilde{t}_k \in [0; T]$, не должен превышать спрогнозированной потребности пользователей в услугах сети $V_{\max}$.

$$\sum_{k=\bar{1}}^K \sum_{i=\bar{1}}^{m_k} \sum_{e=\bar{1}}^n v_e x_e(t_{ki}) \leq V_{\max} \quad (15)$$

На каждом интервале k объем реализуемой потребности не должен превышать спрогнозированного общего объема потребности $V(\tilde{t}_k)$ для рассматриваемого интервала.

$$\sum_{i=\bar{1}}^{m_k} \sum_{e=\bar{1}}^n v_e x_e(t_{ki}) \leq V(\tilde{t}_k). \quad (16)$$

Количество оборудования, которое может быть установлено для каждого i -го узла на каждом интервале k , не может быть меньше минимального реализуемого количества, необходимого для установки и функционирования узла $X_{\min}$. И не может превышать максимальное количество оборудования, которое возможно включить в состав одного узла $X_{\max}$.

$$X_{\min} \leq \sum_{e=\bar{1}}^n v_e x_e(t_{ki}) \leq X_{\max}. \quad (17)$$

Таким образом, применение описанной выше модели дискретного программирования позволяет на основе прогноза изменения функции $V(\tilde{t}_k)$ реализовать решение задачи оптимизации структуры мультисервисной сети в условиях сложившейся динамики потребности в пользовательских услугах.

Использование данной модели оптимизации структуры мультисервисной сети дает возможность обеспечить ее развитие на долгосрочный период при минимальных затратах.

Литература

1. Спирячин, А.А. Проблематика использования облачных технологий в системах принятия решений [Текст] / А.А. Спирячин, Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Прикладная математика, механика и процессы управления. Пермь: Издательство ПНИПУ, 2014. - С. 150.
2. Степанов, С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей [Текст] / С.Н. Степанов. - М.: Эко-Трендз, 2010. - 392 с.

3. Бурковский, В. Л. Анализ развивающихся информационных систем на основе аппарата моделирования и оптимизации [Текст]: монография / В. Л. Бурковский, И. М. Матвиенко, А. В. Бурковский. – Воронеж: ГОУ ВПО ВГУ, 2009. - 136с.

4. Общие принципы построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений [Текст] / Э. А. Бабкин [и др.]. - Н. Новгород: НГТУ, 2008. - 266 с.

5. Беллман, Р. Динамическое программирование и уравнения в частных производных [Текст] / Р. Беллман, Э. Энджел. – М.: Мир, 1974. - 204 с.

6. Подвальный С.Л. Имитационное управление технологическими объектами с гибкой структурой [Текст] / С.Л. Подвальный, В.Л. Бурковский. - Воронеж, 1988.

7. Бурковский, В. Л. Модели развивающихся распределенных информационных систем на основе моделей социальных систем [Текст] / И. М. Матвиенко, В. Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2008. - Т. 4. - № 5. - С. 75-77.

Воронежский государственный технический университет

OPTIMIZATION MODELS FOR CREATING A STRUCTURE OF MULTI SERVICE NETWORKS UNDER DEVELOPMENT THAT PROVIDE PUBLIC INFORMATION SERVICES

D.E. Elizarov, V.L. Burkovsky

This article considers the structure of decision-making in a multi service networks that provide public information services. Describes the problem statement of a decision making for creation a structure of multi service networks under development with a usage of a dynamic programming

Key words: decision-making, multi service networks, dynamic programming, discrete programming

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

С.Ю. Белецкая, Ю.А. Асанов, А.Д. Поваляев, А.В. Гаганов

В статье рассматриваются генетические алгоритмы многокритериальной оптимизации, основанные на Парето-доминировании, и исследуется их эффективность на тестовых задачах

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, критерии оптимальности, генетические алгоритмы, множество Парето, вычислительный эксперимент

В настоящее время при решении задач многокритериальной оптимизации в различных предметных областях широкое применение находят эволюционно-генетические алгоритмы. Методы данного класса используют только значения критериев оптимальности, поэтому могут эффективно применяться при решении оптимизационных задач со сложными алгоритмическими моделями [1,2].

Можно выделить два основных подхода к решению задач многокритериальной оптимизации на основе эволюционно-генетических алгоритмов. Первый подход основан на преобразовании решаемой многокритериальной задачи в задачу скалярной оптимизации. При этом могут быть использованы как свертка локальных критериев в обобщенный интегральный показатель, так и сведение решаемых многокритериальных задач к последовательности специальных задач с сформулированными критериями, последовательных уступок, гарантированного результата, адаптивные человеко-машинные процедуры и т.д.). При этом эволюционно-генетические алгоритмы применяются в качестве инвариантной части алгоритмического обеспечения для решения скалярных оптимизационных задач. Для учета многокритериальности (выбора весовых коэффициентов, смены критериев в процессе оптимизации, назначения уступок и т.д.) используются классические неэволюционные процедуры. Данный подход направлен, как правило, на получение единственного решения. Однако во многих практических задачах многокритериальной оптимизации более предпочтительным является получение набора решений.

Второй подход к алгоритмизации задач многокритериальной оптимизации основан на использовании концепции Парето-доминирования [3]. При этом определяется не единичное решение, а множество всех эффективных точек (множество Парето) и

их образ в критериальном пространстве – фронт Парето. Полученное множество в дальнейшем исследуется для выявления компромиссов. Множества решений Парето могут быть различных размеров, но обычно размер увеличивается с увеличением числа критериев.

К наиболее распространенным генетическим алгоритмам многокритериальной оптимизации, реализующим принципы Парето-доминирования, относятся следующие:

- метод SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) и его модификация SPEA2;
- VEGA – Vector Evaluated Genetic Algorithm;
- FFGA – Fonseca and Fleming's Multiobjective Genetic Algorithm;
- NPGA – Niched Pareto Genetic Algorithm.

Эти методы реализуют различные схемы назначения пригодности и селекции.

В методе SPEA создается внешнее множество (архив), предназначенное для хранения недоминируемых решений. Количество индивидов, включаемых в архив, регулируется с использованием процедуры кластеризации. Определение значений пригодности индивидов в методе SPEA осуществляется только относительно индивидов внешнего множества, которые участвуют в селекции наравне с другими членами популяции [4].

Алгоритм SPEA включает следующие основные шаги:

1. Сформировать первоначальную популяцию P_0 и пустое внешнее множество (архив) $A = \emptyset$. Положить $t = 0$.

2. Модернизация внешнего множества.

2.1. Положить промежуточное внешнее множество $A' = A_t$.

2.2. Скопировать решения, недоминируемые относительно A_t , в множество A' , определяемое следующим образом:

$$A' : A = A \cup \{x \mid x \in A_t \cap x \in p(A_t)\}.$$

2.3. Удалить из множества A' особи, которые слабо доминируемы относительно A' . При этом если существует пара особей $x, y \in A'$ и $x \succ y$, то $A' = A' - \{y\}$.

2.4. С помощью процедуры кластеризации уменьшить число особей, которые хранятся во

Белецкая Светлана Юрьевна – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. (473) 243-77-04

Асанов Юрий Анатольевич – ВГТУ, магистрант, тел. (473) 243-77-04

Поваляев Анатолий Дмитриевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, профессор, тел. (473) 246-12-07

Гаганов Александр Владимирович – ВГТУ, директор НОЦ, e-mail: gaganov@hotmail.ru

внешнем множестве, и поместить результирующее уменьшенное множество в P_{t+1} .

3. Вычислить значения пригодности индивидов в P_t и A' .

4. Селекция. Положить $A' = \emptyset$ и выполнить для $s = 1, N$ следующие действия:

4.1. Случайным образом выбрать двух индивидов $x, y \in A' \cup P_t$.

4.2. Если $F(x) < F(y)$ (при решении задачи минимизации), то $A' = A' \cup \{x\}$, в противном случае $A' = A' \cup \{y\}$.

5. Рекомбинация.

6. Мутация.

7. Окончание. Положить $P_{t+1} = A'$ и $t = t + 1$.

Если $t \geq T$, где T – максимальное число поколений, то из последней популяции отбираются недоминируемые индивиды. Если $t < T$, перейти к шагу 2.

Этапы 5 и 6 (рекомбинация и мутация) осуществляются согласно общей схеме генетического алгоритма [1,2]. Этап назначения пригодности отличается от подобного в общем эволюционном алгоритме и реализуется по следующей схеме:

1. Каждому индивиду $x \in A_t$ присваивается значение $S(x) \in [0,1]$, называемое «силой» (или весом) особи. Значение «силы» пропорционально количеству членов популяции $y \in P_t$, для которых $x \succ y$.

$$S(x) = \frac{\{y : y \in P_t \cap x \succ y\}}{N+1}.$$

Таким образом, пригодность особи x , принадлежащей архиву, равна ее «силе»: $F(x) = S(x)$.

2. Пригодность особи $y \in P_t$ определяется следующим образом:

$$F(y) = 1 + \sum_{x \in A', x \succ y} S(x).$$

При этом чем меньше пригодность, тем больше шансов у особи перейти в следующее поколение.

В методе SPEA2 используются следующие модификации базового метода:

1. Вводится понятие ранга r . При этом ранг – это число особей из популяции P и архива A , которые доминирует текущее решение.

2. Меняется формула вычисления веса $S(x)$, которая теперь одина для всех особей. Вес равен сумме значений рангов всех особей из популяции P и архива A , которые делают текущее решение доминирующим.

3. Претерпевает изменения архив A , который теперь имеет фиксированный размер m . На каждой итерации архив A в случае недостаточного количества особей дополняется наилучшими доминируемыми решениями из популяции, в случае же избыт-

ка особей происходит удаление наименее удаленных друг от друга решений.

4. Благодаря изменению расчета веса $S(x)$ архив A приобретает большее значение, так как теперь особи, находящиеся в архиве A , имеют абсолютное право на селекционирование и перенос в следующее поколение.

Изменения, описанные выше, привели к следующим результатам:

1. Веса особей значительно реже совпадают, а следовательно, уменьшается случайная составляющая при отборе решений. Это достигается за счет изменения формулы расчета веса и введения понятия ранга.

2. Устраняются проблемы, возникавшие при слишком малом размере архива, это, прежде всего, усиление случайной составляющей при отборе особей. Также произошло устранение проблем, проявляющихся при слишком большом размере архива, – замедление развития популяции. Это было достигнуто благодаря фиксации размера архива.

Метод VEGA относится к методам, использующим селекцию по переключающимся целевым функциям. Это означает, что вычисление пригодности особей для каждой подпопуляции проводится по одному из критериев. Таким образом, вся популяция делится на K подпопуляций, где K – количество критериев. Затем вычисляются значения пригодности особей в каждой подпопуляции по соответствующему критерию. В ходе проведения процедуры отбора все подпопуляции объединяются в промежуточную популяцию и подвергаются кроссинговеру и мутации [4].

FFGA – это метод, который использует ранжирование особей, основанное на Парето-доминировании. Рангом в данном методе, называется число особей, доминирующих над данной. В рамках описания метода имеет смысл упомянуть только процедуру присвоения пригодности и, следовательно, рангов, так как на остальные процедуры, присутствующие эволюционно-генетическим алгоритмам, не накладывается никаких ограничений.

Назначение пригодности можно описать следующим алгоритмом.

1. Для каждой особи $S_j, j \in [1, N]$ из популяции P_0 , где N – размер популяции, вычисляется ранг $r_j = 1 + \{i : i \in P_0 \wedge i \succ j\}$.

2. Популяция сортируется по значению ранга r , затем каждой особи $S_j, j \in [1, N]$ назначается так называемую “сырая” пригодность F'_j посредством интерполяции. При этом “опорными” точками для интерполяции служат точки худшей ($F'_j = 1$ для особи S_j , ранг которой максимален) и лучшей ($F'_j = N$ для особи S_j , ранг которой минимален) пригодности.

3. Вычисляется итоговая пригодность, посредством усреднения “сырой” пригодности особей S_r с одинаковыми рангами:

$$F_{S_r} = \sum_{s=1}^n \frac{F'(S_r)}{n},$$

где n – количество особей с одинаковым рангом.

В методе NPGA этап назначения пригодности заменяется модифицированной схемой деления пригодности с использованием понятия ниши, которая определяется для индивидов в пространстве альтернатив или целевых функций и обеспечивает возможность поддержания разнообразия, позволяя получить представительное множество Парето [4].

Для сравнительного анализа эффективности методов были использованы задачи многокритериальной оптимизации различной сложности (ZDT1, ZDT2, ZDT3 и ZDT4).

1. ZDT1 представляет собой базовую многокритериальную задачу с выпуклой границей и не имеет локальных оптимумов. Критерии формулируются следующим образом:

$$f_1(x_1, \dots, x_n) = x_1, \quad (1)$$

$$f_2(x_1, \dots, x_n) = g(x_1, \dots, x_n) \times h(x_1, \dots, x_n), \quad (2)$$

где $g(x_1, \dots, x_n)$ определяется формулой (3), а $h(x_1, \dots, x_n)$ формулой (4):

$$g(x_1, \dots, x_n) = 1 + \frac{9}{n-1} \cdot \sum_{i=2}^n x_i, \quad (3)$$

$$h(x_1, \dots, x_n) = 1 - \sqrt{\frac{x_1}{g(x_1, \dots, x_n)}}. \quad (4)$$

Здесь n – число параметров равное 30.

2. ZDT2 является базовой многокритериальной задачей с вогнутой границей, не имеет локальных оптимумов. В задаче используются критерии (1) и (2). При этом $g(x_1, \dots, x_n)$ определяется формулой (5), а $h(x_1, \dots, x_n)$ формулой

$$g(x_1, \dots, x_n) = 1 + \frac{9}{n-1} \cdot \sum_{i=2}^n x_i, \quad (5)$$

$$h(x_1, \dots, x_n) = 1 - \left(\frac{x_1}{g(x_1, \dots, x_n)} \right)^2, \quad (6)$$

где $n = 30$.

3. ZDT3 имеет границу Парето с разрывами, не имеет локальных оптимумов. Критерии также определяются по формулам (1) и (2). При этом

$$g(x_1, \dots, x_n) = 1 + \frac{9}{n-1} \cdot \sum_{i=2}^n x_i, \quad (7)$$

$$h(x_1, \dots, x_n) = 1 - \sqrt{\frac{x_1}{g(x_1, \dots, x_n)} - \frac{x_1}{g(x_1, \dots, x_n)} \sin(10\pi x_1)}, \quad (8)$$

где n – число параметров равное 30.

4. ZDT4 имеет выпуклую границу Парето, но со многими локальными субоптимальными границами, в которых могут «застревать» особи, что значительно повышает сложность задачи. В задаче используются критерии (1) и (2). При этом

$$g(x_1, \dots, x_n) = 1 + 10(n-1) + \sum_{i=2}^n (x_i^2 - 10 \cos(4\pi x_i)), \quad (9)$$

$$h(x_1, \dots, x_n) = 1 - \sqrt{\frac{x_1}{g(x_1, \dots, x_n)}}, \quad (10)$$

где $n = 10$.

В процессе вычислительного эксперимента методы SPEA2, FFGA и VEGA сравнивались с методом случайного перебора и NPGA. При этом использовались следующие параметры рассматриваемых алгоритмов:

- размер популяции 100 особей;
- количество итераций 200;
- частота мутаций 15 %;
- частота скрещивания 80 %;
- размер архива – 20 особей (для SPEA2).

В качестве критерия эффективности рассматривается процент успешных испытаний. При этом под успешным испытанием подразумевается такое испытание, при котором по крайней мере одно решение попадает во фронт Парето. Усреднение результатов проводилось по 30 прогонам. Результаты представлены в таблице.

	ZDT1	ZDT2	ZDT3	ZDT4
Случайный перебор	81%	84%	80%	83%
NPGA	73%	77%	79%	71%
SPEA2	91%	93%	96%	85%
VEGA	81%	85%	84%	79%
FFGA	87%	90%	91%	80%

Таким образом, при решении всех тестовых задач наиболее эффективным оказался метод SPEA2. Однако результаты его работы во многом зависят от размера используемого внешнего архива. С одной стороны, так как все индивиды внешнего множества участвуют в селекции, слишком большое количество хранящихся в архиве особей может уменьшить селективное давление и замедлить поиск. Однако слишком сильное уменьшение размера архива снижает эффективность поиска.

В ходе проведенных вычислительных экспериментов было исследовано влияние размера архива на эффективность метода SPEA2. Для тестирования были выбраны следующие размеры архива: 50, 30 и 10 особей.

Результаты вычислительных экспериментов показали, что наименьший размер архива (10 особей) приводит к удовлетворительным результатам только в задачах без субоптимальных решений. В задаче ZDT4, имеющей множество локальных минимумов, результаты оказались наихудшими среди всех выбранных значений размера архивов. Это относится также и к задаче 3, имеющей разрывы. Такие результаты могут быть объяснены тем, что для восстановления популяции приходилось подвергать селекции доминируемые решения, а значит, не было гарантий того, что в ходе селекции будет получено улучшение текущего решения. Тем не менее архив малого размера может быть использован в случаях, когда нет необходимости в точном решении, так как он позволяет сократить время выполнения задачи.

Использование архива наибольшего размера (50 особей) оказалось избыточным. Было выявлено, что слишком большой размер архива замедляет развитие популяции, следовательно, шанс получить непаретовские решения велик. Кроме того, использование столь большого архива увеличивает время выполнения каждой итерации. Тем не менее тест с наибольшим архивом показал лучшие результаты при решении задач ZDT3 и ZDT4, а значит, его использование оправдано для решения задач с множеством субоптимумов и разрывов.

Архив среднего размера показал промежуточные результаты. Поэтому можно утверждать, что использование подобного архива наиболее эффективно в задачах, характеризующихся полным отсутствием априорной информации о фронте Парето. Затем, в случае необходимости, архив может быть расширен.

Дальнейшие исследования связаны с разработкой многометодной среды поиска оптимальных решений на основе эволюционно-генетических алгоритмов [5]. Разрабатываемая алгоритмическая среда

должна включать в себя библиотеку генетических алгоритмов, построенных в рамках рассмотренных выше подходов, а также средства управления оптимизационным процессом, позволяющие осуществлять настройку структуры и параметров алгоритмов в процессе поиска.

Литература

1. Курейчик, В.В. Основы теории эволюционных вычислений [Текст] / В.В. Курейчик, В.М. Курейчик, С.И. Родзин. – Ростов-н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2010. – 320 с.
2. Решение дискретных задач с помощью эволюционно-генетических алгоритмов [Текст]: учеб. пособие / Д.И. Батищев [и др.]. – Н.Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. – 199 с.
3. Подиновский, В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач [Текст] / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Физматлит, 2007. – 256 с.
4. Гуменникова, А.В. Адаптивные поисковые алгоритмы для решения сложных задач многокритериальной оптимизации [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Гуменникова. – Красноярск, 2006.
5. Белецкая, С.Ю. Организация многометодной среды поиска оптимальных проектных решений при разработке ЖРД [Текст] / С.Ю. Белецкая, О.Г. Яскевич, Е.М. Ильин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т.9, № 1. – С. 26-27.
6. Podval'ny, S.L. Intelligent modeling systems: design principles [Text] / S.L. Podval'ny, T.M. Ledeneva // Automation and Remote Control. - 2013. - Vol. 74, № 7. - P. 1201-1210.
7. Проблемы разработки интеллектуальных систем многоальтернативного моделирования [Текст] / С.Л. Подвальный, Т.М. Леденева, А.Д. Поваляев, Е.С. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - № 3-1. - С. 19-23.
8. Основы автоматизации проектирования, тестирования и управления жизненным циклом изделия [Текст] / В.Ф. Барабанов, А.Д. Поваляев, С.Л. Подвальный, С.В. Тюрин. – Воронеж. 2011.
9. Подвальный С.Л. Сопряженные системы и градиент при оптимизации динамических систем [Текст] / С.Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. - Т. 8. - № 12-1. - С. 57-62.

Воронежский государственный технический университет

RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION GENETIC ALGORITHMS

S.Yu. Beletskaja, Yu.A. Asanov, A.D. Povalyayev, A.V. Gaganov

The article deals with genetic algorithms multiobjective optimization based on Pareto dominance, and study their performance on the test problems

Key words: multiobjective optimization, optimality criteria, genetic algorithms, Pareto set, computer experiment

УПРАВЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ СУШКИ БАРДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

И.С. Макаш, А.В. Бурковский

В статье рассмотрена реализация системы управления с использованием нечеткого регулятора в процессах управления потенциально опасным технологическим процессом сушки барды

Ключевые слова: управление, регулятор, процесс сушки

Одним из технологических процессов спиртовой отрасли, характеризующихся потенциальной опасностью и обладающих рядом неопределенностей, является процесс сушки основного отхода производства (барды). Этот процесс характеризуется сложностью поддержания технологических параметров и малых рабочих диапазонов ведения процесса, высоким энергопотреблением и рядом неопределенностей. Поддержание заданных параметров процесса сушки барды напрямую влияет на объем производства сухой барды, качественные характеристики и, как следствие, экономическую эффективность спиртового производства в целом.

В настоящее время установлен запрет на производство спирта без переработки или утилизации барды на очистных сооружениях. В настоящее время распространена технология сушки барды в соответствии с ГОСТ 31809-2012 Барда кормовая. Сухую кормовую барду получают путем переработки и высушивания послеспиртовой барды. Ее используют в производстве комбикормов, а также в качестве высокобелковой добавки в рацион сельскохозяйственных животных и птиц [1].

Качественные характеристики сухой барды напрямую связаны с точностью поддержания технологических параметров процесса, оперативного реагирования на возмущения, регулирования. Традиционно поддержание параметров осуществляется автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП), также на АСУ ТП возлагается функция противоаварийной защиты (ПАЗ). Система управления охватывает весь производственный цикл сушки барды.

Традиционно АСУ ТП делится на два уровня – «нижний» и «верхний». В основе «нижнего» уровня подсистемы находится программируемый логический контроллер (ПЛК). ПЛК осуществляет функцию обработки входных сигналов, их регистрацию, а также выдачу управляющих воздействий на исполнительные механизмы в соответствии с заложенными в ПЛК процедурами исполнения. Также ПЛК осуществляет функцию обработки команд, поступающих с «верхнего» уровня, передачу параметров технологического процесса на «верхней» уровень, где осуществляются обработка и отображение поступившей с ПЛК информации в виде трендов, текстовых сообщений и т.д. В подсистеме АСУ ТП «верхнего» уровня используют так называемые SCADA-системы на персональных компьютерах или терминалах, на видеокдрах которых отображен процесс производства.

Процессы регулирования основаны на дискретных (позиционные, релейные, импульсные устройства) и непрерывных действиях (пропорциональные, П-; интегральные, И-; пропорционально-интегральные, ПИ-; пропорционально-интегрально-дифференциальные ПИД-регуляторы). Структура ПИД-регулятора приведена на (рис. 1).



Рис. 1. Структура ПИД-регулятора

Коэффициенты усиления (настройки значений регулятора) устанавливаются при наладке системы управления. При этом принимаются во внимание экспертные знания процесса, рекомендации изготовителей оборудования, часть значений регуляторов устанавливается опытным путем в процессе производства. Системы управления, основанные на ПИД-регуляторах, в условиях

незначительных колебаний технологического процесса успешно справляются с задачей регулирования и поддержания параметров [2].

В системе управления процессом сушки барды можно выделить факторы, характеризующие его как объект управления (рис. 2). На рисунке показано, как изменение одного входного параметра ведет к изменению двух-трех выходных параметров.

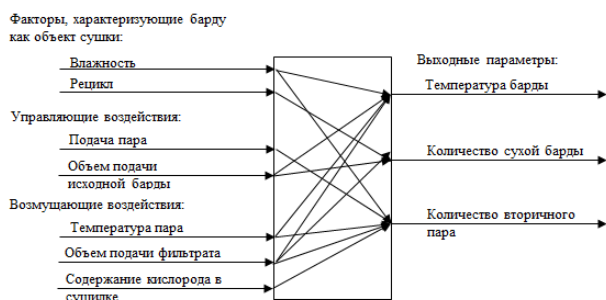


Рис. 2. Процесс сушки барды как объект управления

Подобные изменения некорректно обрабатываются ПИД-регуляторами, так как в процесс вносятся значительные возмущения, а инертность системы управления приводит к временному смещению рабочих диапазонов, что негативно отражается на качестве и объеме готовой продукции, а также повышает риск аварийной ситуации.

На практике уменьшение объема барды, подаваемой на сушилку, приводит к росту температуры внутри сушилки из-за частичной разгрузки продукта сушки при сохранении режимов подачи теплоносителя (пара). При этом регулирование подачи пара по заранее выставленным коэффициентам ПИД-регулятора на начальном этапе незначительно, а впоследствии избыточно (рис. 3).

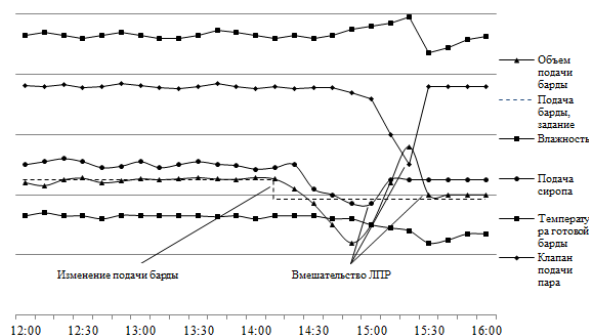


Рис. 3. Изменение процесса под управлением ПИД-регулятора

При этом косвенные параметры технологического процесса превышают предельно допустимые диапазоны регулирования. Таким образом, при данном подходе в регулировании процесса сушки

барды требуется своевременная корректировка параметров лицом, принимающим решение (ЛПР). Круглосуточный контроль со стороны ЛПР увеличивает нагрузку на оператора, что повышает риск аварийной ситуации в случае принятия неверного решения или несвоевременной реакции на возмущение, возникшее в процессе производства.

Учитывая вышеуказанные недостатки традиционной системы ПИД-регулирования при ведении процесса сушки барды, предлагается реализация системы управления с использованием методов нечеткой логики с формированием корректирующих поправок в работе ПИД-регулятора (рис. 4), где Z – задание, E – ошибка; K_p , T_i , K_d – параметры ПИД-регулятора, N – возмущение, Y – выходное значение.

В предлагаемом ПИД-регуляторе с методами нечеткого управления настройки не будут статическими, их коэффициенты планируется изменять в зависимости от состояния системы в текущий момент времени. Такая система управления будет представлять собой нелинейную систему.

Это позволит качественно изменить процесс управления, не прибегая к сложным описаниям математической модели процесса сушки барды и неявных зависимостей параметров системы, а также сделать процесс управления более адаптивным.

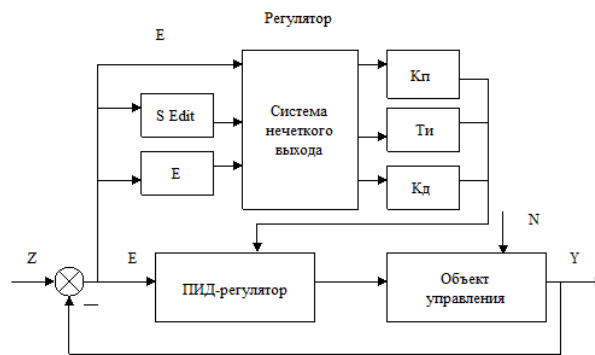


Рис. 4. Регулятор с методами нечеткой логики

Регулятор с методами нечеткого управления в основе традиционного регулятора будет осуществлять корректировку коэффициентов в настройках ПИД-регулятора в зависимости от текущего значения параметра регулирования. В основе алгоритма работы нечеткого регулятора будет набор правил, которые формируются в блоке базы знаний в соответствии с экспертными знаниями процесса (рис. 5).

База правил нечеткого регулятора с двумя входными (x_1 , x_2), имеющими четыре терма ($D1-D4$), и тремя выходными (y_1 , y_2 , y_3),

имеющими семь термов со следующими значениями: (NB) negative big - отклонение отрицательное большое, (NM) negative medium - отклонение отрицательное среднее, (NS) negative small - отклонение отрицательное малое, (ZE) zero - отклонение нулевое, (PS) positive small - отклонение положительное малое, (PM) positive medium - отклонение положительное среднее, (PB) positive big - отклонение положительное большое [3].

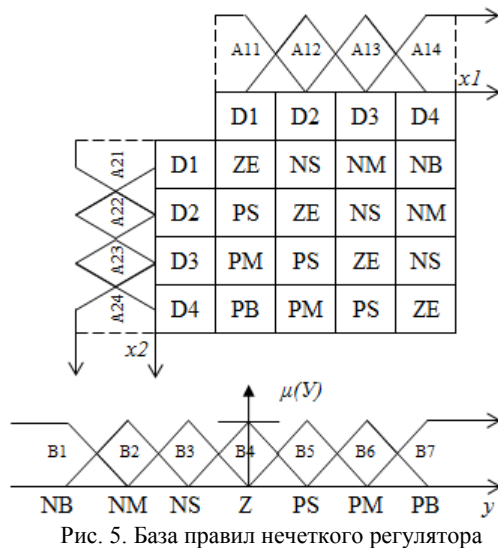


Рис. 5. База правил нечеткого регулятора

К входным параметрам относится текущее значение коэффициентов в настройках регулятора, к выходным параметрам относятся корректирующие значения параметров регулятора, оптимизированные в соответствии с экспертными знаниями.

Для лингвистических переменных z , Δz определяются нечеткие множества с соответствующими идентификаторами для функций принадлежности $\mu(z)$, $\mu(\Delta z)$ и формируются две функции принадлежности. В одном случае аргументом является параметр z и Δz (рис. 6).

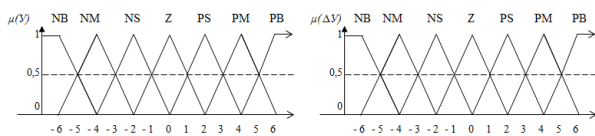


Рис. 6. Входные функции принадлежности

С помощью функции принадлежности (рис. 7) задается требуемая поправка в настройке регулятора $\mu(k)$. Значения коэффициентов в настройках ПИД-регулятора адаптированы под текущие параметры сушки, а изменения в количественных и качественных показателях будут сглажены за счет изменения этих коэффициентов.

Реализовать систему нечеткой логики методов нечеткого управления в промышленных системах управления на базе комплексов SIMATIC (Siemens, Германия), возможно в прикладном пакете FuzzyControl++.

Данный пакет является встроенным решением, включает в свой состав инструментальные средства конфигурирования регулятора, готовые к применению функциональные блоки, не требует дополнительного времени на разработку и написание дополнительных процедур исполняемых ПЛК, что существенно снижает трудовые затраты при разработке систем управления.

Следует отметить, что использование FuzzyControl++ не исключает обратного перехода системы на работу с ПИД-регуляторами по команде оператора, что позволяет осуществлять оптимальное регулирование на основе использования преимуществ обеих систем.

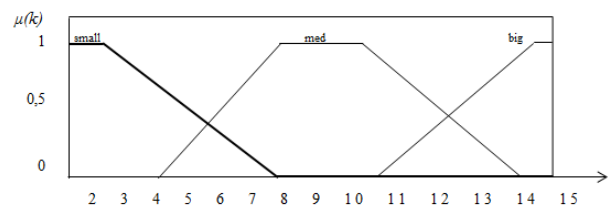


Рис. 7. Выходные функции принадлежности

В результате внедрения нечеткого регулятора формирующего поправки в коэффициенты настроек ПИД-регулятора изменение параметра подачи барды не приводит к существенным отклонениям в работе и находится в допустимом диапазоне регулирования и поддержания заданных параметров сушки барды (рис. 8) [4].

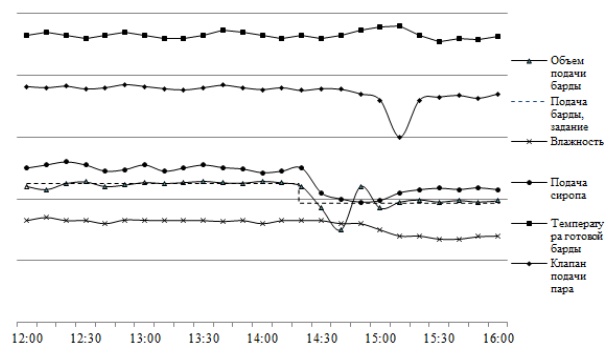


Рис. 8. Изменение процесса под управлением нечеткого регулятора

Таким образом, использование методов нечеткой логики в работе регуляторов систем

управления позволяет получить качественный переходный процесс без использования вычислительных процедур, характерных для классического метода регулирования.

Литература

1. Макаш, И.С. Структура системы управления технологическим процессом сушки основного отхода производства в спиртовой отрасли [Текст] / И.С. Макаш, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 11. – С. 152-154.

2. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования [Текст]: справочное пособие / под ред. А.С. Ключева. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

3. Михайленко, В.С. Методы настройки нечеткого адаптивного ПИД-регулятора [Текст] / В.С. Михайленко, В.Ф. Ложечников // ААЭКС. - 2009. - №2 (24).

4. Макаш, И.С. Нечеткое управление технологическим процессом сушки барды в условиях неконтролируемых источников возмущения [Текст] / И.С. Макаш, В.Л. Бурковский // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2014. - № 1. - С. 38-42.

5. Барабанов, В.Ф. Многовариантное моделирование динамических систем эволюционного типа для управления в экстремальных ситуациях [Текст] / В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный, О.С. Плехотнюк. – Воронеж. 2007.

Воронежский государственный технический университет

MANAGEMENT OF POTENTIALLY HAZARDOUS PRODUCTION DRYING STILLAGE USING FUZZY CONTROLLER

I.S. Makash, A.V. Burkovsky

The article deals with the implementation of the control system using fuzzy controller in the management processes potentially dangerous process of drying stillage

Key words: management, regulator, drying process

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МНГОВАРИАНТНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ

М.Н. Аралов, А.В. Ачкасов, В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный

В данной статье рассматриваются программные реализации математических методов расчета тепловых параметров интегральных схем. Получены результаты, позволяющие оптимизировать работу специальных программных средств для моделирования тепловых полей. Разработано специальное программное средство визуализации тепловых полей микросхем 3D-IC с возможностью использования различных математических алгоритмов при построении матрицы температур

Ключевые слова: трехмерная сборка, тепловой анализ, термограмма

Введение. Моделирование и анализ являются важным этапом производства, позволяющим отладить и оптимизировать конечный продукт до появления прототипа. В настоящее время во многих отраслях производства применяют тепловой анализ, что позволяет избежать появления нежелательных утечек тепла, локальных зон перегрева и прочих нежелательных факторов. На основе теплового моделирования происходит оптимизация размещения источников и потребителей тепла, что положительно влияет и на нетепловые характеристики продукта.

В электронной промышленности все жестче проявляется тенденция к снижению размеров и увеличению мощности компонентов. Такое увеличение степени интеграции неизбежно выводит тепловые проблемы на первый план. А выявление проблем после появления прототипа ведет к увеличению времени и стоимости разработки. Все это приводит к острой необходимости разработки специальных программных средств, позволяющих производить тепловой анализ электронных компонентов на этапе проектирования.

Постановка задачи. На основе данных проекта цифрового элемента можно синтезировать тепловую модель этого элемента [1]. Под тепловой моделью в данном случае подразумевается трехмерный массив, каждой ячейке которого соответствуют значения теплоемкости и теплопроводности, а также мощности нагревания. Теплоемкость и теплопроводность – табличные данные для применяемых материалов. Мощность теплоотдачи рассчитывается из электрического сопротивления данной ячейки и максимальной силы тока, протекающего через неё. С учетом таких данных проводится тепловое моделирование, далее формируется матрица температур в заданный момент времени и визуализируется эта матрицу.

Тепловое моделирование будет производиться различными методами для сравнения результатов.

Программный комплекс. Структурная схема разработанного программного комплекса представлена на рис. 1.

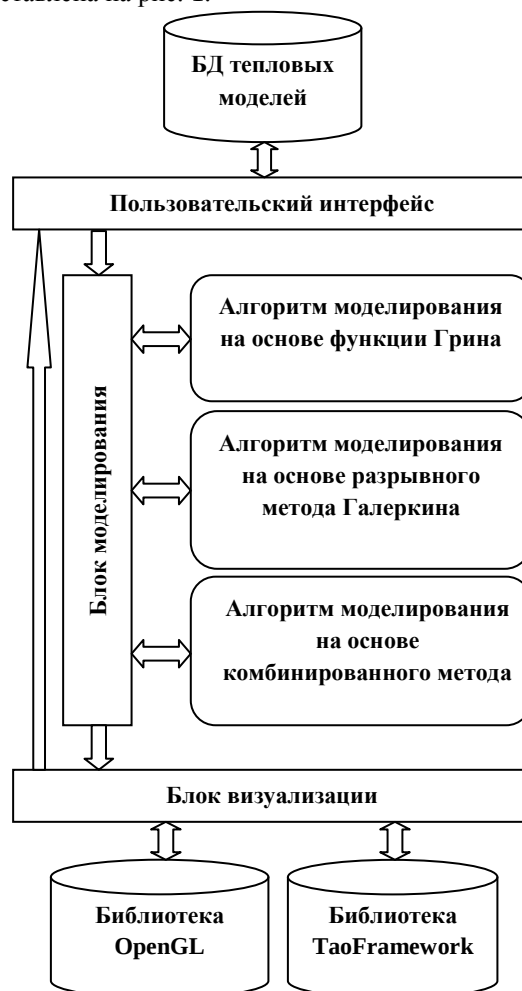


Рис. 1. Структура программного комплекса

Тепловая модель представляет собой совокупность трехмерных массивов значений теплоемкости, теплопроводности, начальной температуры и мощности источников тепла. Эти массивы хранятся в отдельной библиотеке.

Аралов Михаил Николаевич – ВГТУ, аспирант, тел. (473) 2437718

Ачкасов Александр Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, докторант, e-mail: ava@niiet.ru

Барабанов Владимир Федорович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. (473) 2437718

Подвальный Семен Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. (473) 243-77-18

Блок пользовательского интерфейса отвечает за выбор метода моделирования, ввод параметров моделирования и вывод на экран термограммы и матрицы температур. Кроме прочего, здесь реализована функция сохранения полученных результатов в различных форматах.

Блок моделирования производит расчет матрицы температур на основе входных данных. Для моделирования может использоваться один из трех методов – функция Грина, разрывный метод Галеркина и метод комбинированного вычисления. Реализация этих методов описана в [2] и [3].

Блок визуализации возвращает графическое отображение рассчитанной матрицы температур (термограмму). Для обработки графических данных используются библиотеки OpenGL и TaoFramework.

Алгоритм работы программного комплекса отображен на рис. 2.

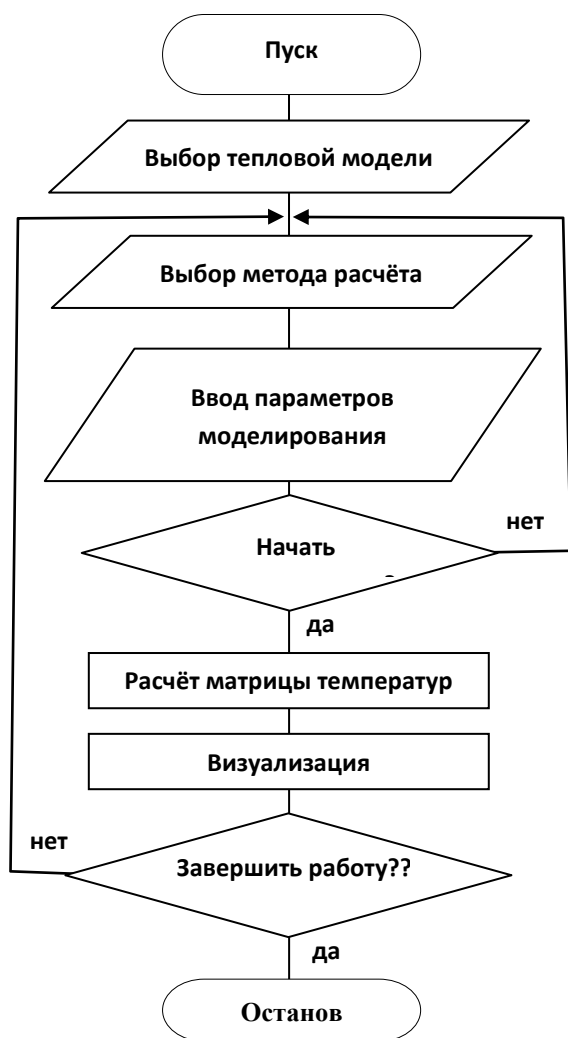


Рис. 2. Алгоритм работы программы

Проведение опытов и результаты моделирования. Для оценки работы разработанного программного комплекса использовалась ранняя модель микроконтроллера 1887BE4У, имеющая неисправности, которые приводили к образованию зон локального перегрева.

Данный микроконтроллер – относительно несложная ИС, массивы её тепловой модели имеют размерность 5x2711x3241 ячеек.

В качестве эталона для сравнения результатов моделирования и визуализации будем использовать тепловизионную съемку работы одного из прототипов микроконтроллера 1887BE4У. Термограмма, снятая при помощи тепловизора на 59 секунде после подачи питания, представлена на рис. 3. Четыре светлые точки в области, отмеченной белой окружностью, это зоны локального перегрева, появившиеся из-за коротких замыканий. Видно, что правая часть кристалла в целом нагрелась больше, чем левая. Просматриваются контуры отдельных компонентов микроконтроллера.

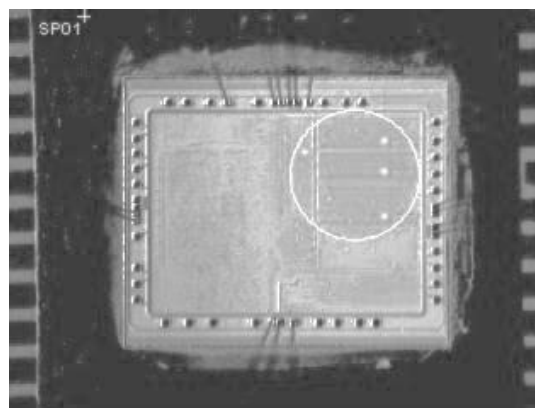


Рис. 3. Данные тепловизора

Моделирование с использованием функции Грина заняло 463 секунды реального времени. Процесс, связанный с построением матрицы температур занял порядка 300 Мб оперативной памяти ПК. Термограмма, полученная данным методом, представлена на рис. 4. Выявлены зоны коротких замыканий. Плавный переход температуры между левой и правой частями кристалла не виден. Элементы кристалла почти не различимы.

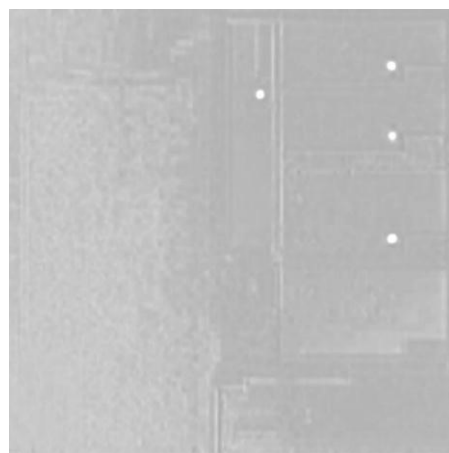


Рис. 4. Термограмма на основе функции Грина

Моделирование на основе разрывного метода Галеркина заняло 682 секунды реального времени.

Процесс, связанный с построением матрицы температур занял порядка 325 Мб оперативной памяти ПК. Термограмма, полученная данным методом, представлена на рис. 5. Видны зоны локального перегрева. Плавный переход температуры между левой и правой частями кристалла не виден. Элементы кристалла различимы плохо.

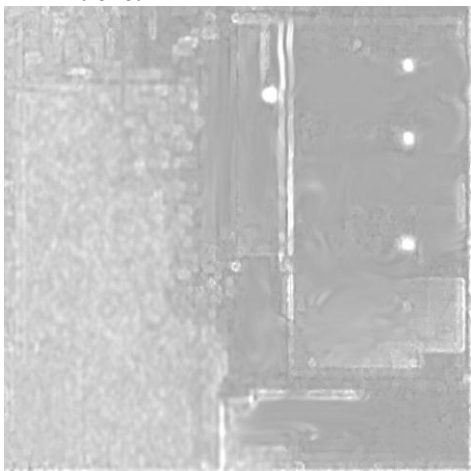


Рис. 5. Термограмма на основе метода Галеркина

Моделирование на основе комбинированного метода заняло 1509 секунд реального времени. Процесс, связанный с построением матрицы температур, занял порядка 650 Мб оперативной памяти ПК. Термограмма, полученная данным методом, представлена на рис. 6. Видны зоны локального перегрева и плавный переход температуры между левой и правой частями кристалла. Элементы кристалла различимы плохо.

Заключение. Алгоритмы расчета тепловых параметров, основанные на функции Грина и разрывном методе Галеркина, дают посредственные результаты, но обеспечивают высокую производительность. Расчет методом комбинированного вычисления занимает достаточно много времени, однако обеспечивает наилучший результат. В целом зоны локального перегрева выявлены во всех случаях, что говорит о пригодности к расчету тепловых параметров каждого рассмотренного алгоритма.

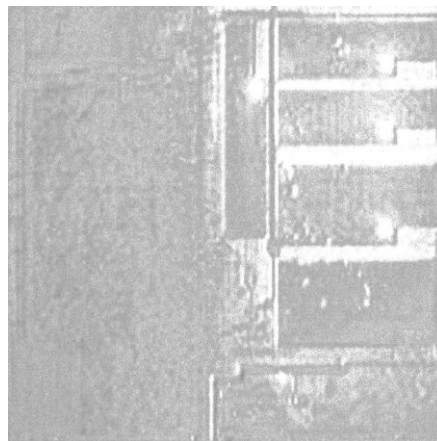


Рис. 6. Термограмма на основе комбинированного метода

Литература

1. Барабанов, В.Ф. Структура программной модели цифрового устройства [Текст] / В.Ф. Барабанов, М.Н. Аралов // Информационные технологии моделирования и управления. – 2013. - № 6 (84). - С. 583-589.
2. Барабанов, В.Ф. Математические методы моделирования тепловых полей в трехмерной сборке интегральных схем [Текст] / Барабанов В.Ф., М.Н., Аралов Н.И. Гребенникова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, № 6.3. – С.55-57.
3. Методы и алгоритмы моделирования тепловых полей в трехмерной сборке интегральных схем [Текст] / В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный, А.В. Ачкасов, М.Н. Аралов // Радиотехника. – 2014. - № 6. – С. 82-87.
4. Барабанов В.Ф. Интерактивные средства моделирования сложных технологических процессов [Текст] / В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный. -Воронеж, 2000.
5. Барабанов В.Ф. Основы автоматизации проектирования, тестирования и управления жизненным циклом изделия [Текст] / В.Ф. Барабанов, А.Д. Поваляев, С.Л. Подвальный, С.В. Тюрин. – Воронеж. 2011.
6. Брагин, Д.М. Интегрированный программный комплекс моделирования и проектирования электронных средств с учетом тепловых полей [Текст] / Д.М.Брагин, В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный // Системы управления и информационные технологии. - 2007. - Т. 29. - № 3. - С.63-66.

Воронежский государственный технический университет

PROGRAM IMPLEMENTATION OF MULTIPLE MATHEMATICAL SIMULATION OF THERMAL FIELDS

M.N. Aralov, A.V. Achkasov, V.F. Barabanov, S.L. Podvalniy

In this article program implementations of mathematical methods of calculation of thermal parameters of integrated circuits are considered. The results allowing to optimize operation of special software for simulation of thermal fields are received. The special software of visualization of thermal fields of chips 3D-IC with possibility of use of different mathematical algorithms is developed in case of creation of a matrix of temperatures

Key words: three-dimensional assembly, thermal analysis, Thermogram

ОРГАНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДСИСТЕМЫ СБЫТА ПРОМЫШЛЕННОГО ХОЛДИНГА

Д.В. Тонких, А.Д. Данилов

Статья рассматривает современное информационное обеспечение подсистемы сбыта промышленного предприятия, приводит математическую модель системы сбыта

Ключевые слова: логистика, перевозки, транспорт, управление материальными потоками

В статье [1] мы рассмотрели структуру крупного промышленного холдинга с точки зрения логистики и представили её в виде иерархического дерева. Как уже было отмечено, сбытовые движения в предприятии подразделяются на два уровня: непосредственные поставки покупателям и отгрузки на склады. Первые, в свою очередь, подразделяются на поставки через дочерние или через сторонние предприятия, а вторые – на отгрузки на собственные склады или же на склады сторонних компаний.

Мерой эффективности системы товародвижения служит отношение затрат фирмы к её результатам. Основные издержки товародвижения складываются из расходов по транспортировке, последующему складированию товаров, поддержанию товарно-материальных запасов, получению, отгрузке и упаковке товаров, административных расходов и расходов по обработке заказов.

Основные элементы системы товародвижения и их доли в общей сумме затрат на него (в процентах) представлены на рис. 1.

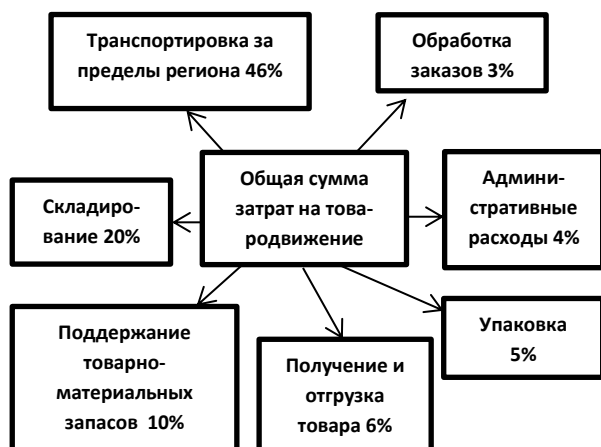


Рис. 1. Компоненты системы товародвижения

На современных высококонкурентных рынках производители сталкиваются с задачами укорочения производственного цикла, ускорения процесса доставки товара конечному покупателю и минимизации количества основных средств. Для решения этих задач на предприятиях внедряются системы управления цепочками поставок (в зарубежной литературе — supply chain management, или SCM). Эта стратегия, а также соответствующее прикладное программное обеспечение призвано автоматизировать все этапы сбыта и снабжения предприятия и контролировать весь процесс товародвижения. Здесь и далее как пример будем рассматривать сбытовую цепочку общего вида, представленную на рис. 2. В эту цепочку может входить различное количество организаций. В разных отраслях производства конкретные цепочки могут отличаться, не все звенья здесь обязательны, но в целом движение имеет вид, представленный на рисунке ниже.

Также нельзя не упомянуть и альтернативу системам SCM – системы ERP (enterprise resource planning, или система планирования ресурсов предприятия). Это более широкая система, чем система управления цепочками поставок, но среди прочего она управляет и материальными потоками. Здесь стоит отметить, что системы планирования ресурсов не занимаются автоматизацией и оптимизацией цепочек движения и этим уступают системам управления цепочками поставок. Это заставило основных производителей ERP-систем, таких как SAP, Oracle и JD Edwards, разработать собственные решения для управления движением материалов.

Применение на предприятии систем управления цепочками поставок имеет следующие преимущества:

- оптимизация нагрузки: улучшение координации движения материалов и доступных транспортных мощностей снижает время простоя;

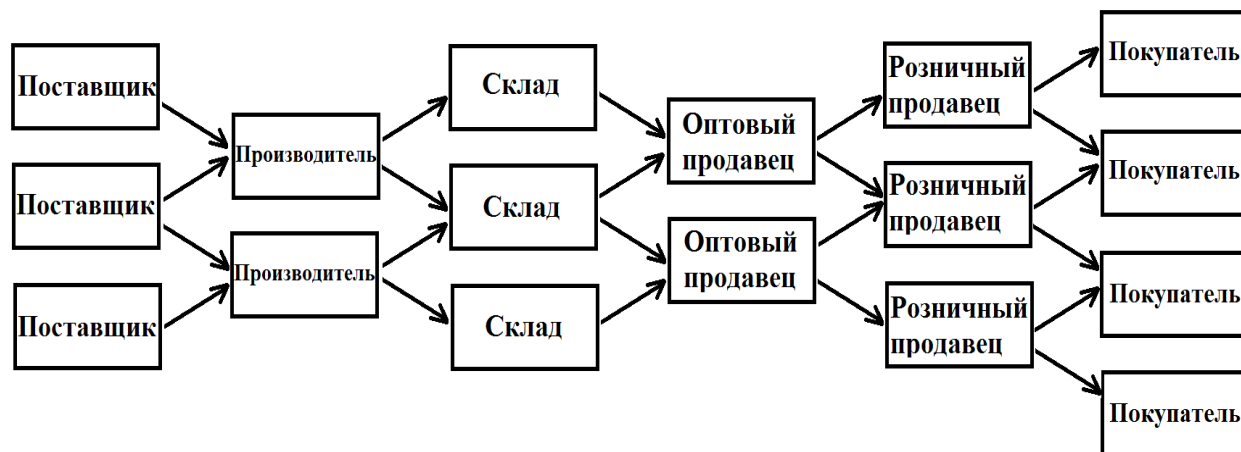


Рис. 2. Общий вид цепочек поставок

- снижение длины транспортного цикла: принимая во внимания ограничения и альтернативные пути движения материалов, можно укоротить транспортный цикл;

- оптимизация закупок материалов: отслеживание потребностей в сырье и остатков на складах позволяет уменьшить время хранения и количество запасов сверх необходимого минимума;

- уменьшение парка транспорта: снижение времени простоя транспорта позволяет не содержать лишних единиц;

- глубокий анализ перевозок позволяет предсказывать нарушения в системе перевозок и предотвращать их.

Система управления цепочками поставок принимает решения, основываясь на информационной модели предприятия. Этот факт ограничивает применимость таких систем: данные о предприятии и его перевозках должны быть исчерпывающими. Ниже в таблице приведен список таких требований.

В настоящее время разработчики SCM-систем подошли вплотную к созданию симуляции транспортных потоков предприятия и планированию движения продукции в реальном времени. Но для осуществления этой задачи необходимо иметь:

- возможность общаться с полной исторической базой знаний о предприятии;

- вычислительные мощности и программные компоненты, способные обрабатывать данные за очень короткий промежуток времени, чтобы обеспечить взаимодействие хотя бы в режиме псевдореального времени;

- возможность взаимодействия с управляющей системой для назначения заданий и получения обратной связи по статусу и ходу работы системы.

Требования к информации о логистической системе предприятия

Область	Требуемые данные
Информация о процессе производства	Данные о производстве (длительность процесса, продолжительность простоев, время, требуемое для настройки, количество задействованных аппаратов в каждом процессе, альтернативные пути)
Информация о правилах контроля инвентаря	Количество резервных материалов, точки перераспределения, количество готовой продукции, сырья и промежуточных изделий, остатки материалов и готовой продукции на производстве
Информация о снабжении и логистике	Задержки поставок, размеры и объёмы партий, расписание поставок
Информация о потребностях	Крайние сроки, приоритеты, структура потребностей
Информация о стратегии	Данные о контроле заказов, правила отправки

Для оптимизации грузоперевозок системы управления цепочками пользуются математическим аппаратом линейного программирования и исследования операций. В частности, задача распределения материалов со складов потребителям является транспортной задачей.

Транспортная задача является типичной задачей линейного программирования. Требуется составить план товародвижения на предприятии таким образом, чтобы общая стоимость перевозок была минимальной.

Возьмём следующие исходные данные:

a_i – количество единиц товара в i -м пункте отправления,

b_j – потребность в продукции в j -м пункте назначения,

c_{ij} – стоимость перевозки единицы товара из i -го пункта в j -й;

Обозначим через x_{ij} планируемое количество единиц товара для перевозки из i -го пункта в j -й.

Очевидно, что для простейшего случая должны выполняться следующие условия:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n x_{ij} &= a_i, \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} &= b_j, \\ \sum_{i=1}^m a_i &= \sum_{j=1}^n b_j. \end{aligned}$$

Таким образом, математическая запись транспортной задачи для сбыта в модели товародвижения будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ \text{при: } \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \\ x_{ij} \geq 0 (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}). \end{cases} \quad (1)$$

Выражение (1) носит название замкнутой транспортной модели.

Равенство $\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j$ является естественным условием разрешимости замкнутой транспортной задачи.

В случае, когда должен быть вывезен не весь товар, накопленный в i -м пункте, а,

например, его часть подлежит реализации или потреблению на месте, существует более общая постановка транспортной задачи – открытая транспортная задача.

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ \text{при: } \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \\ \sum_{i=1}^m a_i > \sum_{j=1}^n b_j \\ x_{ij} \geq 0 (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}). \end{cases} \quad (2)$$

Решение выражений (1) или (2) подразумевает существование любых произвольных промежуточных пунктов, в которые доставляются грузы. Однако часто перед крупными промышленными компаниями встает проблема создания мест для хранения продукции территориально удаленных на сотни и тысячи километров от основного предприятия. В этом случае необходимо решить вопрос, где создавать склады и какой емкости. Чем больше строится складов, тем быстрее обеспечивается доставка продукции к местам потребления, при укрупнении складов возрастают издержки по доставке товаров потребителям. Решение о числе пунктов хранения принимается при сравнении единовременных затрат по созданию мест хранения и годовых издержек, связанных с доставкой потребителям.

Для выбора пунктов размещения складов можно воспользоваться следующей формулой:

$$ПЗ = K \cdot НК + ИС + Им \rightarrow \min,$$

где ПЗ – суммарные приведенные затраты по каждому рассматриваемому варианту сооружения складов;

K – капитальные вложения на возведение объектов хранения;

$НК$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

$ИС, Им$ – годовые издержки, связанные с содержанием складских помещений и доставкой продукции со складов потребителям.

Производя расчет для каждого варианта размещения склада, можно выбрать наиболее эффективный из них. Проблема организации оптимального складского хозяйства более полно рассмотрена в статье [2].

Большую роль в минимизации затрат по товародвижению играет правильный выбор каналов распределения. Реализация продукции в большинстве случаев проводится через ряд компаний-посредников, каждая из которых

формирует соответствующий канал распределения. С помощью посредников можно сократить количество контактов производителей непосредственно с потребителями продукции и увеличить доступность товара и доведения его до целевых рынков.

Каналы распределения существуют трех видов: прямые, косвенные, смешанные.

Прямые каналы связаны с движением товаров и услуг без участия посреднических организаций.

Косвенные каналы связаны с перемещением товаров и услуг сначала от изготовителя к некоторому частному посреднику, а затем от него – к потребителю.

Смешанные каналы совмещают черты первых двух каналов товародвижения.

На рис. 3 приведены маркетинговые каналы распределения по их протяженности.

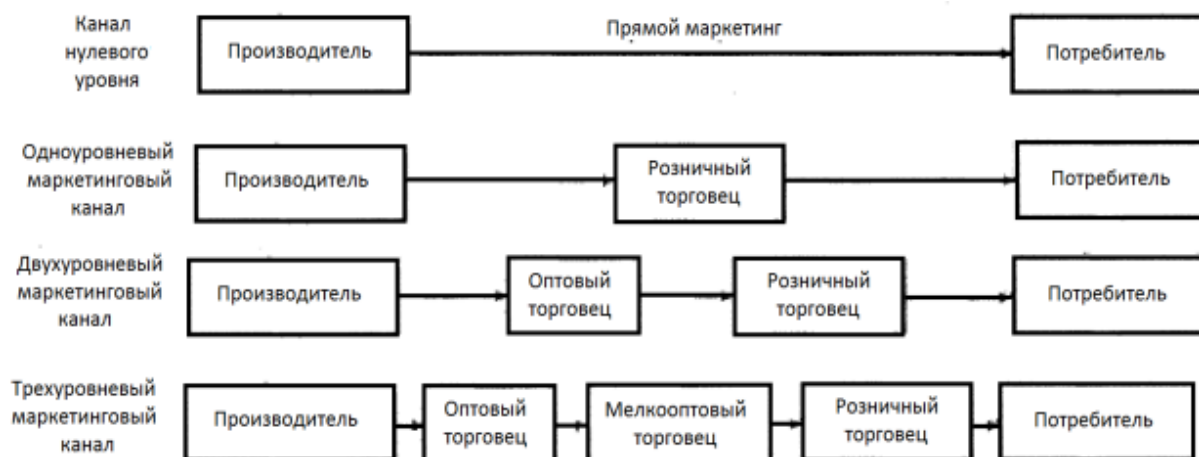


Рис. 3. Примеры маркетинговых каналов распределения

Использование современных технологий управления предприятием и товародвижением, интеллектуальное размещение складов и ведение хозяйственной деятельности позволяют не только снизить затраты на продвижение товара к потребителю, но и за счет гибкости конечной цены увеличить сбыт продукции, тем самым обеспечив бесперебойную работу основного производства и тем самым повысить прибыльность фирмы. Грамотный выбор сбытовой стратегии предприятия гарантирует успех на рынке.

Литература

1. Данилов, А.Д. Иерархическая структура организации транспортной логистики крупного промышленного

холдинга [Текст] / А.Д. Данилов, Д.В. Тонких // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, № 6-2. - С. 50-54.

2. Данилов, А.Д. Синтез многофазной ациклической модели системы товародвижения промышленного холдинга [Текст] / А.Д. Данилов, Д.В. Тонких // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10, №5. - С.20-24.

3. Данилов, А.Д. Моделирование и управление в системе маркетинга промышленных предприятий / А.Д. Данилов. - Воронеж, 2003.

4. Данилов, А.Д. Декомпозиционная модель проектирования системы управления процессами транспортной логистики [Текст] / А.Д. Данилов, Д.В. Тонких // Моделирование систем и процессов. - 2013. - № 4. - С. 26-30.

Воронежский государственный технический университет

ORGANIZATION OF INFORMATION SUPPORT FOR INDUSTRIAL HOLDING'S DISTRIBUTION SYSTEM

D.V. Tonkikh, A.D. Danilov

The article overlooks modern information support for sales system of an industrial enterprise and gives exemplary mathematical model of a sales system

Key words: logistics, transportation, material flow, freight

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕК OPENGL И TAOFRAMEWORK

М.Н. Аралов, А.В. Барабанов, Н.И. Гребенникова

Разработан и реализован в программном коде алгоритм визуализации тепловой модели полупроводникового кристалла

Ключевые слова: визуализация, тепловое поле, термограмма, OpenGL, TaoFramework

Введение. В современных условиях производства математическое моделирование играет очень важную роль, выступая в качестве средства оптимизации и прогнозирования. Моделирование тепловых полей является, в частности, одной из наиболее актуальных проблем при проектировании электронных компонентов [1]. Визуализация тепловых полей, т.е. получение термограммы, представляет собой заключительную часть моделирования тепловых процессов. Другими словами, при создании специальных средств расчета тепловых параметров и моделирования тепловых процессов, разработчик столкнется с задачей визуализации тепловых полей.

В данной статье описан алгоритм визуализации температурной модели полупроводникового кристалла, реализованный на языке программирования C#. При разработке данного алгоритма была использована открытая графическая библиотека OpenGL. Разработанный программный модуль может являться частью специального программного обеспечения для моделирования тепловых полей электронных компонентов.

Постановка задачи. При моделировании тепловых параметров электронных компонентов полупроводниковый кристалл можно считать плоским телом [2], поэтому при визуализации его теплового поля используется двумерная графика. В таком случае в роли визуализируемой модели должен выступать двумерный массив температур. Задача разрабатываемого программного компонента сводится к отображению на экране исходного массива в виде термограммы.

О библиотеках OpenGL и TaoFramework. Как известно, OpenGL расшифровывается как OpenGraphicsLibrary, что в переводе на русский язык означает «открытая графическая библиотека». Другими словами, OpenGL - это некая спецификация, включающая в себя несколько сотен функций. Она определяет независимый от языка программирования кросс-платформенный программный интерфейс, с помощью которого программист может создавать приложения, использующие двухмерную и трехмерную компьютерную графику. Первая базовая версия OpenGL появилась в 1992 году, она была разработана компанией SiliconGraphicsInc., занима-

ющейся разработками в области трехмерной компьютерной графики. В современном мире библиотеки OpenGL и DirectX являются конкурентами на платформе MS Windows[3].

TaoFramework – это свободно-распространяемая библиотека с открытым исходным кодом, предназначенная для быстрой и удобной разработки кросс-платформенного мультимедийного программного обеспечения в среде .NET Framework и Mono. На сегодняшний день, TaoFramework - это лучший путь для использования библиотеки OpenGL при разработке в среде .NET на языке C# [3].

Структура программного компонента. Разработанный программный компонент состоит из четырех основных частей – файла с исходным массивом, пользовательского интерфейса, модуля визуализации и модуля расчета цвета (рис. 1).

Исходный массив – это матрица температур моделируемого кристалла, рассчитанная при помощи специальных программных средств и хранящаяся в отдельном файле. О методах расчета этой матрицы на основе программной модели устройства упоминается в [4] и [5].

Модуль пользовательского интерфейса отображает исходный массив как в виде текста, так и в виде термограммы. В этом модуле предусмотрены функции выбора файла с исходным массивом и сохранения термограммы в графическом формате.

В модуле визуализации происходят инициализация компонентов библиотеки OpenGL и отображение исходного массива в графическом виде. Этот модуль считывает содержимое ячейки исходного массива и передает это значение в модуль расчета цвета, а в ответ получает RGB-параметры цвета, соответствующего температуре данной ячейки. На основе цветовых параметров каждой ячейки строится цветовой градиент, который и является термограммой.

Модуль расчета цвета определяет RGB-составляющие цвета, которые соответствуют входному параметру температуры. Верхняя и нижняя границы температуры определяют интервал, на котором будет происходить визуализация. Температуре, выходящей за нижнюю границу, соответствует черный цвет. Температуре, выходящей за верхнюю границу, соответствует белый цвет. Внутри интервала цветовой градиент меняется по возрастанию температуры в такой последовательности: черный, синий, фиолетовый, красный, оранжевый, желтый, белый.

Аралов Михаил Николаевич – ВГТУ, аспирант, тел. (473) 2437718

Барабанов Александр Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. (473) 2437718

Гребенникова Наталия Ивановна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. (473) 2437718

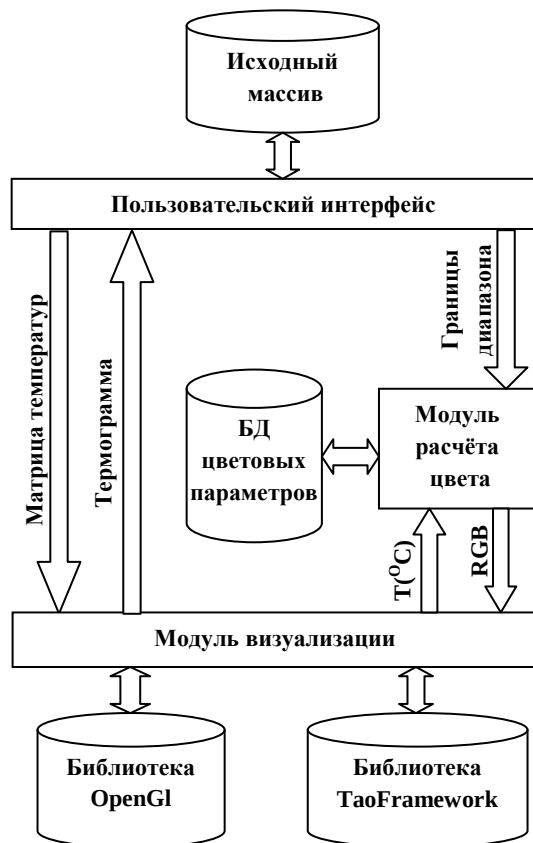


Рис. 1. Структура программного компонента

Инициализация графических компонентов.

Для работы используются пространства имен Tao.OpenGl, Tao.FreeGlut и Tao.Platform.Windows. Вывод графического изображения осуществлен через элемент simpleOpenGlControl пространства имен Tao.Platform.Windows. Экземпляр этого элемента имеет имя AnT.

Далее приведен фрагмент кода программы, выполняющий инициализацию OpenGL в C#.

```
// инициализация Glut
Glut.glutInit();
Glut.glutInitDisplayMode(Glut.GLUT_RGB
                          | Glut.GLUT_DEPTH);
// очистка окна
Gl.glClearColor(255, 255, 255, 1);
// установка порта вывода в соответствии
// с размерами элемента anT
Gl.glViewport(0, 0, AnT.Width, AnT.Height);
// настройка проекции
Gl.glMatrixMode(Gl.GL_PROJECTION);
Gl.glLoadIdentity();
// настройка 2D ортогональной проекции в
// соответствии с размерами отображаемой матрицы
Glu.gluOrtho2D(1, MatrT.getLength(1), 1,
               MatrT.getLength(0));
// установка объектно-видовой матрицы и очистка
Gl.glMatrixMode(Gl.GL_MODELVIEW);
Gl.glLoadIdentity();
```

Расчет цвета ячейки. При визуализации теплового поля, каждому значению температуры ставится в соответствие свой цвет. Ниже представлен метод, отвечающий за расчет RGB-параметров цвета ячейки с заданной температурой.

```
private void TempToRGB (double T)
{
    double Colour_lim = (Tmax-Tmin)/6;
    double Tblue = Tmin + Colour_lim;
    double Tviolet = Tmin + Colour_lim*2;
    double Tred = Tmin + Colour_lim*3;
    double Torange = Tmin + Colour_lim*4;
    double Tyellow = Tmin + Colour_lim*5;
    double t = ((T - Tmin) % Colour_lim) / Colour_lim;
    double R = 0, G = 0, B = 0;
    R = (T <= Tblue) ? 0 :
        (T > Tviolet) ? 1 :
        t;
    G = (T <= Tred) ? 0 :
        (T > Tyellow) ? 1 :
        (T < Torange) ? t / 2 :
        0.5 + t / 2;
    B = (T <= Tmin) ? 0 :
        (T >= Tmin && T < Tblue) ? t :
        (T >= Tblue && T < Tviolet) ? 1 :
        (T >= Tviolet && T < red) ? 1 - t :
        (T >= Tred && T < yellow) ? 0 :
        (T >= Tyellow && T < Tmax) ? t :
        1;
    Gl.glColor3d(R, G, B);
}
```

T – температура отображаемого элемента; Tmin и Tmax – границы диапазона отображаемых температур; R,G,B – составляющие спектра.

Визуализация матрицы температур. Ниже представлен код метода визуализации матрицы температур.

```
private void out_PpenGL()
{
    Gl.glClear(Gl.GL_COLOR_BUFFER_BIT);
    Int m = MatrT.getLength(0);
    int n = MatrT.getLength(1);
    for (inti = 0; i < m - 1; i++)
    {
        for (int j = 0; j < n - 1; j++)
        {
            Gl.glBegin(Gl.GL_QUADS);
            TempToRGB(Matrt[i, j]);
            Gl.glVertex2d(j + 1, m - i);
            TempToRGB(Matrt[i + 1, j]);
            Gl.glVertex2d(j + 1, m - i - 1);
            TempToRGB(Matrt[i + 1, j + 1]);
            Gl.glVertex2d(j + 2, m - i - 1);
            TempToRGB(Matrt[i, j + 1]);
            Gl.glVertex2d(j + 2, m - i);
            Gl.glEnd();
        }
    }
    Gl.glFlush();
    AnT.Invalidate();
}
```

MatrT – отображаемая матрица температур. Компонент AnT – это экземпляр элемента simpleOpenGLControl пространства имен Tao.Platform.Windows. Описанный метод вызывается по событию, связанному с таймером. Таким образом, изображение на экране обновляется постоянно, что позволяет быстрее подобрать оптимальные значения граничных температур.

Результаты работы. Ниже приведены результаты визуализации тепловой модели раннего прототипа микроконтроллера 1887BE4У при различных граничных условиях. Четыре яркие точки в верхнем правом углу изображений – области перегрева.



Рис. 2. Термограмма с интервалом температур T (10.1°C ; 12.3°C)

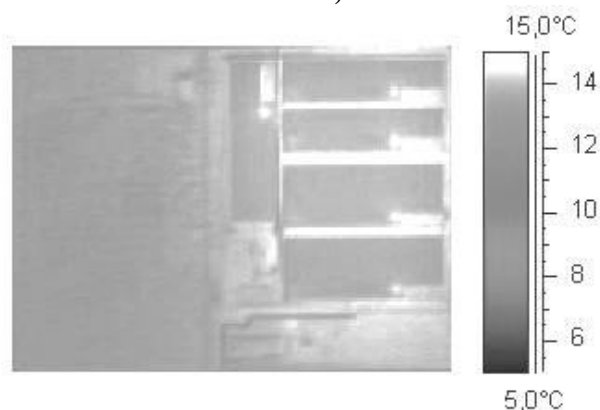


Рис. 3. Термограмма с интервалом температур T (5°C ; 15°C)

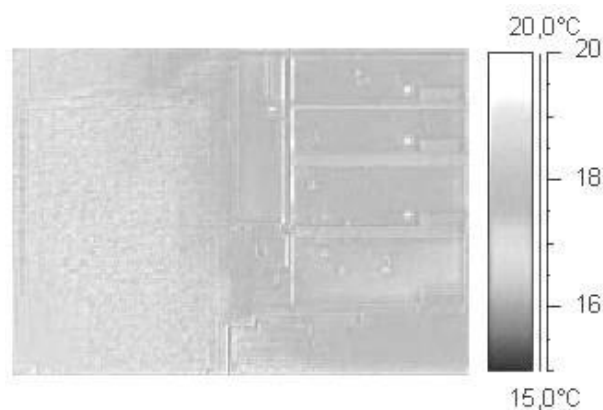


Рис. 4. Термограмма с интервалом температур T (15°C ; 20°C)

Литература

1. Барабанов, В.Ф. Математические методы моделирования тепловых полей в трехмерной сборке интегральных схем [Текст] / В.Ф. Барабанов, М.Н. Аралов, Н.И. Гребенникова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, № 6-3. - С. 55-57.
2. Брагин, Д.М. Математическое моделирование процесса размещения разногабаритных элементов на монтажном пространстве с учетом тепловых полей [Текст] / Д.М. Брагин, В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2007. - Т. 3, № 5. - С. 76–80.
3. Уроки OpenGL. Программирование 3D графики. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://esate.ru>
4. Методы и алгоритмы моделирования тепловых полей в трехмерной сборке интегральных схем [Текст] / В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный, А.В. Ачкасов, М.Н. Аралов // Радиотехника. - 2014. - №6 – С. 82-87.
5. Барабанов, В.Ф. Структура программной модели цифрового устройства [Текст] / В.Ф. Барабанов, М.Н. Аралов // Информационные технологии моделирования и управления. - 2013. - № 6 (84). - С. 583-589.
6. Барабанов В.Ф. Интерактивные средства моделирования сложных технологических процессов [Текст] / В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный. -Воронеж, 2000.
7. Брагин, Д.М. Интегрированный программный комплекс моделирования и проектирования электронных средств с учетом тепловых полей [Текст] / Д.М.Брагин, В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный // Системы управления и информационные технологии. - 2007. - Т. 29. - № 3. - С.63-66.

Воронежский государственный технический университет

VISUALIZATION OF THERMAL FIELDS WITH USE OF OPENGL AND TAO FRAMEWORK LIBRARIES

M.N. Aralov, A.V. Barabanov, N.I. Grebennikova

The drawing algorithm of thermal model of a semiconductor crystal is developed and realized in a program code

Key words: visualization, thermal field, thermogram, OpenGL, Tao Framework

ФОРМИРОВАНИЕ ЭКСПЕРТНОГО ВЫВОДА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ СВИДЕТЕЛЬСТВ**Е.А. Ганцева, В.А. Каладзе, А.М. Поляков**

В процедурах получения обобщённого экспертного вывода используются методы теории случайных множеств или теории свидетельств, называемой также по имени её авторов – теории Демпстера-Шефера, основанные на специальных функциях доверия, правдоподобия и правил объединения функций доверия, сформулированных для свидетельств, полученных из разных информационных источников

Ключевые слова: теория свидетельств, экспертный вывод, доверие, правдоподобие

Проблема управления персоналом в нашей стране по большей части является предметом научных и прикладных изысканий гуманитарных наук, таких как философия, социология, психология, педагогика. Математические методы исследований в сфере управления персоналом пока что не заняли достойного места: серьёзно ими занимается сравнительно небольшой круг отечественных учёных. Однако и в зарубежной литературе в этом направлении использованию современных математических методов исследования не уделяется должного внимания. По своей важности и ответственности управление персоналом должно занимать одно из центральных мест в управлении организацией, кадровыми ресурсами, основной составляющей в котором является процедура отбора кадрового состава.

В работе на основе математической теории свидетельств Демпстера-Шефера (ТСДШ) предложено решение задачи получения результирующего заключения путём объединения экспертных высказываний, полученных из разных источников и, вообще говоря, с разной информационной ценностью. При этом полученное решение должно быть сбалансированным и достоверным в рамках поставленной проблемы.

Реальные социально-профессиональные характеристики (СПХ) исследуемого конкурсанта как объекта исследования принадлежат к разным классам с достаточно точно очерченными границами, в которых представлены свойства каждого конкретно-го испытуемого.

Пусть, например, предложены два высказывания по одной характеристике СПХ, которая определяется тремя специфическими аксиомами γ_1 , γ_2 и γ_3 , отражающими особенности экспертного вывода, из стандартного [1] множества Г. В ТСДШ эти аксиомы называются гипотезами, и этой терминологии в данной работе будем придерживаться. В этих высказываниях необходимо различить присутствие или отсутствие этих гипотез, а также выделить и согласовать общую полезную информацию, которая

может способствовать установлению на их основе достоверной результирующей оценки [2].

Однако результаты тестирования, экспертизы, анкетирования, изучения в фокус-группах и т.п. не дают точного описания СПХ, поскольку представлены в субъективной реализации и достаточно размытыми формулировками в виде высказываний. Поэтому результаты таких освидетельствований могут быть схожими, противоречивыми, а чаще всего имеют близкие описательные формы [3]. Для различения в таких аморфных высказываниях искомым СПХ объектов исследования необходимо учитывать связь с оценками СПХ шаблонного состава описательных характеристик освидетельствования объектов [3], оценки которых будем рассматривать как исходные гипотезы исследования, выраженные в форме высказываний профессиональных аналитиков заинтересованной организации.

Для формирования обоснованного мнения по исследуемой проблеме на множестве высказываний (логических рассуждений) экспертов использована математическая теория свидетельств Демпстера-Шефера. Данный подход позволяет в структурированном пространстве гипотез при наличии информационной неопределённости получить достоверную оценку результирующего мнения коллектива экспертов с обоснованным уровнем уверенности. С этой целью формируется функция доверия, позволяющая скомбинировать сложное высказывание из частных высказываний экспертов как собственных подмножеств, относительно их базовых мер. Далее по мере накопления новых свидетельств применяется специализированный аппарат оперативного обновления доверительного множества высказываний.

Методы теории Демпстера-Шефера, опирающиеся на интервальное представление оценок, являются альтернативой интуитивным способам обработки неопределённых данных, поскольку имеют математическое обоснование, построенное на круге аксиом, в отличие от эвристических методов, использующих, например, эмпирические коэффициенты неопределённости.

Для корректного использования методов ТСДШ в области экспертного оценивания воспользуемся основными допущениями и выводами этой теории.

Рассматривая гипотезы как элементарные случайные события, положим, что они составляют пол-

Ганцева Екатерина Александровна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: caladze@yandex.ru
Каладзе Владимир Александрович – МИКТ, д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, e-mail: wakaladze@yandex.ru
Поляков Александр Михайлович – ВИБТ, аспирант, e-mail: ms.d0c2012@yandex.ru

ную группу, т.е. сами исходные свидетельства – гипотезы $\gamma_j \in \Gamma$ (с присвоенными им обобщенными, базовыми вероятностями) являются взаимно исключающими, а их набор Γ – исчерпывающим, обеспечивающим полноту. Высказанные требования в каждом конкретном случае гарантируют достоверность лишь одной гипотезы из шаблонного состава СПХ [3].

Вероятности гипотез как возможных исходов некоторого сложного события (рассматриваемого высказывания) присваиваются в зависимости от информации, определяющей один из исходов более вероятным по отношению к другим. При этом понятие вероятности здесь следует рассматривать как обобщение классического понятия вероятности, определенное не на самом Γ , а на его булеане.

Полагается также, что возможно выработать способ формирования свидетельств не только в пользу каждой гипотезы γ_j , но и в пользу любых высказываний как подмножеств $A_i \subseteq B$, построенных на универсальном множестве гипотез, которые могут быть сформированы на основе объединения гипотез. Здесь B – булеан на множестве Γ . Мощности $m_i \in M$ подмножеств A_i как меры высказываний нормированы на B и формируют свидетельства в пользу соответствующих высказываний. Таким образом, свидетельство по каждому высказыванию определяется однозначно и независимо относительно свидетельств по другим высказываниям.

Поскольку каждая мера является элементом множества M , то построение соответствия между M и B позволяет связать элементы из M с подмножествами пространства B . Определяя каждое такое подмножество как единственный элемент фокального множества $A_i \in A$ [4], устанавливаем тем самым однозначное отображение элементов множества M на элементы множества A .

Выдвинутое предположение об исчерпывающей полноте множества гипотез Γ означает, что ни один из элементов $m_i \in M$ не отображается на пустое множество, т.е. для каждого свидетельства существует хотя бы одна гипотеза или высказывание, достоверность которого подтверждает данное свидетельство.

Для каждого фокального элемента $A_i \in A$ как подмножества булеана ($A_i \subseteq B$) могут быть определены верхняя и нижняя границы его интервала возможностей [5]. Оценка вероятности фокального элемента A_i будет ограничена снизу оценкой доверия к A_i , а сверху – оценкой правдоподобия A_i , поэтому расчётную информацию о точечной оценке меры данного подмножества удобно рассматривать в интервальной форме в виде доверительного интервала $[bel(A_i), pls(A_i)]$. Этот интервал содержит точную величину вероятности рассматриваемого подмножества (в классическом смысле) и ограничен двумя интегральными (аддитивными в дискретном случае) мерами, определяемыми как доверие и правдоподобие

$$bel(A_i) \leq P(A_i) \leq pls(A_i). \quad (1)$$

Величина этого интервала определяет погрешность оценки вероятности подмножества и может служить оценкой неуверенности в справедливости свидетельств по A_i из исходного множества гипотез.

Функция доверия в ТСДШ – это также функция (в англоязычной литературе) присвоения базовых вероятностей (basic probability assignment). Суммарное доверие bel для любого фокального элемента A_i определяет суммарный уровень уверенности к нему и может быть найдено суммированием значений m по всем подмножествам в A_i .

Доверие (belief) $bel(A_i)$ к множеству A_i определяется [5] как сумма всех мер его собственных подмножеств A_{ij}

$$bel(A_i) = \sum_j m(A_{ij}). \quad (2)$$

$Bel(B)$ всегда равно 1 независимо от значений мер его множеств, что непосредственно вытекает из правила присвоения базовых вероятностей. Значения bel и m равны, если множество не содержит собственных подмножеств.

В ТСДШ изменение уровня доверия к подмножеству высказываний A_i не приводит к изменению доверия к остальным гипотезам, поскольку $bel(A_i) + bel(\bar{A}_i) \leq 1$. Остаток после суммирования уровней доверия A_i и к $\bar{A}_i$ – это уровень игнорирования гипотезы A_i .

Правдоподобие (plausibility) $pls(A_i)$ – это сумма мер всех множеств $A_k \subseteq B$, пересекающихся со множеством A_i ($A_i \cap A_k \neq \emptyset$)

$$pls(A_i) = \sum_k m(A_k). \quad (3)$$

Оценка правдоподобия $pls(A_i)$ представляет возможность совместности свидетельства с гипотезами в A_i . Значение оценки $pls(A_i)$ можно рассматривать как предел, до которого можно повышать доверие к гипотезам из A_i при известных свидетельствах в пользу гипотез-конкурентов.

Эти обе меры связаны между собой

$$pls(A_i) = 1 - bel(\bar{A}_i). \quad (4)$$

Поскольку определенная таким образом оценка правдоподобия A_i есть не что иное, как мера нашего недоверия к $\bar{A}_i$. По любой из этих характеристик можно вычислить две другие.

Для объединения нескольких высказываний из разных информационных источников, отличающихся уровнем достоверности, используется комбинационное правило Демпстера [6]. Объединение, рассматриваемое как присоединённая мера $m_{1,2}$, вычисляется при двух источниках информации для соответствующей пары мер $m_1 \in M_1$ и $m_2 \in M_2$ следующим образом

$$m_{1,2}(\emptyset) = 0, \\ m_{1,2}(A_i) = \frac{1}{1 - K} \sum_{C \cap D \subseteq A_i, C \cap D \neq \emptyset} m_1(C) m_2(D), \quad (5)$$

где

$$K = \sum_{E \cap F = \emptyset} m_1(E) m_2(F). \quad (6)$$

Выражения (5) - (6) легко распространяются на произвольное число источников.

Следует учитывать, что значения m_1 и m_2 сформированы по независимым источникам свидетельств в пределах того же пространства гипотез.

K определяет меру конфликта между двумя наборами мер. Нормализующий множитель, $1 - K$, позволяет полностью нивелировать [7] несоответствия информационных источников и предотвратить в случае конфликта отображения меры на пустое множество.

Завершающим этапом процедуры является проведение действий, направленных на выявление высказываний, наиболее хорошо отвечающих цели основной задачи. Для этого в качестве критерия используем принцип максимального правдоподобия [8]:

$$\max_t [pls(A_t)], \quad (7)$$

где A_t – t -е сложное высказывание, полученное после объединения исходных высказываний с помощью комбинаторного правила Демпстера.

Прикладная реализация ТСДШ в задаче управления кадрами предприятия, в которой заложена большая доля субъективного подхода, приводит порой к пересмотру самой постановки [9].

Задача управления процедурой отбора кадрового состава предприятия актуальна как с точки зрения выбора подходов, используемых при проведении экспертизы, так и с точки зрения методов, используемых при обработке её результатов. Про-

фессиональные качества – это в большей степени субъективное понятие. В связи с этим одной из сложностей, возникающих на этапе отбора кандидата на вакантную должность, является определение относительной ценности этих качеств. В этой связи рабочей группе экспертов при отборе персонала сложно прийти к единому решению. Для решения этой задачи были предложены [2] процедуры построения композиционной модели, включающие в себя такие инструменты, как экспертные системы, теория Демпстера-Шефера, нечёткая логика, семантические сети, а применение нейронных сетей позволит производить оценку данных на основе ранних прецедентов [10]. В данном случае рассмотрим использование теории свидетельств Демпстера-Шефера для решения наиболее спорных моментов, возникающих у экспертов при экспертизе кадрового состава. Внедрение данного подхода возможно, как на этапе предварительного отбора рекрутов, так и при оценке профессиональных качеств сотрудников. На этапе формирования исходных данных по оцениванию компетенций респондентов необходимо учитывать, что набор компетенций подбирается для каждой должности отдельно. Важно учитывать ранее уже отмечавшуюся субъективность подходов, существующее у каждого сотрудника по работе с персоналом своё понятийное представление по каждому из профессиональных качеств. Чтобы снизить влияние такой субъективности в оценке данных показателей предлагается использовать численную оценку данных качеств.

Таблица 1

Профессиональные качества рекрута

Балльные оценки	Профессиональные навыки	Умение работать в команде	Аналитические способности	Адаптация к новым условиям	Внимательность	Ответственность	Коммуникабельность	Организаторские способности	Стрессоустойчивость	Способность к рутине	Работа в ночное время	Ценность
Профессиональные навыки		3	2	1	3	3	2	2	1	2	3	22
Умение работать в команде	3		2	1	2	3	3	3	3	2	1	23
Аналитические способности	2	2		2	1	2	2	1	2	3	2	19
Адаптация к новым условиям	1	2	2		3	2	2	2	3	1	3	21
Внимательность	3	2	1	1		3	2	1	1	3	3	20
Ответственность	3	3	3	1	3		2	3	1	3	3	25
Коммуникабельность	2	2	1	1	2	2		1	1	1	2	15
Организаторские способности	1	2	2	3	3	1	3		3	3	1	22
Стрессоустойчивость	1	3	2	3	1	1	1	3		2	2	19
Способность к рутине	2	2	3	1	3	3	1	3	2		1	21
Работа в ночное время	3	1	2	3	3	3	2	1	2	1		21

Рекрут, не обладающий совокупностью указанных профессиональных качеств, мало пригоден для работы в банке. Совокупность профессиональных качеств является основной частью стандартов экспертизы. Представленный набор профессионально важных свойств сотрудников является основой для формирования множества гипотез в используемой ТСДШ.

Применение теории свидетельств позволяет отказаться от используемой в настоящее время сложной и малопродуктивной оценки профессиональных качеств экспертов, которая сводится к следующему. Создаётся экспертная группа из n независимых экспертов, которые производят оценку ситуации в условиях неопределённости в форме набора высказываний $A_i, i=1, \dots, n$, представленного на множестве возможных альтернатив по оценке количеств рекрутов. Для определения качества полученных высказываний проводится предварительная оценка компетентности самих экспертов.

Таблица 2
Весовые коэффициенты компетентности экспертов

Экс-перт 1	Экс-перт 2	Экс-перт 3	Экс-перт 4	Экс-перт 5
0,9	0,5	0,7	0,7	0,7

Каждый этап экспертизы предполагается независимым в ходе всей процедуры. За коллективную оценку A принимается общая часть всех экспертных оценок как пересечение множеств A_i . Недостатком такого подхода является возможность получения коллективной оценки в виде пустого множества. Для выхода из данной ситуации за коллективную оценку рекрута обычно принимается индивидуальная оценка наиболее компетентного эксперта, что не является корректным решением проблемы.

Результирующая информация, получаемая от группы экспертов, может быть представлена в виде:

- числовых оценок,
- лингвистических величин.

Экспертные оценки лежат в расчётных интервалах и для разрешения такой ситуации обычно применяются данные типа табл. 3, в которой уже проставлены весовые коэффициенты каждого оцениваемого качества рекрута.

По числовым значениям проводится оценка статистическими методами, что нельзя сказать о лингвистических величинах.

В этом случае для обработки данных применяются методы принятия решений в условиях неопределённости, такие как методы Вальда, Севиджа, Гурвица и т.п.

Таблица 3

Шкала экспертных оценок

Оценка	Характеристика	Коэффициент
Новичок (первая работа)	Плохо представляет себе основные цели и задачи, которые необходимо будет выполнять в рамках будущих компетенций	0,0 - 0,3
Не первый опыт работы, но первый опыт в рамках новых компетенций	Имеет представление об основных целях и задачах, которые будут в рамках будущей компетенции	0,4 - 0,6
Не первый опыт работы в рамках данной компетенции	Имеет чёткое и устоявшееся представление об основных целях и задачах, которые будут в рамках будущей компетенции	0,7 - 0,9

В более продвинутых случаях применяются нечёткие (fuzzy) методы с манипуляциями над функциями принадлежности.

Однако оценки экспертной группы часто сложно совместить с подобными методиками, поскольку на оценки экспертов могут влиять как их внутренние проблемы, так и необходимость жестких компромиссов из-за сложившихся отношений внутри экспертной группы. Кроме того, результаты экспертизы могут поступать не только от экспертной группы, но и из анкетирования, тестов и т.п.

В разрешении такого рода ситуаций оказывается наиболее целесообразным применение математической теории Демпстера-Шефера, которая оказывается эффективной в случае неоднородности информации, неопределённости и недостатка исходных данных.

Рассмотрим следующий пример.

Таблица 4

	Случайные множества	Присвоенные базовые меры	Доверие	Правдоподобие
	Пустое	0	0	0
Исходные гипотезы $G = \emptyset \cup \gamma_1 \cup \gamma_2 \cup \gamma_3$	γ_1	0.17	0.17	0.37
	γ_2	0.26	0.26	0.47
	γ_3	0.32	0.32	0.54
Сложные высказывания	$\gamma_1 \cup \gamma_2$	0.03	0.46	0.68
	$\gamma_1 \cup \gamma_3$	0.04	0.53	0.74
	$\gamma_2 \cup \gamma_3$	0.05	0.63	0.83
	Универсальное	0.13	1	1

Выбор способа представления является определяющим для организации структуры любого приложения. Наиболее эффективным в рассматриваемой ситуации является представление знаний в интеллектуальных системах, в частности в экспертных системах [2]. А использование искусственных нейронных сетей позволит производить оценку профессиональных качеств по ранним прецедентам.

Литература

1. Поляков, А.М. Применение теории Демпстера-Шефера к системе построенной на нечетких отношениях [Текст] / А.М. Поляков // Информатика: проблемы, методология, технологии: сб. тр. XIV междунар. конф. – Воронеж, 2014. – С. 243-244.
2. Ганцева, Е.А. Интеллектуальный критерий качества математических моделей сложных систем: идеология, перспективы разработки [Текст] / Е.А. Ганцева, В.А. Каладзе, А.М. Поляков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9, № 5.1. – С. 52-56.
3. Поляков, А.М. Экспертное оценивание компетенций при отборе персонала [Текст] / А.М. Поляков // Информатика: проблемы, методология, технологии: сб. тр. XIV междунар. конф. – Воронеж, 2013. – С. 156.
4. Smets P. The application of the matrix calculus to belief functions [Text] / P. Smets // Int. Journal of Approximate Reasoning. – 2002. – Vol. 31. – P. 1–30.

5. Shafer, G. A Mathematical Theory of Evidence [Text] / G. Shafer– Princeton: Princeton University Press, 1976. – 297 p.

6. Dempster, A.P. A generalization of Bayesian inference [Text] / A.P. Dempster // Journal of the Royal Statistical Society. – 1968. – Vol. 30. – P. 205–247.

7. Jiang W. A New Method to Determine BPA in Evidence Theory [Text] / W. Jiang, Y. Deng, J. Peng // Journal of Computers. – 2011. – Vol. 6, № 6. – P. 1162–1167.

8. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники [Текст] / Б.Р. Левин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

9. Подвальный, С.Л. Многоальтернативность как основа обеспечения интеллектуальности систем управления [Текст] / С.Л. Подвальный, Т.М. Леденева // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 11. – С. 17-23.

10. Проблемы разработки интеллектуальных систем многоальтернативного моделирования [Текст] / С.Л. Подвальный, Т.М. Леденева, А.Д. Поваляев, Е.С. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 3.1, № 9. – С. 19-23.

11. Podval'ny, S.L. Intelligent modeling systems: Design principles / S.L. Podval'ny, T.M. Ledeneva // Automation and Remote Control. – 2013. – Vol. 74. – №7. – P.1201-1210.

12. Барабанов В.Ф. Основы автоматизации проектирования, тестирования и управления жизненным циклом изделия [Текст] / В.Ф. Барабанов, А.Д. Поваляев, С.Л. Подвальный, С.В. Тюрин. – Воронеж. 2011

Воронежский государственный технический университет
Международный институт компьютерных технологий (г. Воронеж)
Воронежский институт высоких технологий

SHAPING OF AN EXPERT CONCLUSION ON THE BASIS OF THE THEORY OF EVIDENCE

E.A. Gantseva, V.A. Kaladze, A.M. Poljakov

In procedures of deriving of the generalised expert conclusion methods of the theory of casual sets or the theory of evidence named also by name of its authors - theories Dempster-Shefer based on special functions of belief, a plausibility and the rules of association of functions of the belief formulated for testimonies received from different informational radiants are used

Key words: the theory of evidence, an expert conclusion, belief, plausibility

ОРГАНИЗАЦИЯ ИНТЕРФЕЙСА РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Е.С. Пашковская, М.Е. Пашковский, В.Ф. Барабанов

В предлагаемой работе сформированы структура распределенной системы оценки стойкости полупроводниковых изделий и соответствующая ей схема организации графического интерфейса программной системы

Ключевые слова: графический интерфейс, распределенная информационная система, стойкость полупроводниковых изделий

Любое программное обеспечение может быть охарактеризовано рядом показателей, определяющих в конечном итоге его качество, и связанных, в первую очередь, со спектром решаемых задач, функциональными возможностями, точностью применяемой математики и алгоритмов. В то же время важную роль играют и другие показатели, такие как надежность функционирования, быстродействие и удобство взаимодействия пользователя с программным обеспечением. Зачастую именно удобство взаимодействия пользователя с программным обеспечением является одним из основных показателей, определяющих популярность и простоту использования, а значит и доступность программного обеспечения для конечного пользователя. Совокупность возможностей, способов и методов взаимодействия пользователя с системой определяет пользовательский графический интерфейс, базовые принципы которого закладываются ещё на начальных этапах проектирования программного обеспечения.

При формировании графического интерфейса пользователя приходится отталкиваться от функциональных возможностей, структуры программного обеспечения и необходимости ввода пользователем дополнительной информации. Важное значение имеет уровень эргономичности интерфейса: программное обеспечение должно быть удобным в эксплуатации и не требовать чрезмерного напряжения усилий пользователя [1]. В задачи графического интерфейса включены также важные функции проверки правильности проведенных вводимых данных и расчетов для исключения ряда коллизий, связанных с некорректным вводом данных и проведением недопустимых операций. Выделенные элементы интерфейса должны быть точно выраженными и однозначными, чтобы их использование не требовало знаний о том, как они

реализуют свои функции. По этим причинам формирование интерфейса системы оценки стойкости полупроводниковых изделий является одной из ключевых задач при разработке специального программного обеспечения распределенной вычислительной системы с использованием интегрированной базы данных.

Исходя из целей и задач, а также выбранной концепции функционирования программного комплекса определены элементы интерфейса, характерные для всех разрабатываемых модулей (подсистем), обеспечивающих общность предоставления и выбора информации, а также инструменты, посредством которых он будет реализован. На начальных стадиях разработки программного обеспечения была определена структура распределенной системы, включающей, в том числе, единое хранилище данных и функции (операции), выполняемые распределенной системой. Специфика каждой из реализуемых подсистем определяется на завершающих этапах разработки и в процессе модернизации специального программного обеспечения.

Структура распределенной системы оценки стойкости полупроводниковых изделий представлена в [2, 3] и включает:

- подсистему идентификации, обеспечивающую реализацию функций проверки подлинности регистрируемого участника процесса. В процессе идентификации определяется группа допуска и, как следствие, перечень доступных пользователю операций в системе. Данная подсистема обеспечивается отдельным хранилищем с перечнем учетных записей пользователей и их атрибутов;

- систему управления проектом. Ключевой модуль системы позволяет организовать информационное пространство проекта, в котором хранится вся информация, используемая в процессе моделирования и оценки стойкости радиоэлектронной аппаратуры и элементной базы. Пространство данных проекта хранится на сервере системы и может корректироваться ограниченным кругом лиц;

- единое хранилище данных, выполняющее роль банка данных и позволяющее проводить просмотр данных элементов, их параметров и

Пашковская Елена Сергеевна – ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России, науч. сотрудник, e-mail: h-elen-com@yandex.ru
Пашковский Михаил Евгеньевич - ОАО НВП «ПРОТЕК», канд. техн. наук, зам. нач. отдела, e-mail: h-elen-com@yandex.ru
Барабанов Владимир Федорович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvf@list.ru

характеристик (критичные параметры и эксплуатационные характеристики) из интегрированной библиотеки компонентов, имеет связь с интегрированной библиотекой проектов, в которой содержатся весь перечень созданных в системе проектов, история их создания и результаты проведенных расчётов;

- внешнюю информационную среду поддержки моделирования и проектирования, включая нормативную документацию (различные ГОСТы и требования, предъявляемые техническими условиями в рамках разрабатываемого проекта);

- подсистему контроля и коррекции единой информационной системы, позволяющую допущенной группе лиц (административной группе) осуществлять коррекцию и дополнение единого хранилища данных. Непривилегированные пользователи могут внести изменения в хранилище посредством формирования соответствующего сообщения администратору системы, содержащего необходимые изменения;

- модуль интеграции информационной системы, который позволяет проводить добавление информации для определенного проекта из

сторонних источников;

- подсистему оценки характеристик стойкости радиоэлектронной аппаратуры и элементной базы к единичным эффектам при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства. Система требований позволяет оценить вероятность сбоя блока космического аппарата и проверить конфигурацию разрабатываемого блока на соответствие требованиям стойкости;

- подсистему оценки интегральных эффектов, связанных с общей накопленной дозой проекта, позволяющую оценить вероятность отказа рассматриваемого объекта при воздействии заряженных частиц в течение заданного пользователем периода времени;

- подсистему оптимизации проекта, позволяющую провести оптимизацию различных конфигураций разрабатываемого оборудования на основе критериев стойкости и определить перечень наиболее подходящих вариантов.

Описанная выше структура распределенной информационной системы моделирования и оценки стойкости радиоэлектронной аппаратуры приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структура распределенной информационной системы моделирования и оценки стойкости радиоэлектронной аппаратуры

Стоит отметить особую организацию доступа и работы в распределенной системе оценки стойкости полупроводниковых изделий. Все субъекты ($s = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$), проходящие регистрацию и получающие доступ к распределенной системе, делятся на три группы с различным набором реализуемых функций: пользователь, пользователь – владелец проекта и администратор системы. В формализованном виде различие набора реализуемых функций можно представить выражением $L(s) = \{L_1, L_2, L_3\}, L_1 < L_2 < L_3$. Все

субъекты имеют доступ прямо к своим персональным проектам (P). Субъект, регистрирующийся в системе, автоматически становится пользователем. При создании своих проектов в их области определения пользователь повышает уровень своих привилегий до среднего. Высокий уровень привилегий имеет администратор системы. Пользователи-владельцы проекта могут определить перечень пользователей базы данных, получающих доступ к своим проектам. Пользователи могут подать заявку на ознакомление с результатами расчетов чужих проектов, которые

рассматриваются пользователем-владельцем проекта ($K = \{K_1^*, K_2^*, \dots, K_r^*\}$). Последний имеет возможность как допустить пользователя, отправившего заявку, к ознакомлению с проектом, так и отказать ему. Также к проектам может быть установлен открытый доступ, и все пользователи системы могут получить доступ к результатам расчетов. База данных содержит результаты расчета

по отдельным элементам или их совокупности в проекты; субъект с уровнем L_2 проводит их классификацию по уровню доступа к проекту, определяет множество специальных привилегий и операции доступа над проектом. Далее проект хранится в базе данных. Модель работы базы данных показана на рис. 2.



Рис. 2. Модель организации работы с распределенной системой оценки стойкости полупроводниковых изделий

Модель разделена на три уровня: первый уровень – пользовательский интерфейс с содержанием трех блоков.

Второй уровень – уровень управления базами данных. На данном уровне реализуются классификация получаемых проектов ($L(b) = \{O, C, P\}, O < P < C$), формирование перечней доступа к каждому из проектов, перечня возможных операций доступа ($V = \{insert, \dots, del\}$).

Третий уровень – уровень базы данных. На данном уровне осуществляется хранение собранных проектов и данных элементной базы ($b_i = \{\text{атрибут}(A_i), \text{данные}(X_{ij})\}$).

Обычные пользователи имеют возможность написать заявку на получение доступа к одному из существующих проектов

$$L(s_i) = \{K^*(b_j) | L(b_j) = \{O, C\}, L(s_i) \leq L_1\}. \quad (1)$$

Пользователи-владельцы проектов имеют больше полномочий, включающих разработку проектов, формирование перечня возможных операций доступа к проекту и перечней доступа к каждому из проектов

$$L(s_i) = \{K^*(s R b), K(V R b) | L(s_i) \leq L_2\}. \quad (2)$$

Администраторы системы могут корректировать классификацию получаемых проектов, а также вносить изменения в открытую информацию, и формировать учетные записи пользователей

$$L(s_i) = \{K(V R L(s)), K(V R L(b)) | L(s_i) = L_3\}. \quad (3)$$

На основе полученных результатов определены состав и структура информационной системы оценки характеристик стойкости аппаратуры к воздействию заряженных частиц. Схема графического интерфейса распределённой информационной системы отражает основные графические формы программного обеспечения и схему их взаимосвязей (рис. 3).

Таким образом, исходя из выполняемых программным обеспечением функций была предложена схема организации графического интерфейса программной системы, включающая:

1. Интерфейс регистрации пользователя, отвечающий за задание учётных данных пользователя для входа в систему. В процессе регистрации пользователя вносится служебная информация, используемая в дальнейшем, а каждый

вновь зарегистрированный пользователь проходит процедуру согласования администратором системы, где данной учётной записи присваивается статус.

2. Интерфейс справочной системы, позволяющий проводить операции просмотра и редактирование баз данных единой информационной системы. Операция редактирования доступна только пользователям,

имеющим статус администратора информационной системы, все остальные пользователи могут только просматривать информацию единой информационной системы и добавлять выбранные элементы в пространство проекта. При работе со справочником доступны различные операции поиска, выбора и добавления элементов.

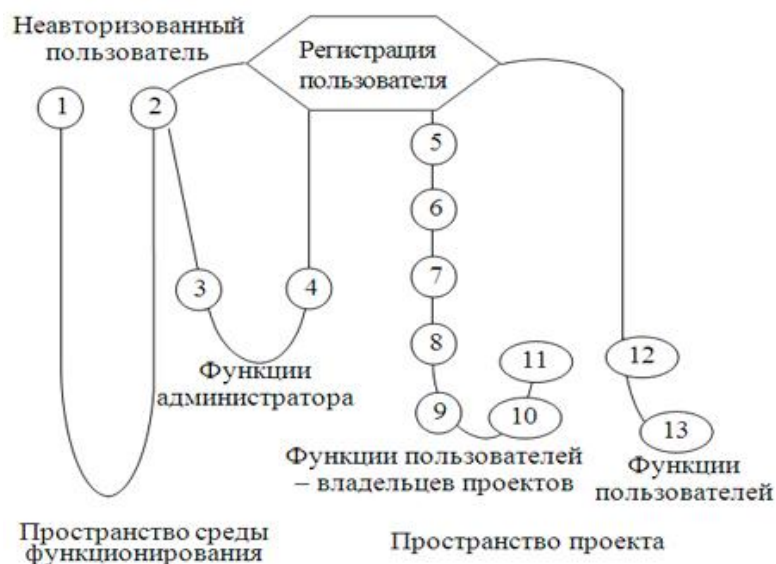


Рис. 3. Схема графического интерфейса распределенной информационной системы:

1 – ввод учетных данных; 2 – регистрация пользователем; 3 – регистрация пользователя; 4 – организация и поддержка системы; 5 – расчет от ТЗЧ; 6 – расчет от ВЭП; 7 – система соответствия заданным требованиям; 8 – оценка интегральных эффектов, связанных с общей накопленной дозой проекта; 9 – оптимизация выбора изделий; 10 – определение прав доступа при создании проекта; 11 – разрешение доступа к проекту; 12 – создание проекта; 13 – получение доступа к проекту

3. Интерфейс создания пространства проекта, определяющий исходную информацию проекта, включающую необходимые данные из перечня элементов, по которым будет проводится оценка стойкости и редактирование при необходимости уже имеющихся данных, а также формирование служебной информации, такой как перечень допущенных лиц и т.д.

4. Интерфейс оценки стойкости радиоэлектронной аппаратуры и элементной базы к единичным эффектам при воздействии тяжёлых заряженных частиц («Расчёт от ТЗЧ») позволяет информировать пользователя о ходе расчёта по оценке стойкости комплектующих полупроводниковых изделий к единичным эффектам при воздействии отдельных тяжёлых заряженных частиц космического пространства, обеспечивает ввод необходимых дополнительных параметров расчёта, отвечает за формирование файла, содержащего результаты проводимых оценок и его занесение в единую информационную систему.

5. Интерфейс оценки стойкости радиоэлектронной аппаратуры и элементной базы к единичным эффектам при воздействии высокоэнергетичных протонов («Расчёт от ВЭП»),

позволяющий информировать пользователя о ходе расчёта по оценке стойкости комплектующих полупроводниковых изделий к единичным эффектам при воздействии отдельных высокоэнергетичных протонов космического пространства, обеспечивает ввод необходимых дополнительных параметров расчёта, отвечает за формирование файла, содержащего результаты проводимых оценок и его занесение в единую информационную систему.

6. Интерфейс подсистемы проверки на соответствие требованиям стойкости, обеспечивающий пользователя структурированным отображением результатов расчётов, проведённых ранее (с использованием различных механизмов фильтрации и отбора полученной информации), проведение итоговых расчётов, в соответствии с требуемым временем эксплуатации космического аппарата и задаваемыми параметрами стойкости. Данный интерфейс обеспечивает ввод необходимых дополнительных параметров расчёта, отвечает за формирование файла, содержащего результаты проводимых оценок и его занесение в единую информационную систему, и проверку заданной конфигурации разрабатываемой аппаратуры на соответствие заданным требованиям стойкости.

7. Интерфейс оценки интегральных эффектов, связанных с общей накопленной дозой проекта при воздействии на нее ионизирующих излучений космического пространства, дающий представление о периоде, в течение которого радиоэлектронная аппаратура может выполнять свои целевые функции без сбоев.

8. Интерфейс теоретической справки, обеспечивающий представление информационных документов в соответствии с устанавливаемыми масками вывода данных. Данный интерфейс обеспечивает доступ к информационным файлам единой информационной системы.

9. Интерфейс оптимизации выбора изделий полупроводниковой электроники, обеспечивающий представление информации в табличном виде, задание дополнительных параметров отбора, исходя из заданных и рассчитанных критериев надёжности и цены, а также отвечающий за визуализацию результатов проводимой оптимизации.

Реализация вышеописанного графического интерфейса распределенной информационной системы оценки стойкости полупроводниковых изделий должна продемонстрировать высокий уровень эргономичности интерфейса, что в конечном итоге позволяет значительно повысить потребительские характеристики разработанного программного обеспечения и снизить уровень квалификации специалистов, проводящих расчеты

при помощи приведенного программного обеспечения.

Литература

1. Соммервилл, И. Инженерия программного обеспечения [Текст] / И. Соммервилл. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. - 624 с.

2. Пашковская, Е.С. Разработка программной среды распределенной системы оценки стойкости полупроводниковых изделий [Текст] / Е.С. Пашковская, М.Е. Пашковский, В.Ф. Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т.10, № 2. - С. 4-8.

3. Разработка модели базы данных распределенной системы оценки стойкости полупроводниковых изделий в защищенном исполнении [Текст] / Е.С. Пашковская, М.Е. Пашковский, В.Ф. Барабанов, А.В. Ачкасов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т.10, № 2. - С. 22-24.

4. Барабанов В.Ф. Основы автоматизации проектирования, тестирования и управления жизненным циклом изделия [Текст] / В.Ф. Барабанов, А.Д. Поваляев, С.Л. Подвальный, С.В. Тюрин. - Воронеж. 2011

5. Пашковская, Е.С. Построение "периметровой" стратегии защиты информационных систем персональных данных на основе настроек межсетевого экрана NETFILTER [Текст] / Е.С. Пашковская, М.Е. Пашковский, В.Ф. Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. - Т.8, № 4. - С. 39-43.

ФАУ " Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю ", г. Воронеж
ОАО НВП «ПРОТЕК», г. Воронеж
Воронежский государственный технический университет

INTERFACE ORGANIZATION DISTRIBUTED SYSTEM TO ESTIMATE THE RESISTANCE OF SEMICONDUCTOR PRODUCTS

E.S. Pashkovskaia, M.E. Pashkovsky, V.F. Barabanov

In offered work the the structure of a distributed system to estimate the resistance of semiconductor products and the corresponding scheme of the graphical user interface of a software system is formulated

Key words: graphic interface, distributed information system, resistance of semiconductor products

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКЛОПЛАСТИКА, ПОЛУЧЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИЭФИРНОЙ СМОЛЫ ПО МЕТОДУ ВАКУУМНОЙ ИНФУЗИИ

К.С. Габриельс, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Е.В. Кулакова

Для разработки технологического процесса получения пластины стеклопластика методом вакуумной инфузии проведен ряд пусконаладочных работ инфузионной установки Civas XE-R510-S-CP и полиэфирной инжекционной машины SIJECT ONE-POLYESTER. Получена пластина на основе стекломатериала и полиэфирной смолы, проведен ряд физико-механических испытаний для контроля качества полученного изделия. В результате проведенной работы получены данные, на основании которых можно сделать вывод о высоком качестве исходных материалов и правильно подобранных параметрах разработанного технологического процесса

Ключевые слова: безавтоклавная технология, вакуумная инфузия, стеклопластик, физико-механические свойства, растяжение, сжатие

Введение

В современном мире использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) во многом определяет высокий уровень качества и надежности изготавливаемых изделий. Это связано с весовой эффективностью, хорошими технологическими и эксплуатационными свойствами используемых композиционных материалов.

В различных отраслях промышленности при производстве изделий из ПКМ используются методы и технологии, различающиеся между собой по степени сложности, трудоемкости и используемому оборудованию. Выбор технологии обусловлен требованиями, предъявляемыми к используемому материалу и конечному изделию.

Долгое время самой распространенной технологией производства сложных изделий из ПКМ была препреговая технология. Производство композиционных материалов по этой технологии состоит из двух этапов: этапа получения полуфабриката (препрега) и этапа выкладки и формования готового изделия в автоклаве [1].

Автоклавный метод формования изделия обеспечивает высокий уровень физико-механических свойств и низкую пористость

получаемой продукции. В то же время изготовление изделий по препреговой технологии имеет ряд недостатков: высокая стоимость используемых материалов, высокая трудоемкость, малый срок хранения препрегов и значительные энергозатраты.

С развитием производства ПКМ появилось множество технологий, не требующих использования метода автоклавного формования изделия, и позволяющих уйти от недостатков препреговой технологии. Эти технологии образовали класс безавтоклавных методов формования изделия.

Одним из наиболее перспективных безавтоклавных методов формования является метод вакуумной инфузии, позволяющий совместить операцию пропитки сухого наполнителя полимерным связующим и формование детали в одном технологическом цикле, что значительно сокращает время изготовления детали и трудоемкость всего процесса. Вакуумная инфузия – это процесс пропитки армирующих материалов связующим с помощью разрежения, возникающего из-за разницы давлений между окружающей средой и загерметизированной формой. Использование такого технологического решения позволяет получать изделия сложной геометрической формы с заданными параметрами, не требующие дополнительной механической обработки, без использования сложного, дорогостоящего и энергозатратного оборудования.

Целью данной работы был запуск оборудования для получения ПКМ методом вакуумной инфузии, а также разработка технологического процесса получения пластины на основе стекломатериала и полиэфирной смолы с последующим контролем физико-механических свойств.

Габриельс Константин Сергеевич – НВЛ «Композиционные материалы» ВГТУ, инженер-исследователь, e-mail: vgtu.nvl.km@gmail.com

Караева Оля Анатольевна – НВЛ «Композиционные материалы» ВГТУ, мл. науч. сотрудник, e-mail: olgakaraeva9@mail.ru

Кудрин Алексей Михайлович – НВЛ «Композиционные материалы» ВГТУ, заведующий лабораторией, e-mail: nvl.pkm@gmail.com

Кулакова Елена Владимировна – НВЛ «Композиционные материалы» ВГТУ, инженер-исследователь, e-mail: vgtu.nvl.km@gmail.com

Пусконаладочные работы

Для проведения научно-исследовательских работ в направлении безавтоклавных технологий были приобретены инфузионная установка Civas XE-R510-S-CP и полиэфирная инжекционная машина CIJECT ONE-POLYESTER.

Инжекционная машина CIJECT ONE-POLYESTER предназначена для смешивания, нагнетания и распределения термоотверждающейся смолы и системы катализаторов, которые можно закачивать под давлением как в открытую, так и в закрытую составную оснастку.

Пусконаладочные работы инжекционной машины CIJECT ONE-POLYESTER проведены согласно инструкции по вводу в эксплуатацию и включили в себя монтаж оборудования, подключение к сети электроснабжения и магистрали сжатого воздуха, установку емкостей с основными исходными компонентами (полиэфирная смола, отвердитель) и вспомогательными (жидкость для промывки смесительной головки). На этапе отработки тестового режима произведен запуск контроллера управления и заданы необходимые параметры инъекции. Подачу связующего производили в открытую мерную емкость с целью последующего визуального контроля связующего на наличие непрореагировавших компонентов. Выявлено, что реакция полимеризации проходила в полном объеме, не обнаружено включений в виде пор воздуха и отдельных фаз смолы или отвердителя, что свидетельствует о корректной работе механических и электронных компонентов оборудования.

Следующим этапом стало проведение пуско-наладочных работ инфузионной установки Civas XE-R510-S-CP в соответствии с техническим регламентом. Был выполнен монтаж оборудования и подключение его к сети электроснабжения, произведен тестовый запуск машины с целью проверки производительности насоса и герметичности таких вакуумных соединений, как вакуумная ловушка, соединительные трубки и коннекторы.

Результаты проведенных пусконаладочных работ инфузионной машины Civas XE-R510-S-CP и инжекционной машины CIJECT ONE-POLYESTER соответствуют заявленным параметрам технических инструкций производителей.

Методика эксперимента

Для получения плоскопараллельной пластины прямоугольной формы на основе поли-

эфирного связующего и стекломата по технологии вакуумной инфузии разработан технологический процесс. По разработанному процессу выполнена сборка технологического пакета, как показано на рис. 1.

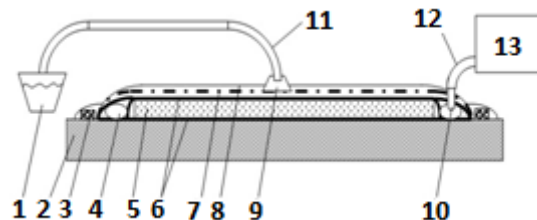


Рис. 1. Схема сборки технологического пакета

Перед сборкой пакета произведена обработка оснастки 2 антиадгезивом. В соответствии со схемой выкладки поверх оснастки выложены слои: жертвенной ткани 6, трехслойного рубленого стекломата 5 плотностью 300/180/300 г/м² и дренажной сетки 7. По периметру оснастки размещен герметизирующий жгут 3, к которому был прикреплен вакуумный мешок 8. Собранный пакет подключен к емкости с полиэфирным связующим 1 через трубку подачи смеси 11 и запитывающий штуцер 9 и к инфузионной машине Civas XE-R510-S-CP 13, создающей необходимое разрежение в загерметизированной форме через линию откачки вакуума 12, штуцер вакуумной линии 10 и спиральную трубку 4.

Для проведения процесса инфузии использовано полиэфирное связующее объемом 1 л. Процесс проходил при комнатной температуре 23 °С в течение 10 минут, давление в системе поддерживалось на уровне 135 мбар с погрешностью 1 мбар. По истечении заданного времени подача связующего была прекращена, а технологический пакет с пропитанным материалом выдержан под давлением до полной полимеризации связующего (24 ч).

По истечении времени выдержки произведена распаковка технологического пакета и извлечена готовая пластина. Для контроля качества параметров готового изделия необходимо провести физико-механические испытания. С этой целью полученная пластина порезана на элементарные образцы прямоугольной формы в соответствии со стандартами испытаний.

Испытания на растяжение проведены по стандарту ASTM D 3039 «Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites» на оборудовании Instron 5985 при температуре 22 °С [2].

Испытания на сжатие проведены по стандарту ASTM D 6641 «Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture» на оборудовании Instron 5982 при температуре 22 °C с использованием оснастки, изготовленной по ASTM D 6641 [3].

Перед каждым испытанием проведены измерения толщины и ширины рабочей части образца в трех местах: по краям и в середине. По средним значениям толщины и ширины с точностью до двух значащих цифр после запятой рассчитана площадь поперечного сечения образца.

Испытание образца на сжатие произведено на испытательной машине с использованием специализированной оснастки.

Образец на растяжение установлен в захватах испытательной машины так, чтобы его продольные оси совпали с прямой, соединяющей точки крепления захватов в испытательной машине.

На образцы производилась подача нагрузки равномерно со скоростью согласно стандартам ASTM D 3039 и ASTM D 6641 до полного разрушения. Зафиксирована максимальная нагрузка $F_{\max}$, предшествующая разрушению образца.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний на растяжение представлены на рис. 2.

По полученным результатам проведен расчет характеристик предела прочности σ_b и модуля упругости E при растяжении.

Значение предела прочности σ_b при растяжении вычислили по формуле (1):

$$\sigma_b = \frac{F_{\max}}{s}, \quad (1)$$

где $F_{\max}$ – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца;

s – площадь поперечного сечения рабочей части образца.

Среднее значение предела прочности партии образцов составило 83,53 МПа.

Значение модуля упругости E при растяжении было определено графически и составило 21,54 МПа.

Относительное удлинение ε вычислили по формуле (2):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где Δl – абсолютное удлинение образца при разрушении;

l_0 – начальная расчетная длина образца.

Значение относительного удлинения образца составило 2,7%.

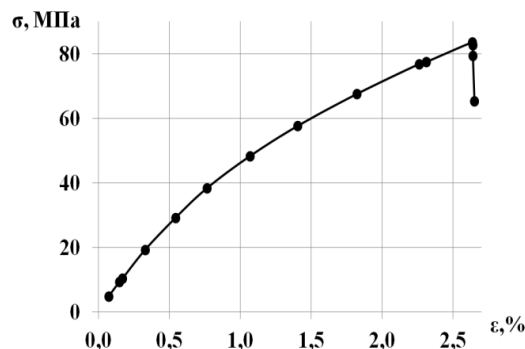


Рис. 2. Диаграмма растяжения образца ПКМ по стандарту ASTM D 3039

Результаты испытаний на сжатие представлены на рис. 3.

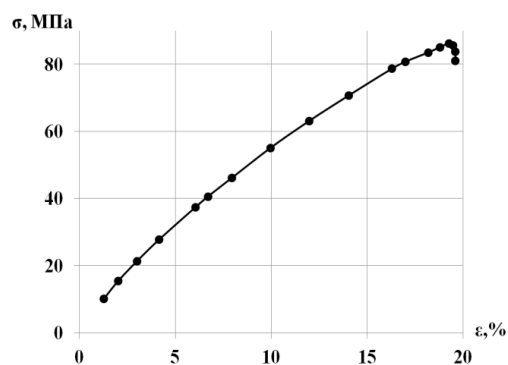


Рис. 3. Диаграмма сжатия образца ПКМ по стандарту ASTM D 6641

По полученным результатам проведен расчет предела прочности σ_b при сжатии. Среднее значение предела прочности σ_b партии образцов составило 87,6 МПа.

В процессе проведения испытаний на растяжение и сжатие разрушение образцов происходило в пределах рабочей зоны, что свидетельствует о соблюдении условий подготовки образцов и проведения испытаний.

По результатам проведенных испытаний сделан вывод о высоком качестве исходных материалов и правильно подобранных параметрах разработанного технологического процесса.

Заключение

В соответствии с инструкцией по эксплуатации был проведен ряд пусконаладочных работ инфузионной установки Civas XE-R510-S-CP и полиэфирной инжекционной машины

CIJECT ONE-POLYESTER. Полученные результаты соответствуют заявленным параметрам технических инструкций производителей.

Разработан технологический режим, в соответствии с которым получена пластина на основе рубленого стекломатериала и полиэфирной смолы методом вакуумной инфузии. По стандартам ASTM D6641 и ASTM D3039 проведены физико-механические испытания образцов стеклопластика с целью контроля параметров полученного изделия.

По результатам анализа данных механических испытаний полученного образца сделан вывод о высоком качестве исходного сырья и удачном подборе технологических параметров разработанного процесса получения изделия.

Информация о механических показателях предела прочности при сжатии и растяжении стеклопластика может быть полезна при по-

следующей разработке технологического процесса по получению изделий сложной формы с другими видами полимерных связующих и армирующих материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки в рамках госзадания на НИР на 2015 г.

Литература

1. Афанасьев, Д.В. Безавтоклавные технологии [Текст] / Д.В. Афанасьев, М.Ю. Ощепков // Композитный мир. – 2010. – С. 28-37.
2. ASTM D3039. Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites: standard.
3. ASTM D 6641 – 01. Test method for determining the compressive properties of polymer matrix composite laminates using a combined loading compression (CLC) test fixture: standard.

НВЛ «Композиционные материалы» Воронежского государственного технического университета

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FIBERGLASS PRODUCED WITH POLYESTER RESIN BY VACUUM INFUSION

K.S. Gabriels, O.A. Karaeva, A.M. Kudrin, E.V. Kulakova

To develop the technological process of fiberglass plate by vacuum infusion the commissioning and start-up works with Civac XE-R510-S-CP infusion and CIJECT ONE-POLYESTER injection machines have been carried. A work-plate based on a polyester resin and glass-fiber mat have been obtained, a number of physical and mechanical tests to monitor the quality of the product has been passed. As a result, some data has been provided revealing the high quality raw materials and proper fitting the parameters of the process

Key words: autoclave-free technology, vacuum infusion, fiberglass, physical and mechanical properties, tensile and compressive properties

ПЛОТНОСТЬ И МИКРОТВЕРДОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, СОДЕРЖАЩИХ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ

О.Д. Козенков, Т.В. Пташкина, А.Т. Косилов

Исследованы свойства композиционных электрохимических покрытий с медной матрицей, содержащих углеродные нанотрубки или ультрадисперсные алмазы. Покрытия получены из соответствующих суспензий углеродных наноматериалов в диспергирующей среде на основе электролита меднения в процессе электролитического осаждения. Определена концентрация дисперсных частиц углеродных наноматериалов в медной матрице. Установлено, что при увеличении концентрации наночастиц в суспензии плотность композиционных электрохимических покрытий с медной матрицей снижается, происходит измельчение зерна, повышение микротвердости. Изучено влияние плотности тока при осаждении покрытия на структурные и механические характеристики покрытий. Экспериментальные результаты интерпретированы в рамках модели дисперсного упрочнения

Ключевые слова: композиционные электрохимические покрытия, углеродные наноматериалы, суспензии, плотность, микротвердость

Одним из приоритетных направлений развития современного материаловедения является разработка новых материалов для высокотехнологичных отраслей промышленности. К таким материалам, в частности, относятся наноструктурированные композиты, в том числе композиционные электрохимические покрытия (КЭП). КЭП получают при гальваническом соосаждении наночастиц и металлов из суспензий электролитов, что повышает механические и изменяет физические свойства композита [1].

Композиционные материалы находят широкое применение при разработке деталей космических и авиационных аппаратов.

В настоящее время проблеме повышения эксплуатационных характеристик материалов не уделяется должного внимания. Изучение свойств наноструктурированных материалов необходимо, для понимания процессов, сопровождающих получение КЭП, и управления их свойствами.

В данной работе проведено изучение плотности и микротвердости КЭП с медной матрицей, содержащих ультрадисперсные алмазы (УДА) и углеродные нанотрубки (УНТ). Высокие показатели теплопроводности компонентов таких композитов и повышенные механические свойства по отношению к чистой меди позволяют решить ряд конструктивно-технологических задач в теплообменных процессах ракетостроения.

Образцы медных КЭП с углеродными наночастицами готовились в процессе гальванического осаждения из электролита, представляющего собой суспензию УДА или УНТ. Для создания суспензии в качестве дисперсионной среды использовался сернокислый электролит меднения с добавлением частиц УДА и УНТ, концентрация которых состав-

ляла от 0 до 5 г/л. Для получения суспензий электролит с навеской УДА или УНТ подвергался ультразвуковому воздействию в течение 10 мин. В качестве источника ультразвуковых колебаний использовалась ультразвуковая ванна марки УХ 9050. В процессе приготовления суспензий поддерживалась постоянная температура 0 °С для предотвращения ее разогрева.

КЭП наносились на медные подложки в процессе электролитического осаждения при плотностях тока от 0,5 до 6 А/дм².

В работах [2, 3] отмечалось уменьшение размера зерна КЭП с различными металлическими матрицами и упрочняющими дисперсными частицами по сравнению с чистыми металлическими покрытиями. Исследование поверхности покрытий, полученных в данной работе, подтвердило эту закономерность.

На рис. 1 показана поверхность чистого медного покрытия и КЭП с УДА. Степень дисперсности структуры поверхности чистого медного покрытия (рис. 1, а) существенно ниже, чем КЭП с медной матрицей и УДА (рис. 1, б). Аналогичная закономерность прослеживалась и для КЭП с медной матрицей и УНТ. Наличие высокодисперсных частиц УДА в медной матрице препятствует разрастанию кристаллитов меди с образованием крупнозернистой структуры, что приводит к измельчению зерна и повышению качества покрытия.

Важнейшей характеристикой качества покрытий является плотность и связанная с ней пористость. Для точного экспериментального определения плотности КЭП целесообразно применять методы, которые давали бы возможность определить объем покрытия, не прибегая к нахождению его размеров. Для этих целей оптимально подходит метод гидростатического взвешивания, основанный на законе Архимеда. Метод позволяет существенно повысить точность измерения плотности при использовании жидкости с максимальной смачиваемостью металла.

Определение плотности проводили на аналитических весах KERN ABJ 220-4NM специальным

Козенков Олег Дмитриевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: kozenkov_w@mail.ru
Пташкина Татьяна Владимировна – ВГТУ, инженер-исследователь, e-mail: tatptashkina@yandex.ru
Косилов Александр Тимофеевич – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, тел. (473) 2466647

набором KERN ACS-A03 с точностью измерения до 0,0001 г. Покрытие взвешивалось в двух средах – на воздухе и в рабочей жидкости – в спирте. Экспериментально установлено, что для медных покрытий наилучшие результаты дает использование этилового спирта, который и применялся при определении плотности КЭП.

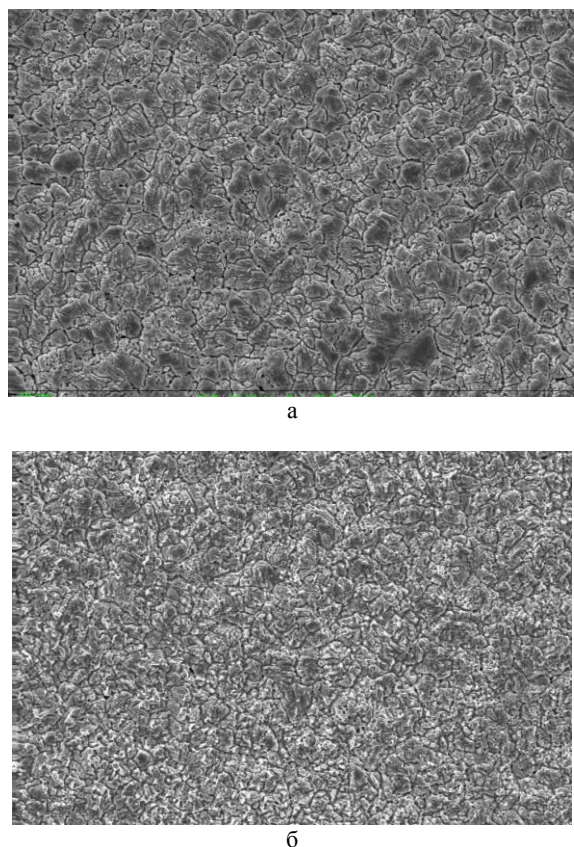


Рис. 1. Микроструктура поверхности: а – медного покрытия (увеличение $\times 600$); б – КЭП с УДА (увеличение $\times 600$)

Экспериментальные результаты зависимости плотности медных КЭП с УДА и УНТ от концентрации дисперсных частиц в суспензии на основе электролита меднения при различных постоянных значениях плотности тока осаждения от 0,5 А/Дм² до 6 А/Дм² приведены на рис. 2.

Как следует из рис. 2, плотность КЭП с медной матрицей и частицами УДА и УНТ понижается с ростом концентрации дисперсных частиц в суспензии. Данная закономерность может быть вызвана двумя причинами. Во-первых, плотность КЭП падает по мере повышения концентрации дисперсных частиц УДА или УНТ в покрытии. Во-вторых, плотность КЭП может понижаться в результате повышения пористости покрытия. Однако, как следует из рис. 1, введение в медную матрицу высокодисперсных частиц УДА или УНТ приводит к повышению степени дисперсности кристаллической структуры КЭП и способствует понижению пористости покрытия. Следовательно, пористость КЭП не увеличивается, а понижение плотности покры-

тия связано, по-видимому, с увеличением концентрации УДА или УНТ в нем. Этот вывод позволяет определить концентрацию дисперсных частиц УДА или УНТ в соответствующих КЭП. Кроме того, из рис. 2 следует, что КЭП с медной матрицей и дисперсными частицами УДА имеют более высокую плотность, нежели КЭП с медной матрицей и частицами УНТ. Значительное снижение плотности КЭП с медной матрицей и УДА наблюдается только при концентрациях дисперсных частиц в суспензии больше 3 г/л (рис. 2, а). Для КЭП с медной матрицей и частицами УНТ до концентрации дисперсных частиц в суспензии 2 г/л происходит интенсивное падение плотности покрытия, а свыше 2 г/л – более плавное (рис. 2, б).

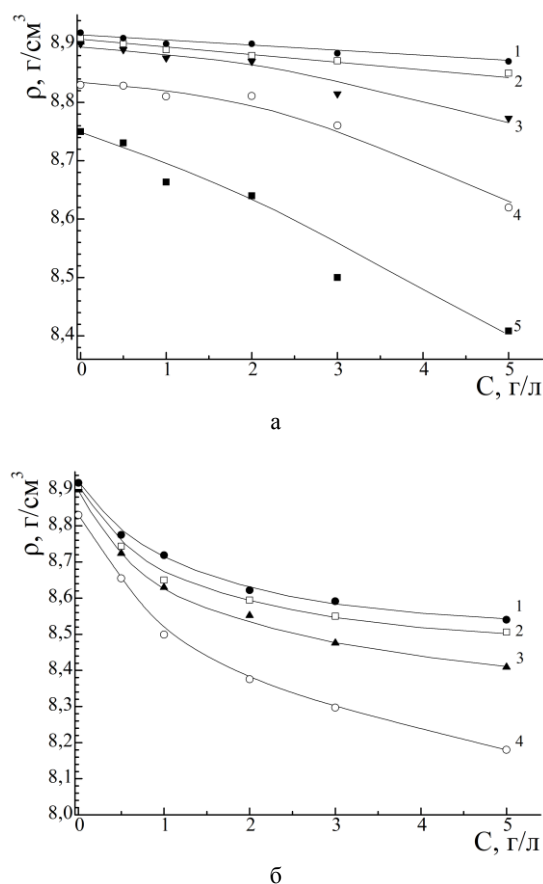


Рис. 2. Зависимость плотности покрытия (а – Cu/УДА, б – Cu/УНТ) от концентрации частиц в суспензии: 1 – 0,5 А/дм², 2 – 1 А/дм², 3 – 2 А/дм², 4 – 4 А/дм², 5 – 6 А/дм²

При повышении плотности тока осаждения КЭП, как и следовало ожидать, плотность покрытия падает в соответствии с рис. 2, а кривые 1-5 и рис. 2, б кривые 1-4. Падение плотности КЭП при повышении плотности тока осаждения связано с увеличением скорости роста покрытия и, как следствие, повышением степени его дефектности.

Для определения соотношения между открытыми и закрытыми порами в чистом медном покрытии были определены его плотность и пори-

стость в исходном состоянии, и после одноосного сжатия - при напряжениях $\sigma \approx 0,4$ ГПа.

На рис. 3 показана экспериментальная зависимость плотности и пористости чистого медного покрытия от плотности тока, где линии 1 и 3 – плотность и пористость исходного покрытия соответственно до сжатия, а линии 2 и 4 – плотность и пористость покрытия после сжатия. Из рис. 3 следует, что в чистом медном покрытии изменение плотности и пористости до и после сжатия не слишком существенно вплоть до плотности тока 4 А/Дм². При плотности тока свыше 4 А/Дм² различия в плотности чистого медного покрытия до и после сжатия становятся все более существенными и по мере нарастания плотности тока возрастают. Так как в процессе сжатия уничтожаются только открытые поры, полного соответствия плотности покрытия плотности меди не достигается, хотя отмечается некоторое возрастание плотности и снижение пористости покрытия.

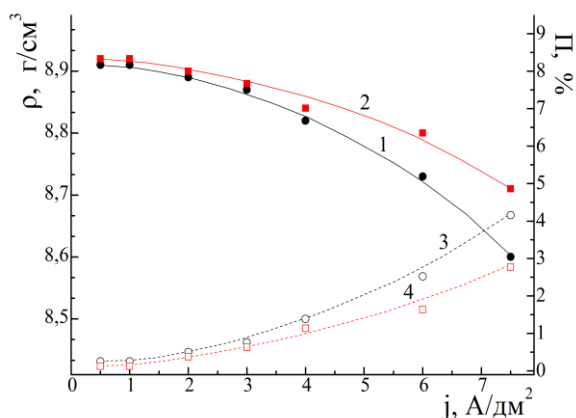


Рис. 3. Зависимость плотности (1 – до сжатия, 2 – после сжатия) и пористости (3 – до сжатия, 4 – после сжатия) чистого медного покрытия от плотности тока

Важнейшей характеристикой КЭП является содержание в металлической матрице упрочняющих дисперсных частиц. Объемная концентрация УДА или УНТ в КЭП определялась из допущения о том, что пористость покрытия, полученного при определенной плотности тока, практически соответствует пористости чистого медного покрытия. Исходя из этого допущения, не трудно определить объемную концентрацию дисперсных частиц в КЭП.

$$C_{об} = \frac{V_q}{V_{Cu+q}} \cdot 100\%,$$

где $C_{об}$ – объемная концентрация дисперсных частиц УДА или УНТ в КЭП, V_q – объем частиц УДА или УНТ, V_{Cu+q} – объем КЭП с частицами УДА или УНТ

На рис. 4 показана зависимость объемной концентрации дисперсных частиц УДА и УНТ в КЭП с медной матрицей. Как следует из рисунка, концентрация частиц в покрытии возрастает с увеличением концентрации частиц в суспензии на ос-

нове электролита осаждения и достигает уровня 8–10 об. % при концентрации суспензии 5 г/л. Видно, что концентрация УДА или УНТ в КЭП сильно зависит от плотности тока осаждения. Так, при возрастании плотности тока от 0,5 А/Дм² до 4–6 А/Дм² концентрация дисперсных частиц в пленке увеличивается от десятых долей процента до 8–9 %.

Скорость роста КЭП определяется плотностью тока осаждения. Увеличение плотности тока увеличивает скорость осаждения покрытия и, следовательно, снижает его качество, увеличивая при этом концентрацию дисперсных частиц УДА или УНТ в КЭП за счет облегчения захвата примеси при увеличении скорости роста.

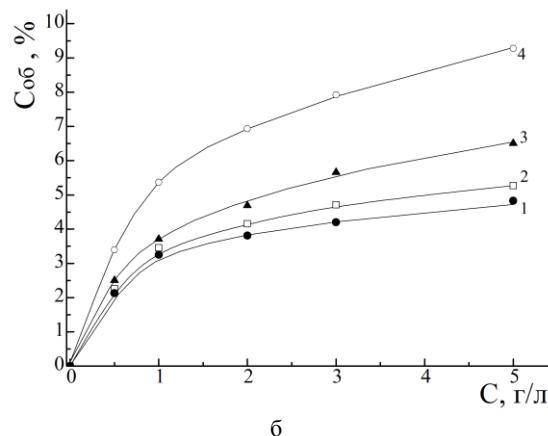
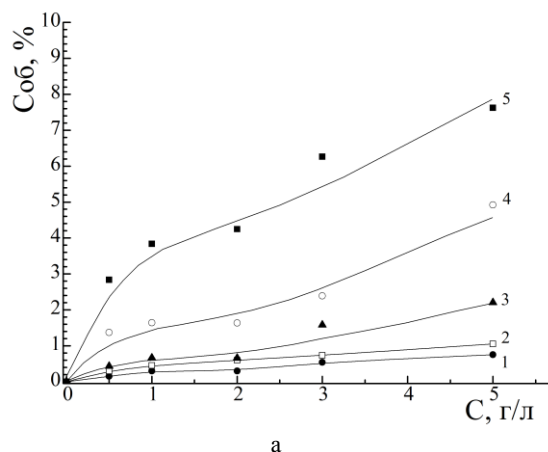


Рис. 4. Зависимость объемной концентрации частиц (а – УДА, б – УНТ) в пленке КЭП от концентрации частиц в суспензии: 1 – 0,5 А/Дм², 2 – 1 А/Дм², 3 – 2 А/Дм², 4 – 4 А/Дм², 5 – 6 А/Дм²

Для оценки механических свойств КЭП с медной матрицей и частицами УДА или УНТ были проведены измерения микротвердости покрытий.

Определение микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 путем вдавливания правильной четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине 136° под нагрузкой 0,1 гс в плоскую поверхность образца. Толщина выращиваемых покрытий согласно условию измерения составляла не менее двух диагоналей отпечатка индентора.

Экспериментальные результаты зависимости микротвердости медного покрытия с УДА и УНТ от концентрации дисперсных частиц углеродных наноматериалов в суспензии представлены на рис. 5. Как видно из рис. 5, а, при увеличении концентрации суспензии от 45 до 90-115 HV твердость КЭП с медной матрицей и частицами УДА существенно возрастает. При этом твердость покрытия увеличивается с ростом плотности тока и, следовательно, растет концентрация частиц в пленке КЭП.

В случае КЭП с медной матрицей и частицами УНТ (рис. 5, б), полученные результаты не столь однозначны. Твердость КЭП увеличивается от 45 до 80 HV, что значительно меньше, чем для КЭП с УДА, полученных в аналогичных условиях. Отсутствует уверенная тенденция к росту твердости КЭП по мере роста концентрации частиц УНТ в суспензии или покрытии. Кроме того, твердость КЭП с УНТ снижается по мере роста тока осаждения, начиная с концентрации частиц УНТ в суспензии свыше 3 г/л.

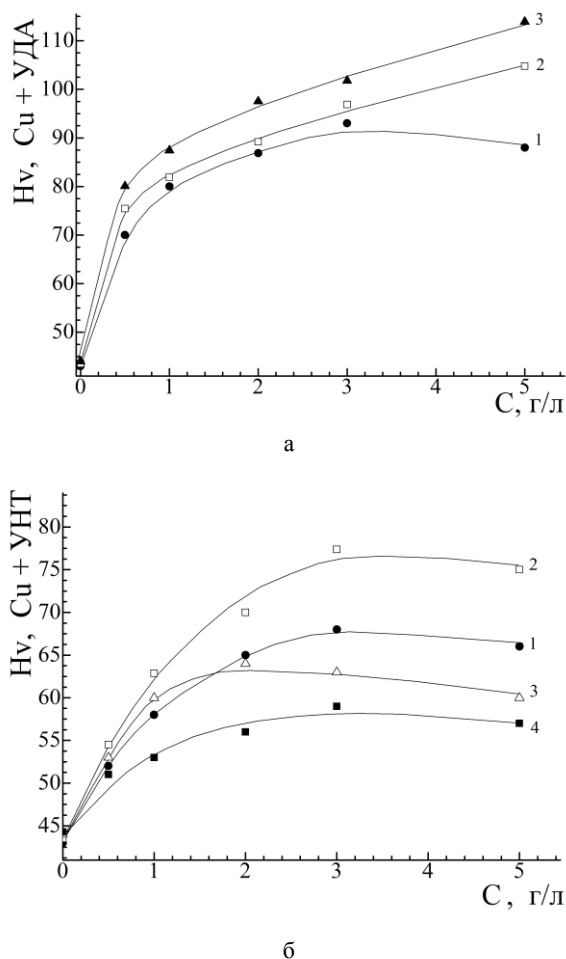


Рис. 5. Зависимость микротвердости медного покрытия (а – Cu/УДА, б – Cu/УНТ) от концентрации частиц в суспензии

Более показательными являются экспериментальные результаты, устанавливающие зависимость микротвердости медного КЭП с УДА или УНТ от

концентрации частиц в покрытии, приведенные на рис. 6. Из рис. 6 следует, что упрочнение частицами УДА более эффективно, чем упрочнение частицами УНТ, что, по-видимому, связано в первую очередь с различием в геометрии этих наночастиц.

В работах [4, 5] на основе исследований суспензии УДА и УНТ в диспергирующих средах на основе электролитов показано, что суспензии с УДА значительно более устойчивы, чем суспензии с УНТ, при этом средний размер агломератов частиц УДА значительно меньше, чем для УНТ. Эти особенности суспензий во многом определяют качество композиционных покрытий и их свойства.

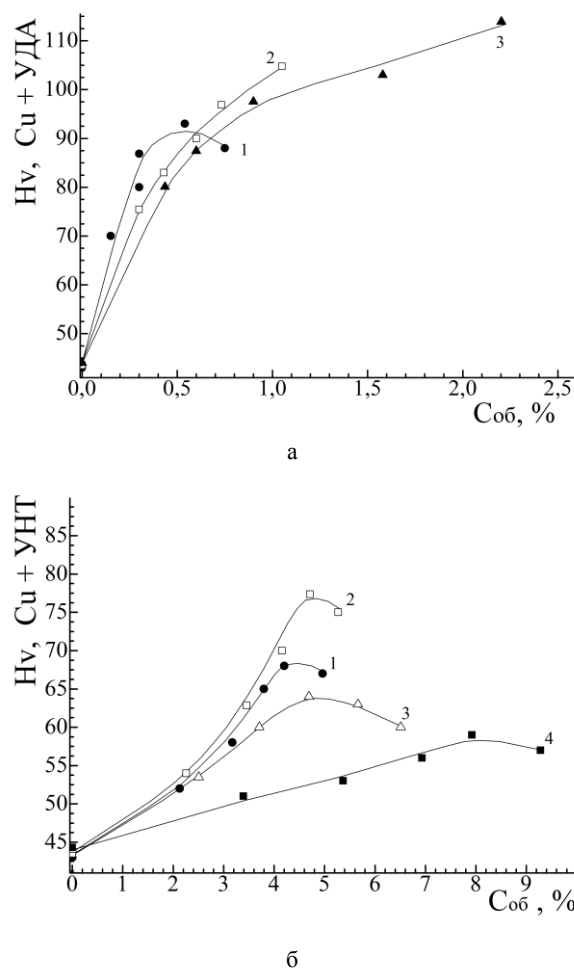


Рис. 6. Зависимость микротвердости медного КЭП (а – Cu/УДА, б – Cu/УНТ) от концентрации частиц в покрытии

Экспериментально установлено, что КЭП с медной матрицей и УДА имеют более гладкую поверхность и мелкокристаллическое строение, чем полученные в аналогичных условиях КЭП с медной матрицей и УНТ. Более низкое качество покрытий с УНТ по сравнению с покрытиями с УДА приводит к более быстрой его деградации при увеличении плотности тока и концентрации частиц в суспензии и, как следствие, к снижению механических характеристик КЭП, в частности, твердости.

Введение наночастиц УДА и УНТ в медную

матрицу в процессе электрохимического осаждения приводит к повышению твердости КЭП, причем увеличение твердости покрытия происходит по мере увеличения концентрации дисперсных частиц УДА или УНТ в суспензии и в КЭП. Наличие нанодисперсных частиц углеродных наноматериалов, обладающих огромной прочностью, в медной матрице приводит к существенному увеличению твердости КЭП в результате дисперсного упрочнения.

Результаты, полученные в работе, позволяют сделать следующие выводы:

- отработана лабораторная технология получения КЭП с медной матрицей и дисперсными частицами УДА или УНТ, позволяющая получать композиционные покрытия в процессе электрохимического осаждения;

- установлено, что введение в медную матрицу наночастиц УДА или УНТ способствует улучшению структуры пленки, делая ее более мелкозернистой, и не увеличивает пористость покрытия;

- определена объемная концентрация частиц УДА и УНТ в КЭП с медной матрицей. Объемная концентрация частиц УДА и УНТ в покрытии растет с увеличением их концентрации в суспензии и увеличением плотности тока осаждения;

- определена твердость КЭП с УДА и УНТ в зависимости от концентрации дисперсных частиц наноматериалов в суспензии и в покрытии. Твердость КЭП с УДА растет с увеличением концентрации частиц в суспензии или в покрытии по мере увеличения плотности тока осаждения. Твердость КЭП с УНТ также увеличивается с увеличением концентрации частиц в суспензии или в покрытии и с увеличением плотности тока осаждения, но при

концентрации частиц в суспензии свыше 2 % твердость начинает уменьшаться.

Экспериментальные результаты, полученные в работе, могут быть полезны при разработке промышленной технологии нанесения КЭП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки в рамках госзадания на 2014 г.

Литература

1. Сайфуллин, Р.С. Неорганические композиционные материалы [Текст] / Р.С. Сайфуллин. - М.: Химия, 1983. - 304 с.
2. Кубрак, П.Б. Электрохимическое осаждение и свойства композиционных никелевых покрытий, содержащих углеродные наноматериалы [Текст] / П.Б. Кубрак, В.Б. Дроздович, И.М. Жарский // Гальванотехника и обработка поверхностей. - 2012. - Т. XX. - С. 43-49.
3. Медное гальваническое покрытие, модифицированное многостенными углеродными нанотрубками [Текст] / Р.А. Столяров, А.Г. Ткачев, Ю.В. Литовка // Вестник ТГУ. - 2010. - Т. 15. - № 5. - С. 12-13.
4. Козенков, О.Д. Разработка водных суспензий углеродных наноматериалов для электролитов [Текст] / О.Д. Козенков, В.А. Юрьев, Т.В. Пташкина // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2011. - Т. 7. - № 10. - С. 21-24.
5. Козенков, О.Д. Исследование суспензий ультрадисперсных алмазов в диспергирующей среде на основе водных растворов электролитов [Текст] / О.Д. Козенков, Т.В. Пташкина, А.Т. Косилов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. - Т. 8. - № 7.1. - С. 65-69.

Воронежский государственный технический университет

DENSITY AND MICROHARDNESS OF COMPOSITE COATING CONTAINED CARBON NANOMATERIALS

O.D. Kozenkov, T.V. Ptashkina, A.T. Kosilov

The properties of composite electrochemical coatings with copper matrix containing carbon nanotubes or ultrafine diamonds. Coatings prepared from the corresponding suspensions of carbon nanomaterials in a dispersive medium, based on the copper plating electrolyte during the electrolytic deposition. The concentration of dispersed particles of carbon nanomaterials in the copper matrix. Found that increasing the concentration of nanoparticles in the suspension density electrochemical composite coatings with a copper matrix is reduced, the grain refinement occurs, increasing microhardness. The effect of current density in the deposition of the coating on the structural and mechanical properties of the coatings. The experimental results are interpreted in terms of the model of dispersion strengthening

Key words: composite electrochemical coatings, carbon nanomaterials, suspensions, density, microhardness

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ В МАТРИЦЕ ОКСИДА НИОБИЯ

А.А. Гребенников, О.В. Стогней, Е.О. Буловацкая, К.И. Семененко, А.Дж. Аль-Малики

Методом ионно-лучевого распыления составной мишени, состоящей из никелевой основы и навесок Nb_2O_5 , получены гетерогенные материалы ферромагнетик-диэлектрик, содержащие в своем объеме наноразмерные частицы Ni. Концентрация Ni в полученных образцах $\text{Ni}_x(\text{Nb}_m\text{O}_n)_{100-x}$ меняется в интервале 17 – 54 ат.%. Установлено, что значения туннельного магнитосопротивления (ТМС), наблюдаемые в системе $\text{Ni}_x(\text{Nb}_m\text{O}_n)_{100-x}$, в несколько раз меньше аналогичных значений, характерных для композитов на основе никеля. При 293 К образцы с небольшим содержанием Ni не проявляют ТМС, хотя их намагниченность в магнитном поле отлична от нуля. Охлаждение этих образцов до 77 К приводит к появлению ТМС. Предположительно данные особенности связаны с высокой дефектностью диэлектрической матрицы, наличием слоя окисла, низкими значениями T_C и большим разбросом по размеру гранул никеля

Ключевые слова: нанокompозит, температура Кюри, туннельное магнитосопротивление, ферромагнетизм

Введение

В течение последних десятилетий среди исследователей наблюдается значительный интерес к изучению особенностей структуры и свойств наноразмерных систем. Данное обстоятельство обусловлено, прежде всего, проявлением в таких системах квантовых размерных эффектов, не характерных для «обычных» материалов. Одной из главных причин изменения физических и химических свойств малых частиц по мере уменьшения их размеров является возрастание в них относительной доли «поверхностных» атомов, находящихся в иных условиях (координационное число, симметрия локального окружения и т.п.), чем атомы объемной фазы. С энергетической точки зрения уменьшение размера частицы приводит к возрастанию доли поверхностной энергии в ее химическом потенциале [1].

Среди уникальных для наносистем свойств особое место занимают магнитные. Еще в первой половине XX века было теоретически обоснованы [2] и экспериментально обнаружены (например, [3]) суперпарамагнитное состояние ферромагнитных наночастиц и связанный с ним иной (в сравнении с многодоменным состоянием) механизм перемагничивания материала. В дальнейшем у магнитных наноматериалов были обнаружены туннельное магнитосопротивление (ТМС), аномально высокий магнитокалорический эффект, снижение температуры Кюри (T_C) в сравнении в «объемными» материалами и др. Однако, несмотря на накопленный экспериментальный материал, для выявления закономерностей проявления ряда эффектов требуется проведение дополнительных исследований вследствие недостаточности и противоречивости имеющихся к настоящему времени данных. В частности, в работе

[4] было обнаружено значительное снижение намагниченности нанокристаллического никеля в процессе нагрева при 545 К, вследствие чего авторы сделали предположение об уменьшении T_C нанокристаллического никеля до 545 К. Позднее та же группа авторов, проведя повторные исследования, установила [5], что наблюдавшееся ранее при 545 К уменьшение намагниченности Ni является следствием наличия в структуре образцов примесного кислорода, поэтому нет никаких оснований полагать об изменении T_C нанокристаллического Ni. Тем не менее об изменении T_C Ni при его переходе в наноразмерное состояние сообщается в работе [6]. Теоретически о наличии зависимости T_C ферромагнитного материала от размера зерен (d) указывается в работе [7]. Таким образом, суммируя имеющиеся результаты, можно сделать вывод, что вопрос о существовании $T_C(d)$ зависимости не имеет однозначного ответа (так же, как не известен вид такой зависимости в случае ее существования), поэтому поиск решения данной проблемы является актуальной задачей.

Для успешного выполнения поставленной задачи в общем случае необходимо получить и исследовать серию образцов, содержащих в своем составе ферромагнитные частицы и отличающихся друг от друга: 1) элементным составом ферромагнитных частиц (Ni, Co, Fe), что позволит выявить наличие зависимости $T_C(d)$ для разных материалов; 2) размером наночастиц, который должен варьироваться от 1 нм до нескольких десятков нм, что позволит определить вид зависимости $T_C(d)$; 3) наличием поверхностного окисления магнитных частиц, что позволит установить влияние кислорода на величину T_C ферромагнетика.

Одним из вариантов получения малых ферромагнитных частиц, изолированных друг от друга в объеме немагнитной среды, является метод ионно-лучевого распыления комбинированных мишеней. К его достоинствам относятся возможность получения пленок ферромагнетик-диэлектрик с разным содержанием металла и, таким образом, возможность варьирования размера магнитных зерен. В работе приводятся исследования наноразмерных частиц никеля в матрице оксида ниобия.

Гребенников Антон Александрович – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник, тел. 8-903-6563101

Стогней Олег Владимирович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, тел. 8-920-2280201

Буловацкая Екатерина Олеговна – ВГТУ, магистрант, тел. 8-950-7740080

Семененко Константин Иванович – ВГТУ, аспирант, тел. 8-920-4060493

Ахмед Джавад Аль-Малики – ВГТУ, аспирант, тел. 8-920-4510199

Методика

В настоящей работе для получения малых ферромагнитных частиц никеля был использован метод ионно-лучевого распыления. Данный метод позволяет получать пленки толщиной до нескольких микрон, состоящие из ферромагнитных гранул нанометрового размера случайным образом распределенных в матрице диэлектрика. Важным условием для формирования такой гетерогенной структуры является отсутствие смешивания между атомами ферромагнетика и атомами элементов, образующих диэлектрик. В противном случае в процессе роста пленки возникнет взаимодействие атомов ферромагнетика с атомами диэлектрика, приводящее либо к образованию гомогенной структуры, либо к образованию нескольких немагнитных фаз.

В этой связи для получения гетерогенной структуры, содержащей ферромагнитные наноразмерные частицы никеля, в качестве диэлектрика был выбран оксид Nb_2O_5 . Энтальпия его образования составляет -1898 кДж/моль [8], что примерно в 6 раз превышает энтальпию образования оксида NiO . Это означает, что в процессе распыления исходных компонент и осаждения атомов на подложку наиболее вероятным является образование соединения кислород-ниобий, в то время как окисление никеля должно практически отсутствовать. Кроме того, при температурах ниже 800 К между никелем и ниобием отсутствует растворимость [9], поэтому в использованных условиях распыления формирование равновесной фазы никель-ниобий невозможно. Таким образом, из энергетических соображений и условий растворимости результатом самоорганизации попадающих на подложку атомов никеля, ниобия и кислорода должно явиться образование гетерогенной структуры, состоящей преимущественно из двух фаз: никель и оксид ниобия.

Исследованные образцы были получены методом ионно-лучевого распыления составной мишени, состоящей из никелевой основы с навесками Nb_2O_5 , в атмосфере аргона. Распыляемые компоненты одновременно осаждались на ситалловую подложку, формируя пленку $\text{Ni-Nb}_m\text{O}_n$, толщина которой в зависимости от концентрации никеля составляла от 3 до 4 мкм. Навески Nb_2O_5 были распределены на поверхности основы неравномерно, что позволило получить за один цикл напыления образцы в широком диапазоне концентрации металла.

Измерение концентрации химических элементов, входящих в состав композита, проводилось методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа. Измерения проводились на сканирующем рентгеновском микроанализаторе JXA-840 с погрешностью, не превышающей $1,5$ % от содержания измеряемого элемента.

Процессы перемангничивания образцов исследовались с помощью вибрационного магнитометра, магниторезистивные свойства - методом вольтметра-амперметра по двухзондовой схеме. Для исследования магниторезистивных свойств образцов $\text{Ni-Nb}_m\text{O}_n$ при 77 К использовался проточный крио-

стат. Погрешность измерений электрических и магнитных свойств не превышала 1% .

Результаты

Как известно, гетероструктуры ферромагнетик – диэлектрик проявляют суперпарамагнитные свойства и туннельное магнитосопротивление, если концентрация металлической фазы в них меньше критической (меньше значения порога перколяции). Качественно проявление суперпарамагнетизма обусловлено наличием в таких материалах слабо взаимодействующих друг с другом в магнитном отношении ферромагнитных наночастиц и не зависит от их (частиц) структурного состояния, формы или элементного состава. Поэтому обратимое изменение намагниченности образцов $\text{Ni}_x(\text{Nb}_m\text{O}_n)_{100-x}$ в изменяющемся магнитном поле (рис. 1), а также наличие ТМС, величина и знак которого не зависят от взаимной ориентации тока, протекающего через образец, и внешнего магнитного поля (рис. 2), является косвенным доказательством наличия в них гранулированной структуры.

Увеличение намагниченности насыщения образцов с ростом концентрации металла (рис. 1) является ожидаемым результатом, так как при этом в объеме пленки увеличивается число магнитных зерен и/или их размер.

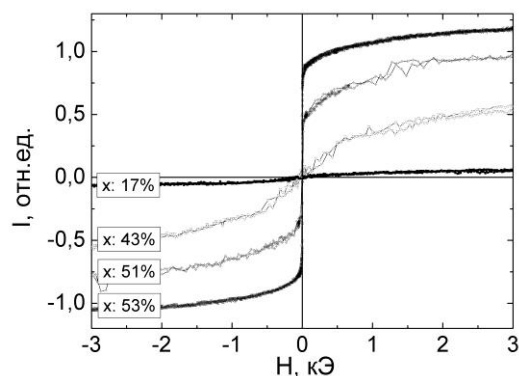


Рис. 1. Полевые зависимости намагниченности пленок $\text{Ni}_x(\text{Nb}_m\text{O}_n)_{100-x}$. Цифрами на кривых указана концентрация никеля в образце

Порог магнитной перколяции в исследуемой системе $\text{Ni}_x(\text{Nb}_m\text{O}_n)_{100-x}$ находится в интервале концентраций металла (x) 43 – 51 ат. % (рис. 1, рис. 3), что несколько выше аналогичного значения в исследованной ранее системе $\text{Ni}_x(\text{MgO})_{100-x}$ – 37 – 43 ат. % [10]. Предположительно, данная особенность может быть связана со значительным окислением частиц никеля в процессе роста пленки $\text{Ni}_x(\text{Nb}_m\text{O}_n)_{100-x}$. В этом случае состав диэлектрической матрицы Nb_mO_n должен существенно отличаться от стехиометричного Nb_2O_5 , а в ее структуре присутствовать большее число дефектов различного вида.

Малые значения ТМС, наблюдаемые в композитах $\text{Ni}_x(\text{Nb}_m\text{O}_n)_{100-x}$ при 293 К (рис. 2) подтверждают сделанное предположение. Как правило, в гранулированных композитах с магнитной фазой Ni абсолютная величина ТМС составляет около 1%

вблизи порога перколяции, снижаясь до 0,4% при уменьшении концентрации Ni до 30 ат.% [11,12], тогда как в исследованных образцах с содержанием металла 33 ат.% и 27 ат.% она не превышает 0,05%. Согласно существующим моделям максимальная величина ТМС в гранулированных структурах определяется значением коэффициента поляризации электронов в ферромагнитных гранулах, взаимным расположением их магнитных моментов (ММ) и шириной диэлектрического барьера [13]. Величину коэффициента поляризации в композитах ферромагнетик-диэлектрик с магнитной фазой Ni можно принять одинаковой, тогда как ширина барьера и взаимное расположение магнитных моментов гранул будут существенно зависеть от наличия слоя окисла и величины T_C соответственно: чем больше слой окисла на поверхности гранулы, тем больше ширина барьера и ниже ТМС. С другой стороны, чем ниже T_C гранулы, тем большее влияние на пространственную ориентацию ММ будет оказывать энергия кТ, увеличивая степень разориентации магнитных моментов, снижая тем самым величину ТМС. Кроме того, существенным фактором, влияющим на ТМС, может быть величина проводимости диэлектрического материала. Очевидно, что чем выше его собственная проводимость, которая не зависит от наличия или отсутствия магнитного поля, тем меньший вклад в общую проводимость через композит будет вносить спин-зависимый ток. В результате ТМС материала будет очень мало.

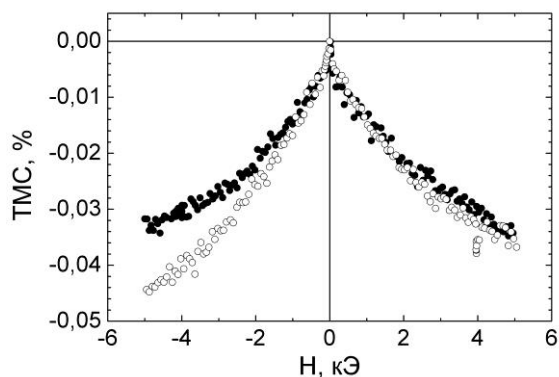


Рис. 2. Полевые зависимости магнитосопротивления образца $Ni_{34}(Nb_mO_n)_{66}$. $\circ$ – магнитное поле перпендикулярно току через образец; $\bullet$ – магнитное поле параллельно току через образец

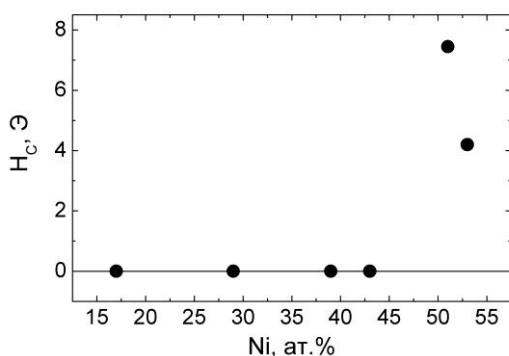


Рис. 3. Концентрационная зависимость коэрцитивной силы пленок $Ni_x(Nb_mO_n)_{100-x}$

Анализируя совокупность имеющихся результатов, можно сделать вывод, что все перечисленные факторы (отсутствие стехиометрии, высокая дефектность диэлектрической матрицы и наличие слоя окисла) реализованы в системе $Ni_x(Nb_mO_n)_{100-x}$ и вносят вклад в снижение величины ТМС, однако выделить влияние каждого из них по отдельности на данном этапе не представляется возможным.

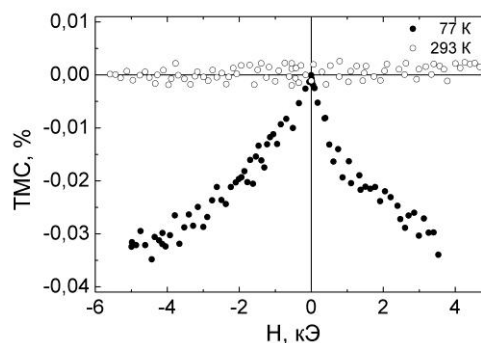


Рис. 4. Полевые зависимости магнитосопротивления образца $Ni_{27}(Nb_mO_n)_{73}$, измеренные при 293 К ($\circ$) и 77 К ($\bullet$)

Вывод о низком значении T_C ферромагнитных зерен Ni в композитах $Ni_x(Nb_mO_n)_{100-x}$ следует из результатов измерений магниторезистивных свойств образца $Ni_{27}(Nb_mO_n)_{73}$, выполненных при температуре 293 К и 77 К (рис. 4). При 293 К в образце отсутствует ТМС, тогда как с уменьшением температуры до 77 К оно появляется. Абсолютная величина ТМС при 77 К мала и составляет около 0,03%, что нехарактерно для гранулированных систем с магнитной фазой Ni, однако полученное значение согласуется с величинами ТМС, наблюдавшимися при 77 К в системе $Ni_x(MgO)_{100-x}$ [10], для которой было выявлено значительное уменьшение T_C зерен никеля.

Следует отметить, что при 293 К в образцах $Ni_x(Nb_mO_n)_{100-x}$ с $x > 17$ ат.% Ni при наложении внешнего магнитного поля появляется отличный от нуля магнитный момент (рис. 1), то есть при 293 К реализуется суперпарамагнитное состояние. Отсутствие при 293 К ТМС в образцах $Ni_x(Nb_mO_n)_{100-x}$ с небольшим содержанием никеля и наличие в них магнитных свойств предположительно обусловлено большим разбросом по размеру зерен никеля, что связано с разной степенью их окисления. Чем больше окислена гранула (то есть, чем глубже кислород проник в объем зерна, образовав слой окисла), тем меньше величина ферромагнитной (неокисленной) ее части. Таким образом, в объеме пленки $Ni_{27}(Nb_mO_n)_{73}$ присутствуют гранулы никеля с разным значением T_C . Часть из них ферромагнитна при 293 К (их $T_C > 293$ К), поэтому намагниченность образца в магнитном поле отлична от нуля (рис. 1), другая часть неферромагнитна (их $T_C < 293$ К), в этой связи магниторезистивный эффект стремится к нулю (рис. 4). Суммируя вышеизложенное, можно предположить, что наличие примесного кислорода в ферромагнитной грануле напрямую не влияет на величину T_C , однако может существенно изменить размер неокисленной части гранулы, что в свою очередь будет влиять на величину T_C .

Выводы

1. Методом ионно-лучевого распыления составной мишени получены гетерогенные структуры $\text{Ni}_x(\text{Nb}_m\text{O}_n)_{100-x}$ в широком интервале концентрации металлической фазы ($16 < x < 53$ ат.%), содержащие в своем объеме наноразмерные гранулы никеля.

2. Порог магнитной перколяции в исследуемой системе $\text{Ni}_x(\text{Nb}_m\text{O}_n)_{100-x}$ находится в интервале концентраций металла (x) 43-51 ат.%, что несколько выше аналогичного значения в исследованной ранее системе $\text{Ni}_x(\text{MgO})_{100-x}$ (37-43 ат.%). Предположительно данная особенность может быть связана со значительным окислением частиц никеля в процессе роста пленки $\text{Ni}_x(\text{Nb}_m\text{O}_n)_{100-x}$.

3. Значения туннельного магнитосопротивления, наблюдаемые в образцах $\text{Ni}_x(\text{Nb}_m\text{O}_n)_{100-x}$, в несколько раз меньше аналогичных значений, характерных для гранулированных композитов с магнитной фазой Ni. Предположительно это обусловлено отсутствием стехиометрии и высокой дефектностью диэлектрической матрицы, наличием слоя окисла и низкими значениями T_C ферромагнитных гранул никеля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 15-02-05920.

Литература

1. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства [Текст] / С.П. Губин, Ю.А. Кокшаров, Г.Б. Хомутов, Г.Ю. Юрков // Успехи химии. - 2005. - Т. 74. - № 6. - С. 539-574.
2. Frenkel, J. Spontaneous and induced magnetisation in ferromagnetic bodies [Text] / J. Frenkel, J. Dorfman // Nature. - 1930. - Vol. 126. - P.274-275.

3. Heaps, C.W. Optical and Magnetic Properties of a Magnetite Suspension [Text] / C.W. Heaps // Physical Review. 1940. - Vol. 57. - P. 528-531.

4. Schaefer, H.E. Magnetic properties of nanocrystalline nickel [Text] / H.E. Schaefer, H. Kisker // Nanostructured Materials. - 1992. - Vol. 1. - P. 523-529.

5. Kisker, H. Magnetic properties of high purity nanocrystalline nickel [Text] / H. Kisker, H.E. Schaefer // Nanostructured Materials. - 1995. - Vol. 6. - P. 925-928.

6. Lu, H.M. Size-dependent Curie transition of Ni nanocrystals [Text] / H.M. Lu, P.Y. Li // Journal of Applied Physics. - 2009. - Vol. 105.

7. Yang, C.C. Size and interface effects on critical temperatures of ferromagnetic, ferroelectric and superconductive nanocrystals [Text] / C.C. Yang, Q. Jiang // Acta Materialia. - 2005. - Vol. 53. - P. 3305-3311.

8. Рабинович, В.А. Краткий химический справочник [Текст] / В.А. Рабинович, З.Я. Хавин. - Л.: Химия, 1978. - 392 с.

9. Лякишев, Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем [Текст] / Н.П. Лякишев. - М.: Машиностроение, 2001. Т.3, Кн. 1. - 872 с.

10. Grebennikov, A.A. Size effect in $\text{Ni}_x(\text{MgO})_{100-x}$ nanocomposites [Text] / A.A. Grebennikov, O.V. Stognei // Solid State Phenomena. - 2011. - Vol. 168-169. - P.361-364.

11. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах [Текст] / С.А. Гриднев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.В. Стогней. - М: Бином. Лаборатория знаний, 2012. - 352 с.

12. DelBianco, L. Magnetoresistance of nanogranular Ni/NiO controlled by exchange anisotropy [Text] / L. DelBianco, F. Spizzo, M. Tamisar, P. Allia // JMMM. - 2013. - Vol. 339. - P. 94-99.

13. Inoue, J. GMR, TMR, BMR, and Related Phenomena [Text] / J. Inoue // Nanomagnetism and Spintronics, second ed. Elsevier, 2014. - P.15-106.

Воронежский государственный технический университет

MAGNETIC PROPERTIES OF NICKEL NANOPARTICLES IN THE NIOBIUM OXIDE MATRIX

A.A. Grebennikov, O.V. Stognei, E.O. Bulovatskaya, K.I. Semenenko, A.J. Al-Maliki

Heterogeneous ferromagnetic-insulator materials containing nanosized Ni particles have been obtained by ion-beam sputtering of composite target consisting of a nickel base and plates from Nb_2O_5 . The nickel concentration in the obtained $\text{Ni}_x(\text{Nb}_m\text{O}_n)_{100-x}$ samples varies in the range of 17 - 54 at.%. It was found that the values of the tunneling magnetoresistance (TMR), observed in the $\text{Ni}_x(\text{Nb}_m\text{O}_n)_{100-x}$ samples, are several times less than similar TMR values in other nickel based composites with another dielectric matrix. The samples with low Ni content does not exhibit TMR, although their magnetization in a magnetic field is nonzero at room temperature. Cooling of these samples to 77 K leads to appearance of the TMR effect. Presumably these features are associated with high defect of the dielectric matrix, presence of the oxide layer on the surface of metal granules, low values of Curie temperature and large spread in size of the nickel granules

Key words: nanocomposite, Curie temperature, tunneling magnetoresistance, ferromagnetism

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ СПИРТОВЫХ СУСПЕНЗИЯХ НАНОПОРОШКОВ ОКСИДА МЕДИ И УГЛЕРОДНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕХАНОАКТИВАЦИИ

Ю.В. Панин, С.Ю. Панков

В работе исследовано формирование структуры высококонцентрированных спиртовых суспензий оксида меди и углеродных нанотрубок под воздействием механоактивации. Показано, что технологические приёмы приготовления суспензий определяют структуру и термоэлектрические характеристики получаемых композитов

Ключевые слова: оксиды меди, углеродные нанотрубки, механоактивация, электропроводность, термоэдс

Введение

Разработка новых высокоэффективных и в то же время экологически чистых термоэлектрических материалов на основе потенциальных термоэлектриков представляет большой научный и практический интерес.

В работе [1] показано, что термоэлектрический материал на основе потенциальных термоэлектриков оксидов меди и электропроводящего углеродного наполнителя должен представлять собой механическую смесь, в которой компоненты практически не взаимодействуют друг с другом в широком интервале температур, сохраняя в смеси свои индивидуальные свойства. При этом одним из определяющих условий получения такого термоэлектрического композита является использование монодисперсных исходных порошков оксидов меди и углеродного наполнителя со сферическими наноразмерными частицами, диаметр которых для оксидов меди не должен превышать 17 нм, а диаметр частиц углеродного наполнителя – 4 нм при концентрации наполнителя 5,13 об.%.

Кроме того, в получаемом композите должны отсутствовать поры от микро- до нанометровых размеров, так как указанные дефекты затрудняют прыжковый механизм электрической проводимости, усиливая барьер для переноса электронов. Таким образом, получение данного термоэлектрического композита является комплексной технологической задачей, его структура и свойства формируются на протяжении всей технологической цепочки. Одним из способов получения композитов является использование методов растворной технологии, одной из стадий которой является приготовление суспензий из высокодисперсных порошков матричного потенциального термоэлектрика и углеродного наполнителя в различных дисперсионных средах. При этом технологические режимы приготовления суспензий исходных порошков оксида меди и углеродного наполнителя являются наиболее ответственными за

формирование структуры получаемого композита с указанными характеристиками.

Целью данной работы является исследование процессов формирования структуры высококонцентрированных спиртовых суспензий оксидов меди и углеродных нанотрубок (УНТ) под воздействием механоактивации и их влияния на свойства получаемых термоэлектрических композитов.

Материалы и методика эксперимента

Для исследований использовался наноразмерный порошок оксида меди, разработанный предприятием ООО «Передовые порошковые технологии» (г. Томск) методом электрического взрыва медного проводника в атмосфере воздуха. По данным производителя порошок содержит не менее 99,8 масс.% оксидных фаз CuO и Cu_2O . Содержание других элементов не превышает 0,05 масс.%. Частицы порошка имеют сферическую форму, средний диаметр частиц составляет 90 нм. Диапазон распределения частиц по размерам находится в пределах от 15 до 160 нм. Отдельные частицы порошка образуют микроагломераты.

Таким образом, выбранный для экспериментов наноразмерный порошок оксида меди не соответствует указанным выше требованиям по дисперсности и диапазону распределения частиц по размерам. Тем не менее указанный порошок оксида меди может быть получен в больших количествах, что имеет большое значение для практического применения и отработки технологии получения термоэлектрических композитов. Производство порошков оксидов меди с требуемыми характеристиками в настоящее время не существует, а известные методики выделения фракций с узким диапазоном распределения по размерам крайне трудоёмки.

В качестве электропроводящего наполнителя использовались многослойные УНТ «Таунит», производимые предприятием ООО «НаноТехЦентр» (г. Тамбов). По данным производителя единичные УНТ имеют наружный диаметр 20-70 нм, внутренний диаметр 5-10 нм и длину более 2 мкм. УНТ образуют агломераты на стадии их синтеза. Таким образом, выбранные в качестве наполнителя оксидной матрицы УНТ также не соответствуют указанным

Панин Юрий Васильевич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: Yu.panin62@yandex.ru

Панков Сергей Юрьевич – ВГТУ, аспирант, e-mail: srgpank@mail.ru

выше требованиям, предъявляемым к наполнителю по дисперсности, форме и диапазону распределения частиц по размерам.

Изготовление образцов осуществляли по схеме: приготовление высококонцентрированной спиртовой суспензии из нанопорошков оксида меди и УНТ – литьё полученной суспензии в металлическую пресс-форму – удаление дисперсионной среды – холодное прессование – горячее прессование – отжиг. Холодное прессование для получения компактов размером 10x10x20 мм проводили методом двустороннего одноосного прессования при давлении 350 МПа. Горячее прессование полученных компактов проводили при температуре 370 °С и давлении 500 МПа.

Важнейшим этапом в получении термоэлектрических композитов по разрабатываемой технологии является приготовление высококонцентрированной суспензии из нанопорошков оксида меди и углеродных нанотрубок. К основным характеристикам приготавливаемой суспензии, которые определяют технологические свойства при её переработке и оказывают влияние на свойства получаемых композитов, относятся: размер частиц и их полидисперсность, природа и свойства диспергируемых частиц, природа и состав дисперсионной среды, особенности поверхности раздела частица-дисперсионная среда, объемное содержание дисперсной фазы. При этом размер частиц и их полидисперсность определяют реологические свойства и агрегативную устойчивость суспензии.

Растворимость УНТ в различных полярных и неполярных дисперсионных средах является довольно низкой, вследствие чего получаемые суспензии имеют плохую устойчивость [2]. Устойчивость суспензий УНТ достигается различными способами модифицирования УНТ, которые осуществляются путем присоединения к поверхности УНТ тех или иных функциональных групп, обеспечивающих совместимость УНТ с дисперсионной средой, а также за счёт укорачивания слишком длинных УНТ различными методами.

В работах [3,4] описан способ модифицирования УНТ путем их укорачивания, которое достигается продолжительной механической обработкой УНТ в различных дисперсионных средах или в замороженных матрицах.

Седиментационная устойчивость суспензий определяется законом Стокса, согласно которому скорость седиментации прямо пропорциональна квадрату радиуса частиц, разности плотностей частиц и дисперсионной среды и обратно пропорциональна вязкости среды:

$$V=2\,r^2\,g\,(d_1-d_2)/9\,\eta\,,$$

где V – скорость седиментации, см/с; r – радиус частиц, см; g – ускорение свободного падения, см/с²; d_1, d_2 – плотность дисперсной фазы и дисперсионной среды, г/см³; η – вязкость среды, Па·с.

Из закона Стокса следует: чем выше степень измельчения частиц и больше вязкость среды, тем

выше седиментационная устойчивость суспензий. Кроме того, устойчивость суспензий зависит от степени сродства дисперсной фазы к дисперсионной среде и наличия электрического заряда частиц. В суспензиях частицы твердой фазы в случае хорошей смачиваемости дисперсионной средой покрыты сольватными оболочками, которые препятствуют коалесценции частиц, т. е. суспензии веществ с леофильными свойствами. Поэтому введение поверхностно-активных веществ не требуется.

В наших исследованиях для получения высококонцентрированных суспензий из порошков оксида меди и УНТ использовали метод механического измельчения и смешивания компонентов в энергонапряжённых шаровых планетарных мельницах как наиболее простой и эффективный способ получения компонентов с нанометровыми размерами частиц [5]. Приготовление суспензий осуществлялось по двум вариантам. По первому варианту исходные порошки оксида меди и УНТ измельчались и смешивались совместно в высокоэнергетической планетарной мельнице АГО-3 в этиловом спирте. Обработка проводилась при отношении веса шаров из стали ШХ-15 диаметром 7 мм к весу материала 5:1 в течение 5, 10, 20 и 30 мин. В процессе механоактивации происходит разрушение агломератов, измельчение исходных частиц оксида меди и УНТ, активация их поверхности и усреднение размеров частиц компонентов.

Выбор приготовления суспензии по первому варианту основывается на результатах проведенных исследований, позволяющих рассматривать высококонцентрированную суспензию углеродного наполнителя в этиловом спирте как композиционный материал с жидкой матрицей. Геометрические параметры структуры такого композита соответствуют параметрам структуры, полученной теоретическим расчётом. Замена жидкой матрицы на оксидную матрицу с теми же геометрическими параметрами позволит получить термоэлектрический материал с желаемыми характеристиками. Реализация такого композита возможна, так как частицы и агломераты оксидов меди являются хрупкими и механически непрочными и легко разрушаются при внешнем механическом воздействии. При этом в жидких средах образуется коллоид нанокристаллов оксидов меди диаметром 10-15 нм [6]. УНТ также являются хрупкими и могут быть разрушены при механическом воздействии на частицы, средний диаметр которых составляет 15-25 нм.

По второму варианту отдельно приготавливали суспензию порошка УНТ в этиловом спирте. Приготовленную суспензию УНТ в требуемом количестве добавляли в приготовленную суспензию порошка оксида меди в этиловом спирте и смешивали в течение 5 мин. Причём суспензию из порошка оксида меди в этиловом спирте приготавливали в обычной планетарной мельнице при режиме, обеспечивающем только диспергирование агломератов с сохранением размеров и сферической формы частиц исходного порошка.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1 показано распределение частиц по размерам исходного порошка УНТ, полученное методом динамического светорассеяния на приборе «Nanotracer» [7].

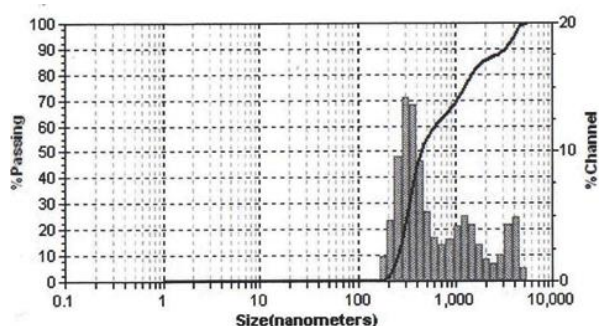


Рис. 1. Распределение исходного порошка УНТ по размерам

Из полученных данных видно, что диапазон распределения исходных УНТ по размерам находится в пределах от 204 до 5500 нм, что не соответствует указанным выше требованиям, предъявляемым к размерам частиц проводящего наполнителя. Средний размер частиц по трём модам составляет соответственно 351 нм, 1296 нм и 3840 нм с объёмной долей соответственно 64,2 %, 23,1 % и 12,7 %.

На рис. 2 показано распределение частиц УНТ по размерам, прошедших механическую активацию в высокоэнергетической планетарной мельнице АГО-3. Полученные данные показывают, что суспензия имеет более узкий диапазон распределения частиц по размерам в пределах от 72 до 409 нм с объёмной долей 100 %. Средний размер частиц составляет 169 нм. Очевидно, что в процессе механической активации УНТ измельчаются и объединяются в более мелкие агломераты. Полученная суспензия УНТ в этиловом спирте имеет более высокую устойчивость. Данный эффект можно объяснить тем, что в процессе механической активации происходит разрушение УНТ с образованием новых ювенильных поверхностей, которые обладают повышенной активностью, приводящей к увеличению смачиваемости поверхности частиц этиловым спиртом и их пространственному разделению. Тем не менее, как видно из рис. 2, применение метода механической активации не позволяет до конца решить проблему образования агломератов, так как получаемые суспензии агрегативно неустойчивы. Даже слабо связанные образующиеся агломераты не позволяют достичь необходимой плотности и требуемой равномерности распределения компонентов в получаемой для формования шихте.

На рис. 3 показано распределение по размерам агломератов $\text{Cu}_2\text{O}/\text{УНТ}$ в зависимости от времени механоактивации, полученное в среде этилового спирта при помощи прибора Nanosizer ZS (Malvern Instruments). Из полученных данных видно, что с увеличением времени механоактивации в энергонапряженной планетарной мельнице размер агломе-

тов увеличивается. Это объясняется тем, что в процессе механоактивации происходят разрушение и уменьшение характерных размеров частиц оксида меди, а также уменьшение размеров и формы УНТ в сторону их округления. Вследствие разрушения образуются новые ювенильные поверхности, обладающие повышенной активностью и способностью образовывать композиционные агломераты, в которых частицы углеродного наполнителя равномерно распределены в объёме частиц оксида меди, занимающих больший объём. В зависимости от свойств дисперсионной среды и физико-химических свойств образующихся поверхностей частиц, а также возрастающей вязкости достигается равномерное распределение углеродного наполнителя в объёме оксида меди в каждой агломерированной композитной частице.

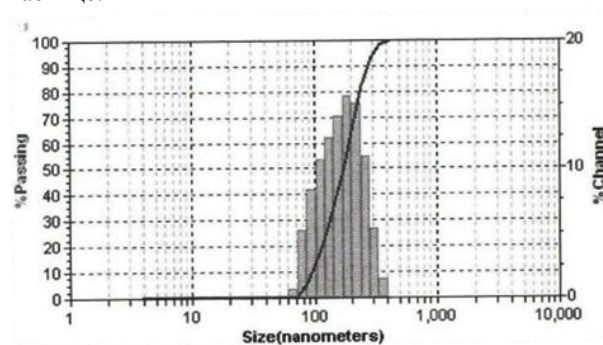


Рис. 2. Распределение по размерам УНТ после механоактивации

Вследствие возросшей вязкости при прекращении механоактивации состояние суспензии оказывается зафиксированным. После удаления дисперсионной среды агломераты образуют композиционный порошок (шихту).

Из полученной по двум вариантам шихты изготавливались образцы термоэлектрического материала. Измерение коэффициента термоэдс проводили дифференциальным методом на лабораторной установке при комнатной температуре. Измерения удельного электрического сопротивления проводили двухзондовым методом при комнатной температуре. Образцы квадратной формы имели площадь поперечного сечения 1 см^2 и толщину 5 мм. Контактные поверхности покрывались сплавом In-Ga эвтектического состава.

На рис. 4 показана зависимость термоэдс от концентрации углеродного наполнителя в композитах $\text{Cu}_2\text{O}/\text{УНТ}$, полученных по первому и второму вариантам, приготовления суспензий. Известно, что электрические свойства оксида меди определяются степенью окисления [8]. Приведенные данные показывают, что использованные технологические приёмы позволили сохранить высокие значения термоэдс композита, присущие исходному оксиду меди.

Величина термоэдс композитов, полученных из суспензий, приготовленных по первому варианту, с увеличением концентрации УНТ снижается и находится в пределах от 1126 мкВ/К до 1010 мкВ/К. Величина термоэдс композитов, полученных из суспензий, приготовленных по второму варианту, с

увеличением концентрации УНТ снижается более интенсивно и находится в пределах от 1120 мкВ/К до 890 мкВ/К. Снижение величины термоэдс с увеличением концентрации УНТ объясняется влиянием УНТ как слабо восстановительной среды. В целом величина термоэдс полученных композитов находится на уровне исходного оксида меди.

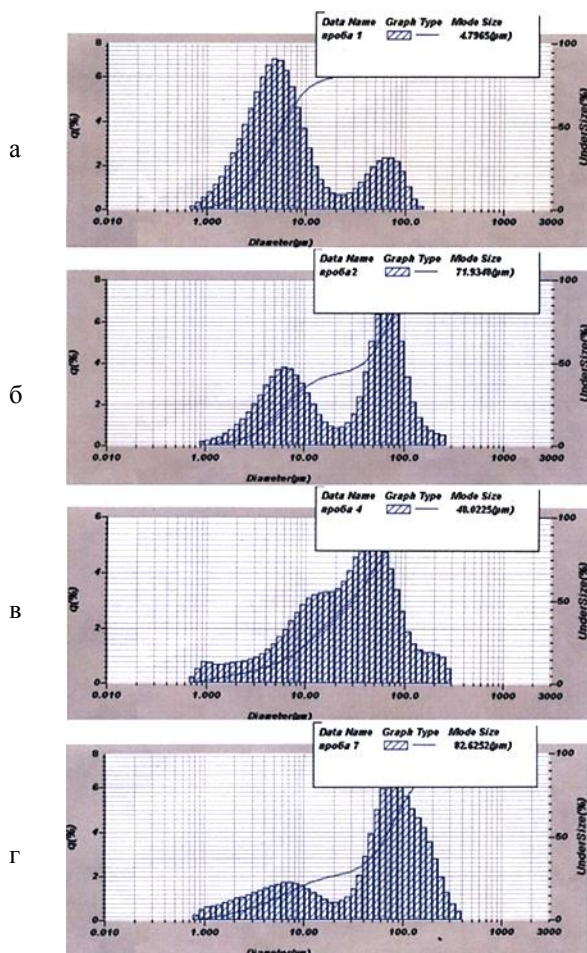


Рис. 3. Распределение по размерам агломератов $\text{Cu}_2\text{O}/\text{УНТ}$ в зависимости от времени механоактивации (а – 5 мин.; б – 10 мин.; в – 20 мин.; г – 30 мин.)

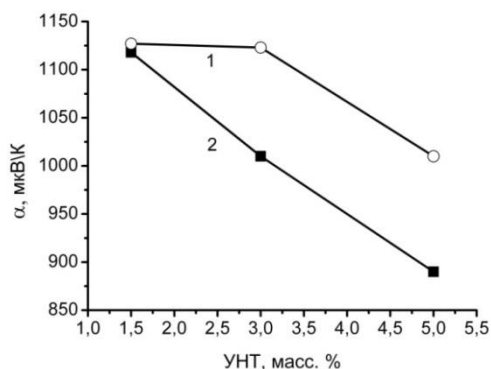


Рис. 4. Зависимость термоэдс от концентрации УНТ в композите $\text{Cu}_2\text{O}/\text{УНТ}$ при температуре 293К: 1- по первому технологическому варианту; 2- по второму технологическому варианту

На рис. 5 показана зависимость удельного электрического сопротивления от концентрации

УНТ в композите $\text{Cu}_2\text{O}/\text{УНТ}$. Результаты исследований показывают, что удельное электрическое сопротивление композита, полученного из суспензии, приготовленной по первому варианту, резко снижается при увеличении концентрации углеродного наполнителя до 3 масс.%, от 5,3 кОм·м до 0,6 кОм·м (примерно на порядок), а при увеличении концентрации углеродного наполнителя до 5 масс. % возрастает до 0,7 кОм·м. Одной из причин повышения удельного электрического сопротивления является возрастание пористости получаемого композита вследствие ухудшения прессуемости шихты, состоящей из наноразмерных частиц компонентов.

Композиты, полученные из суспензии, приготовленной по второму варианту, имеют более низкое удельное электрическое сопротивление, плавно снижающееся с увеличением концентрации углеродного наполнителя от 0,9 кОм·м до 0,15 кОм·м, хотя имеют более высокую остаточную пористость. Предположительно, объяснение этому состоит в том, что суспензии из порошков оксида меди и УНТ в этиловом спирте приготавливались отдельно. Причём суспензия из оксида меди приготавливалась по режимам, обеспечивающим только разрушение агломератов и сохранение сферической формы частиц. Сферические частицы оксида меди образуют межчастичные пространства, эффективный размер которых пропорционален диаметрам частиц [1].

Межчастичные пространства заполнены агломератами УНТ, которые имеют средний диаметр, сопоставимый со средним диаметром межчастичных пространств. Электропроводность агломератов обеспечивается по перколяционному механизму и зависит от состояния контактов между частицами. Качественный контакт обеспечивается в процессе прессования при получении композита.

На рис. 6 показана зависимость пористости от концентрации УНТ в композите $\text{Cu}_2\text{O}/\text{УНТ}$. Кажущаяся пористость полученных композитов определялась по массе образца и его геометрическим размерам. Приведенные на рис. 6 данные показывают, что пористость полученных композитов по первому варианту возрастает в зависимости от концентрации

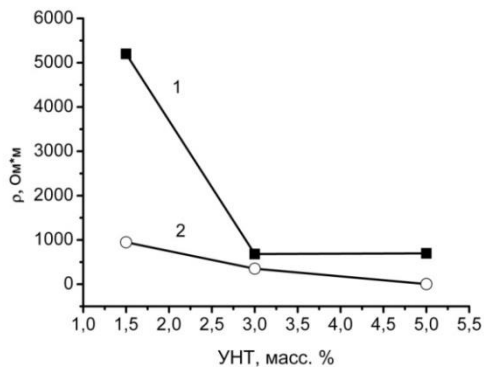


Рис. 5. Зависимость удельного электрического сопротивления от концентрации УНТ в композите $\text{Cu}_2\text{O}/\text{УНТ}$ при температуре 293К: 1- по первому технологическому варианту; 2- по второму технологическому варианту

углеродного наполнителя с 2,2 до 23,1 %, а полученных по второму варианту - с 1,1 до 16,7 %. Причиной высокой остаточной пористости является плохая прессуемость шихты, состоящей из наноразмерных порошковых композитов. Остаточная пористость приводит к увеличению контактных расстояний между частицами углеродного наполнителя, затрудняющего электрический транспорт по прыжковому механизму.

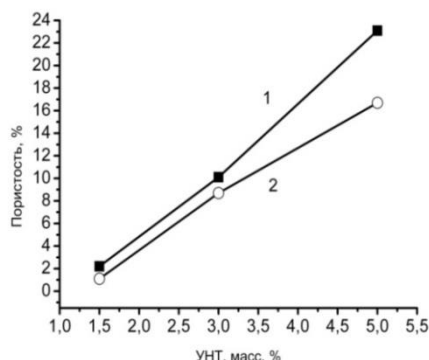


Рис. 6. Зависимость пористости от концентрации УНТ в композите $\text{Cu}_2\text{O}/\text{УНТ}$: 1- по первому технологическому варианту; 2 - по второму технологическому варианту

Выводы

Проведенные исследования показали, что электрическая проводимость и термоэдс получаемых термоэлектрических композитов определяются технологическими режимами приготовления высококонцентрированной спиртовой суспензии исходных компонентов. Исследованные технологические режимы приготовления высококонцентрированной спиртовой суспензии обеспечивают получение наноразмерной порошковой шихты, которая плохо прессуется. Получаемые композиты $\text{Cu}_2\text{O}/\text{УНТ}$ имеют большую пористость при реализованных режимах прессования. Остаточная пористость приводит к увеличению контактных расстояний между частицами углеродного наполнителя, что затрудняет электрический транспорт по прыжковому механизму. Основной проблемой на данном этапе получе-

ния эффективных термоэлектрических материалов на основе оксидов меди и углеродного наполнителя является достижение минимального значения среднего расстояния между частицами углеродного наполнителя в оксидной матрице. Эта задача может быть решена путём получения композитов с плотностью, близкой к теоретической, за счёт использования более жёстких режимов уплотнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-97520)

Литература

1. Панин, Ю.В. Проблемы компактирования нанопорошков для получения термоэлектрических материалов [Текст] / Ю.В. Панин, В.А. Макагонов // XIII Межгосударственный семинар. Термоэлектрики и их применения. - СПб.: ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, 2013. - С. 232-237.
2. Ham, H.T. An explanation of dispersion states of single-walled carbon nanotubes in solvents and aqueous surfactant solutions using solubility parameters [Text] / H.T. Ham, Y.S. Choi, I.J. Chung // Colloid Interface Sci. - 2005. - Vol. 286 - P. 216-223.
3. Electrochemical hydrogen storage properties of ball-milled multi-wall carbon nanotubes [Text] / Y. Wang, W. Deng, X. Liu, X. Wang // International journal of hydrogen energy. - 2009. - Vol. 34. - P. 1437-1443.
4. Short carbon nanotubes produced by cryogenic crushing [Text] / J. Lee, T. Jeong, J. Neo // Carbon. - 2006. - Vol. 44. - P. 2984-2989.
5. Исследование электрической проводимости в спиртовых суспензиях многослойных углеродных нанотрубок [Текст] / Ю.В. Панин, Ю.П. Прилепо, Ж.Н. Торба, А.Г. Чуйко // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. - Т.8. - №2. - С.70-72.
6. Коршунов, А.В. Особенности окисления нанопорошков меди при нагревании в воздухе [Текст] / А.В. Коршунов, А.П. Ильин // Известия Томского политехнического университета. - 2008. - Т. 313. - № 3. - С. 5-13.
7. ISO 13321: международный стандарт.
8. Scalable ceramic lasers [Text] / K.K.Ueda, J.F. Bisson, H.Yadi, K. Takaichi, A.A. Kamiskii // Laser Phys. - 2005. - Vol. 7. - № 15. - P. 927-938.

Воронежский государственный технический университет

INVESTIGATION OF STRUCTURE FORMATION PROCESSES IN HIGHLY CONCENTRATED ALCOHOL SUSPENSION COPPER OXIDE NANOPOWDERS AND CARBON FILLERS UNDER CONDITIONS OF MECHANOAKTIVATION

Yu.V. Panin, S.Yu. Pankov

We have investigated the formation of the structure of highly concentrated alcohol suspension of copper oxide and carbon nanotubes under the influence of mechanical activation. It is shown that technological methods of preparation of suspensions determine the structure and thermoelectric characteristics of the resulting composite

Key words: copper oxides, carbon nanotubes, mechanoactivation, electrical resistivity, thermopower

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ В КИРАЛЬНЫХ СРЕДАХ

К.П. Пискунов, О.А. Соколова, А.В. Тишуков, А.П. Ярыгин

На основе модельных представлений о физической природе плотности тока проводимости в киральных средах и применения новых нормирующих условий для вспомогательных векторных и скалярных потенциалов предложен методический аппарат описания гармонических полей в произвольных неоднородных киральных средах

Ключевые слова: киральная среда, диэлектрическая и магнитная проницаемость, параметр гирации

Для исследования электродинамических свойств киральных сред и структур недостаточно двух общепринятых материальных параметров – диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей, поскольку дополнительно (по аналогии с молекулярной теорией оптически активных сред) вводится параметр, характеризующий киральность среды β (в оптике – параметр гирации).

Необходимо отметить, что материальные уравнения, связывающие векторы электрической $\vec{D}$ и магнитной $\vec{B}$ индукции с напряженностями электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{H}$ полей через параметры ϵ , μ и β , могут принимать различный вид. При этом известны материальные уравнения Поста, Теллеге́на, Кондо́на, Борна-Федоро́ва и др., которые формально равносильны в том смысле, что они феноменологически верно описывают (электромагнитную) активность однородной киральной среды. Однако, как было показано в [1], с позиций закона сохранения энергии единственной формой, удовлетворяющей данному закону, является форма материальных уравнений Борна-Федоро́ва, которая имеет следующий вид:

$$\vec{D} = \epsilon(\vec{E} + \text{rot} \vec{E}), \quad \vec{B} = \mu(\vec{H} + \beta \text{rot} \vec{H}), \quad (1)$$

которые в совокупности с системой уравнений Максвелла:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{H} &= -ik\vec{D} + \frac{4\pi}{c} \vec{J}; \quad \text{rot} \vec{E} = ik\vec{B}; \\ \text{div} \vec{B} &= 0; \quad \text{div} \vec{D} = 4\pi\rho, \end{aligned} \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; ρ – объемная плотность электрических зарядов в среде, $\vec{J}$ – плотность тока проводимости, образуют полную систему уравнений, описывающих распространение ЭМВ в киральных средах.

Развивая методологию решения задач распространения электромагнитных волн в киральных средах, представим плотность тока проводимости $\vec{J}$ в виде суммы плотностей линейного ($\vec{J}_L$) и циркулярного ($\vec{J}_R$) токов проводимости [2]:

$$\vec{J} = \vec{J}_L + \vec{J}_R = \sigma(\vec{E} + \beta \text{rot} \vec{E}), \quad (3)$$

$$\vec{J}_L = \sigma \vec{E}, \quad (4)$$

$$\vec{J}_R = \beta \sigma \cdot \text{rot} \vec{E}. \quad (5)$$

Подставив выражения (3-5) в систему уравнений Максвелла для киральной среды, можно переписать ее в следующем обобщенном виде:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{H} &= -ik\epsilon(\vec{E} + \beta \cdot \text{rot} \vec{E}); \\ \text{rot} \vec{E} &= ik\mu(\vec{H} + \beta \cdot \text{rot} \vec{H}); \\ \text{div} [\epsilon(\vec{E} + \beta \cdot \text{rot} \vec{E})] &= 0; \\ \text{div} [\mu(\vec{H} + \beta \cdot \text{rot} \vec{H})] &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где точки над ϵ и μ означает их комплексность (т.е. введем в рассмотрение поглощение киральной среды).

Для разрешения системы (6) традиционно [2] будем исходить из соленоидальности векторов $\epsilon(\vec{E} + \beta \cdot \text{rot} \vec{E})$ и $\mu(\vec{H} + \beta \cdot \text{rot} \vec{H})$, из чего следует, что эти векторы можно представить с помощью некоторых других векторов в виде

$$\begin{aligned} \epsilon(\vec{E} + \beta \cdot \text{rot} \vec{E}) &= \text{rot} \vec{A}^*, \\ \mu(\vec{H} + \beta \cdot \text{rot} \vec{H}) &= \text{rot} \vec{A}. \end{aligned} \quad (7)$$

Пискунов Константин Павлович - ГИИИПЗИ ФСТЭЖ России, канд. техн. наук, нач. отдела, тел. (4732) 244-76-38
Соколова Ольга Анатольевна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. (4732) 244-76-38
Тишуков Андрей Владимирович - ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», адъюнкт, e-mail: aboltys2006@mail.ru
Ярыгин Анатолий Петрович - ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», д-р техн. наук, профессор, тел. (4732) 244-76-38

Подставляя (7) в (6), получим $\text{rot}(\vec{H} + ik\vec{A}^*) = 0$ и $\text{rot}(\vec{E} - ik\vec{A}) = 0$, т.е. векторы $\vec{H} + ik\vec{A}^*$ и $\vec{E} - ik\vec{A}$ являются потенциальными, поскольку дифференциальная операция rot определяется с точностью до градиента произвольной скалярной функции $\zeta^{(*)}$ (т.к. $\text{rot}\nabla\zeta^{(*)} = 0$). Следовательно, векторы $\vec{H}$ и $\vec{E}$ могут быть выражены через некоторые векторный и скалярный электродинамические потенциалы в следующем виде:

$$\begin{aligned}\vec{H} &= -ik\vec{A}^* - \nabla\zeta^*; \\ \vec{E} &= ik\vec{A} - \nabla\zeta.\end{aligned}\quad (8)$$

Подставив (8) в уравнения (6) и воспользовавшись произвольным характером задания векторных и скалярных потенциалов, находим, что при выполнении нормирующих условий:

$$ik\beta\text{rot}\vec{A} = \nabla\zeta, \quad (9)$$

$$-ik\beta\text{rot}\vec{A}^* = \nabla\zeta^*, \quad (10)$$

уравнения (6) могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned}\text{rot}\vec{A} &= -ik\dot{\mu}\vec{A}^*, \quad \text{rot}\vec{A}^* = -ik\dot{\epsilon}\vec{A}; \\ \text{div}[\dot{\epsilon}\vec{A}] &= 0, \quad \text{div}[\dot{\mu}\vec{A}^*] = 0.\end{aligned}\quad (11)$$

Если в (11) ввести новые переменные $\vec{E}_л = ik\vec{A}$ и $\vec{H}_л = ik\vec{A}^*$, имеющие размерность напряженностей электрического и магнитного полей, то исходной системе уравнений Максвелла для гиротропных сред (6) можно поставить в соответствие характеристическую систему уравнений для некоторых локальных электрических и магнитных полей [2]:

$$\begin{aligned}\text{rot}\vec{E}_л &= -ik\dot{\mu}\vec{H}_л, \quad \text{rot}\vec{H}_л = ik\dot{\epsilon}\vec{E}_л; \\ \text{div}[\dot{\epsilon}\vec{E}_л] &= 0, \quad \text{div}[\dot{\mu}\vec{H}_л^*] = 0.\end{aligned}\quad (12)$$

При этом напряженности магнитных и электрических полей исходной системы (6) могут быть выражены через введенные локальные напряженности $\vec{E}_л$ и $\vec{H}_л$ следующим образом:

$$\vec{H} = \vec{H}_л + \beta \cdot \text{rot}\vec{H}_л, \quad \vec{E} = \vec{E}_л + \beta \cdot \text{rot}\vec{E}_л. \quad (13)$$

Характеристическая система (12) не содержит в явном виде информации о гиротропности среды и может быть разрешена описанным ниже методом

для негиротропных сред, поскольку в этом методе не предъявляется ограничений на вид функций $\dot{\epsilon}$ и $\dot{\mu}$, которые могут зависеть как от пространственных координат, так и от параметра β , характеризующего гиротропность среды.

Из соленоидальности вектора $\dot{\mu}\vec{H}_л$ следует, что его можно представить с помощью другого вектора в виде

$$\dot{\mu}\vec{H}_л = \text{rot}\vec{A}, \quad (14)$$

где $\vec{A}$ – произвольный вектор. Из этого следует, что $\text{rot}(\vec{E} - ik\vec{A}) = 0$, т.е. вектор $\vec{E} - ik\vec{A}$ является потенциальным, поскольку дифференциальная операция rot определяется с точностью до градиента произвольной скалярной функции ϕ (т.к. $\text{rot}\nabla\phi = 0$). Тогда вектор $\vec{E}$ может быть выражен через некоторые векторный и скалярный электродинамические потенциалы

$$\vec{E}_л = ik\vec{A} - \nabla\phi. \quad (15)$$

Подставляя (14) и (15) в первое уравнение системы (12), получим

$$\begin{aligned}-\Delta\vec{A} + \nabla\text{div}\vec{A} - \frac{\nabla\dot{\mu}}{\dot{\mu}} \times \text{rot}\vec{A} = \\ (k^2\vec{A} + ik\nabla\phi)\dot{\epsilon}\dot{\mu}\end{aligned}\quad (16)$$

Пользуясь произвольным характером задания векторного и скалярного потенциалов из уравнения (16) находим, что при выполнении нормирующего условия

$$\nabla\text{div}\vec{A} - ik\dot{\epsilon}\dot{\mu}\nabla\phi = \frac{\nabla\dot{\mu}}{\dot{\mu}} \times \text{rot}\vec{A} \quad (17)$$

векторный потенциал $\vec{A}$ подчиняется однородному волновому уравнению

$$\Delta\vec{A} + k^2\dot{\epsilon}\dot{\mu}\vec{A} = 0. \quad (18)$$

Следует отметить отличие нормирующего условия (17) от традиционного нормирующего условия Лоренца

$$\text{div}\vec{A} - ik\dot{\epsilon}\dot{\mu}\phi = 0, \quad (19)$$

которое изначально было записано для однородной среды. Действительно, для однородной среды ($\dot{\epsilon} = \text{const}, \dot{\mu} = \text{const}$) правая часть (17) тождественно равна нулю, а операция градиента ∇ может быть вынесена за скобку, в результате может быть записано следующее выражение:

$$\nabla(\text{div}\vec{A} - ik\dot{\epsilon}\dot{\mu}\phi) \propto \text{div}\vec{A} - ik\dot{\epsilon}\dot{\mu} + C_0 = 0, \quad (20)$$

где C_0 - некоторая произвольная константа, которая для удобства полагается равной нулю. При $C_0 = 0$ из (20) следует традиционное нормирующее условие Лоренца (19), которое многими авторами используется при рассмотрении электромагнитных полей в неоднородных средах (что они, конечно же, имеют право сделать). Однако, если изначально преследовать цель упрощения исходного уравнения (16), то становится очевидным, что для рассматриваемых неоднородных сред правильной было бы пользоваться новым нормирующим условием (17), так как это условие в отличие от (19) всегда приводит к классическому векторному уравнению Гельмгольца (18).

Поскольку в определении компонент вектора $\vec{E}_n$ (15) используется не сам потенциал ϕ , а его градиент, который может быть найден из нормирующего условия (17) как

$$-\nabla\phi = \frac{1}{ik\dot{\epsilon}\dot{\mu}} \left[-\nabla\text{div}\vec{A} + \frac{\nabla\dot{\mu}}{\dot{\mu}} \times \text{rot}\vec{A} \right], \quad (21)$$

то вектор $\vec{E}_n$ может быть выражен только через векторный потенциал $\vec{A}$. Вводя обозначение $\vec{A} = -ik\vec{G}$, для векторов $\vec{E}_n$ и $\vec{H}_n$ можно записать следующие выражения:

$$\begin{aligned} \vec{E}_n &= k^2\vec{G} + \frac{1}{\dot{\epsilon}\dot{\mu}} \left[\nabla\text{div}\vec{G} - \frac{\nabla\dot{\mu}}{\dot{\mu}} \times \text{rot}\vec{G} \right] = \\ &= \frac{1}{\dot{\epsilon}\dot{\mu}} \left[\text{rotrot}\vec{G} - \frac{\nabla\dot{\mu}}{\dot{\mu}} \times \text{rot}\vec{G} \right], \\ \vec{H}_n &= -\frac{ik}{\dot{\mu}} \text{rot}\vec{G}. \end{aligned} \quad (22)$$

Вектор $\vec{G}$, через который находится частное электромагнитное поле по формулам (22), будем называть электрическим вектором циркулярного смещения, а определяемое им поле – полем магнитного типа и обозначать ТМ.

Аналогичным образом можно найти частное электромагнитное поле при использовании свойства соленоидальности вектора $\dot{\epsilon}\vec{E}_n$. Для этого в рассмотрение вводятся некоторые вспомогательные векторный и скалярный электродинамические потенциалы $\vec{A}^*$ и ϕ^* . Тогда для системы (12) может быть построено другое частное решение, имеющее следующий вид:

$$\vec{E}_n = \frac{1}{\dot{\epsilon}} \text{rot}\vec{A}^*, \quad (23)$$

$$\vec{H}_n = -ik\vec{A}^* - \nabla\phi^*, \quad (24)$$

которое при выполнении нормирующего условия

$$\nabla\text{div}\vec{A}^* + ik\dot{\mu}\nabla\phi^* = \frac{\nabla\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}} \times \text{rot}\vec{A}^* \quad (25)$$

и введении обозначения $\vec{A}^* = ik\vec{G}^*$ ($\vec{A}^*$ и $\vec{G}^*$ являются при выбранной нормировке решением волнового уравнения (18)) может быть переписано в следующем виде:

$$\vec{E}_n = \frac{ik}{\dot{\epsilon}} \text{rot}\vec{G}^*, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \vec{H}_n &= k^2\vec{G}^* + \frac{1}{\dot{\epsilon}\dot{\mu}} \left[\nabla\text{div}\vec{G}^* - \frac{\nabla\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}} \times \text{rot}\vec{G}^* \right] = \\ &= \frac{1}{\dot{\epsilon}\dot{\mu}} \left[\text{rotrot}\vec{G}^* - \frac{\nabla\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}} \times \text{rot}\vec{G}^* \right]. \end{aligned} \quad (27)$$

Вектор $\vec{G}^*$, через который находится частное электромагнитное поле по формулам (26) и (27), будем называть магнитным вектором циркулярного смещения, а определяемое им поле – полем электрического типа и обозначать ТЕ.

Из вышеизложенного следует, что электромагнитное поле для условий неоднородной среды может быть всегда разложено на два частных поля, одно из которых определяется через электрический вектор циркулярного смещения по формулам (22), а второе – через магнитный вектор циркулярного смещения по формулам (26), (27). Суперпозиция этих частных решений даёт общее решение системы уравнений (12):

$$\vec{E}_n = \frac{1}{\dot{\epsilon}\dot{\mu}} \left[\text{rotrot}\vec{G} - \frac{\nabla\dot{\mu}}{\dot{\mu}} \times \text{rot}\vec{G} \right] + \frac{ik}{\dot{\epsilon}} \text{rot}\vec{G}^*, \quad (28)$$

$$\vec{H}_n = \frac{1}{\dot{\epsilon}\dot{\mu}} \left[\text{rotrot}\vec{G}^* - \frac{\nabla\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}} \times \text{rot}\vec{G}^* \right] + \frac{ik}{\dot{\mu}} \text{rot}\vec{G}. \quad (29)$$

Из (22) и (26), (27) можно установить частную связь введённых векторов электрического и магнитного циркулярного смещения $\vec{G}$ и $\vec{G}^*$ с хорошо известными электрическим и магнитным векторами Герца $\vec{P}$ и $\vec{P}^*$ [3] для однородной среды ($\dot{\epsilon} = \text{const}$, $\dot{\mu} = \text{const}$). В этом случае для векторов Герца и векторов $\vec{G}$ и $\vec{G}^*$ можно записать следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \vec{G} &= \dot{\epsilon}\dot{\mu}\vec{P}, \\ \vec{G}^* &= \dot{\epsilon}\dot{\mu}\vec{P}^*. \end{aligned} \quad (30)$$

Для случая неоднородных сред такой простой связи между $\vec{P}$, $\vec{P}^*$ и $\vec{G}$, $\vec{G}^*$ уже построить не представляется возможным. Это обстоятельство показывает принципиальное отличие векторов Герца $\vec{P}$, $\vec{P}^*$ от введённых векторов электрического и магнитного циркулярного смещения $\vec{G}$ и $\vec{G}^*$.

При решении конкретной граничной задачи для заданной симметрии граничных условий и свойств среды бывает удобнее пользоваться или вектором $\vec{G}$, или вектором $\vec{G}^*$, или и тем и другим вместе. При этом по соотношениям, связывающим $\vec{G}$ и $\vec{G}^*$ с векторами электромагнитного поля $\vec{E}_a$ и $\vec{H}_a$, могут быть определены граничные условия для вспомогательных векторов $\vec{G}$ и $\vec{G}^*$, отвечающих граничным условиям для векторов $\vec{E}_a$ и $\vec{H}_a$. Общее граничное условие для тангенциальных составляющих электрических полей (в т.ч. и в киральных средах) имеет стандартный вид

$$[n\vec{E}_1] = [n\vec{E}_2], \quad (31)$$

где $\vec{n}$ – нормаль к границе раздела сред, индексы 1 и 2 относятся к соответствующим граничащим средам. Для случая, когда одна из граничащих сред идеально проводящая, граничное условие записывается в виде

$$[n\vec{E}_1] = 0. \quad (32)$$

Отметим, что с использованием описанного выше подхода решается общая задача по определению напряженностей электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{H}$ полей, которые включают ЭМВ левой и правой циркуляции и которые могут быть явно разделены при решении граничной задачи конкретной симметрии и свойств среды. Наиболее просто данная задача решается для однородной

непоглощающей среды. В этом случае ЭМВ левой и правой циркуляции разделяется следующей подстановкой:

$$\vec{E} = \vec{E}_L + \vec{E}_R, \quad \vec{H} = i(\epsilon\mu)^{1/2} (\vec{E}_R - \vec{E}_L). \quad (33)$$

Для сред с произвольными киральными свойствами задача разделения циркулярных компонент ЭМВ носит более сложный, но математически преодолимый характер.

Таким образом, на основе модельных представлений о физической природе плотности тока, проводимости в киральных средах и применения новых нормирующих условий для вспомогательных векторных и скалярных потенциалов построен методический аппарат описания гармонических электромагнитных полей в произвольных неоднородных киральных средах. Данный методический аппарат позволяет проводить постановку и решение различных граничных задач электродинамики, точное решение которых для неоднородных сред ранее вызывало существенные математические трудности.

Литература

1. Федоров, Ф.И. Теория гиротропии [Текст] / Ф.И. Федоров. – Минск: Наука и техника. – 1976. – 352 с.
2. Пискунов, К. П. Метод векторных и скалярных потенциалов для негиротропных и гиротропных неоднородных сред [Текст] / К. П. Пискунов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – Т. 11, № 11 - С. 27-31.
3. Стрэттон, Дж. Теория электромагнетизма [Текст] / Дж. Стрэттон. – М.: Гостехиздат. – 1948. – 296 с.

Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю России (г. Воронеж)
Воронежский государственный технический университет
Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

THEORETICAL BASES FOR THE SOLUTION OF BOUNDARY TASKS OF ELECTRODYNAMICS IN THE KIRALNY ENVIRONMENTS

K.P. Piskunov, O.A. Sokolova, A.V. Tishukov, A.P. Yarygin

On basis of simulative representations about physical natures of the density of conduction current in the chiral mediums and assessment new normalizing conditions for auxiliary vector and scalar potential is offered methodical apparatus of the description harmonious fields in the random unhomogeneous chiral mediums

Key words: kiralny environment, dielectric and magnetic conductivity, giration parameter

ОДНОСЛОЙНЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ ВЫТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНЫ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ПИТАНИЕМ

Д.Н. Борисов, Д.А. Ерошенко, А.И. Климов, Ю.Б. Нечаев, В.И. Юдин

Представлены два примера плоских антенных решеток вытекающей волны СВЧ и КВЧ-диапазонов для режима излучения по нормали к раскрыву. Антенны имеют гибридную структуру, объединяющую одномерно-периодическую металлическую полосковую решетку на экранированной диэлектрической подложке и питающее устройство (копланарную решетку полосковую гребенчатую линию или интегрированный с подложкой волновод со щелями). Эффективность излучения антенн превышает 50 % при коэффициенте усиления 28-30 дБ

Ключевые слова: вытекающие волны, антенная решетка, коэффициент усиления, эффективность излучения

В последние годы благодаря значительному прогрессу в области СВЧ-радиоэлектроники и широкому внедрению цифровых технологий появилось множество разнообразных радиотехнических устройств и систем, работающих в высокочастотной области диапазона СВЧ на частотах выше 20 ГГц и в КВЧ-диапазоне. В их числе можно отметить радиолокационные датчики систем автоматики, охранные извещатели, радиолокационные измерители скорости транспортных средств, автомобильные радиолокационные устройства контроля дорожной обстановки, радиомодемы, системы радиорелейной и спутниковой связи и другие. Применительно ко многим названным выше устройствам и системам возрастает потребность в компактных эффективных антеннах с высоким коэффициентом усиления на частотах порядка десятков ГГц и отличающихся от существующих прототипов высокой технологичностью производства и меньшей стоимостью.

В плане компактности и технологичности конструкций лучшими представляются микрополосковые антенные решетки (МΠΑР). Однако эффективность излучения (определяемая как произведение коэффициентов полезного действия (КПД) и использования поверхности раскрыва) многих типов МΠΑР существенно падает с ростом частоты из-за снижения КПД вплоть до 30 % и менее на частотах свыше 20-30 ГГц [1, 2]. Поэтому при сравнении антенн различных типов КВЧ-диапазона интересен вопрос не столько об их полной эффективности, сколько о КПД. На данный момент наиболее эффективными малогабаритными антеннами с высоким коэффициентом усиления в диапазоне КВЧ остаются волноводно-щелевые антенные решетки традиционных конструкций, КПД которых достигает 90 и более процентов [3-5].

Вместе с тем в [6-9] была показана возможность построения эффективных остроуправленных антенных решеток диапазонов СВЧ и КВЧ, использующих преобразование поверхностных волн диэлектрического волновода в вытекающие волны с помощью дифракционных решеток, например, из металлических полосок (лент). В структуре плоской антенной решетки вытекающей волны (АРВВ) можно выделить два основных элемента — устройство возбуждения линии передачи поверхностных волн и излучающий раскрыв. В большинстве известных АРВВ эти элементы конструктивно разделены, что не позволяет достичь минимальных габаритов антенны и высокой технологичности изготовления и может приводить к росту потерь мощности и снижению КПД.

В данной статье приведены результаты исследований АРВВ, в которых устройство возбуждения поверхностных волн является частью излучающего раскрыва. Несколько таких технических решений, предложенных в [10-12], реализуются в виде простых, в том числе однослойных, конструкций [11, 12], обеспечивающих довольно высокую эффективность излучения антенны при низких обратных потерях в режиме излучения по нормали к плоскости раскрыва.

Новая конструкция АРВВ линейной поляризации с центральным питанием [7, 9, 11] (рис. 1) содержит экранированную диэлектрическую подложку, играющую роль диэлектрического волновода (ДВ) 1, дифракционную решетку (ДР), состоящую из двух периодических подрешеток из параллельных металлических полосок 2 с общей центральной полоской, и устройство 3, обеспечивающее возбуждение в ДВ поверхностных волн. Питание антенны осуществляется через прямоугольную щель 4 в центре экрана ДВ. Устройство возбуждения 3 состоит из центральной полоски с двумя боковыми рядами четвертьволновых прямоугольных металлических выступов, образующих переменнo-фазную гребенчатую структуру. Направление максимального излучения антенны показано стрелкой 5. Для излучения по нормали к плоскости раскрыва на заданной рабочей частоте период чередования полосок ДР d_x выбирается равным одной длине поверхностной волны, распространяющейся вдоль ДВ в направлениях $\pm OX$; период чередования полосковых высту-

Борисов Дмитрий Николаевич — ВГУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: borisov@sc.vsu.ru
Ерошенко Денис Александрович — ВИ МВД России, адъюнкт, e-mail: denlis_90@mail.ru
Климов Александр Иванович — ВИ МВД России, д-р техн. наук, доцент, e-mail: alexserkos@inbox.ru
Нечаев Юрий Борисович — ВГУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: nechaev_ub@mail.ru
Юдин Владимир Иванович — ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. (473) 243-77-29

пов d_y — равным одной длине волн, возбуждаемых в линии передачи (образованной центральной полоской и экраном) и распространяющихся в направлениях $\pm OY$. Отличительная особенность новой антенны от предложенной в [10] состоит в том, что устройство возбуждения формирует не синфазные, а противофазные потоки мощности поверхностных волн, распространяющихся в направлениях $\pm OX$. Это позволяет расположить подрешетки ДР с малым разнесением по оси OX симметрично относительно оси OY и, следовательно, обеспечить симметрию ДН в плоскости XOZ и более высокий коэффициент направленного действия (КНД) антенны.

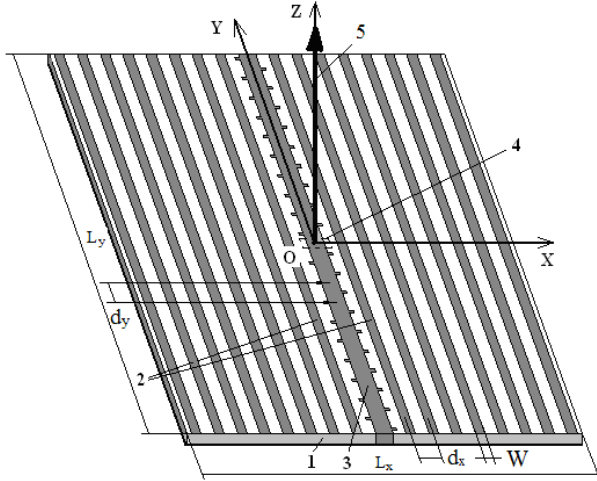


Рис. 1. Общий вид антенны

Поскольку в антенне используется параллельно-последовательное питание, ее полоса рабочих частот ограничивается частотным расщеплением главного лепестка диаграммы направленности (ДН). Тем не менее в полосе частот 2-4 % достигается КНД порядка 30-32 дБ при достаточно низком значении модуля коэффициента отражения напряжения s_{11} на входе — менее $-(10-15)$ дБ [7, 9].

Начальные параметры излучающего раскрыва (апертуры) АРВВ — толщина ДВ h , ширина полосок W и период решетки d_x , при которых обеспечивается излучение по нормали на центральной рабочей частоте, рассчитываются с помощью упрощенной математической модели для бесконечнопротяженной структуры, содержащей экранированную диэлектрическую пластину с одномерно-периодической полосковой решеткой, рис. 2.

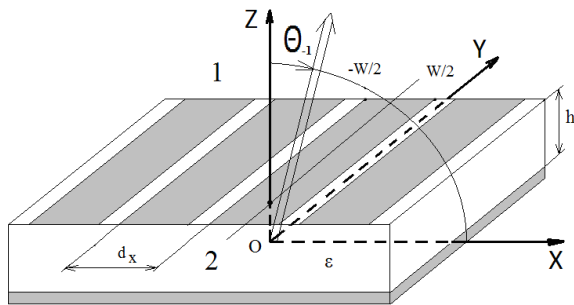


Рис. 2. Модель структуры вытекающей волны

В рамках данной модели сформулировано дисперсионное уравнение для вычисления комплексной постоянной распространения основной пространственной гармоники (ПГ) типа ТМ в структуре $\beta = \beta_0 - j\alpha$ (β_0 — коэффициент фазы, α — постоянная ослабления) и -1-й ПГ $\beta_{-1} = \beta - 2\pi/d_x$, а также других характеристик, включая частотную зависимость направления максимального излучения. Применительно к АРВВ основной задачей является определение параметров раскрыва, обеспечивающих излучение по нормали ($\theta_{-1}=0$) с заданным КПД.

Для получения дисперсионного уравнения использовано разложение плотности поперечного поверхностного электрического тока $J_x(x)$ в граничном условии для тангенциальных компонент H_y вектора напряженности магнитного поля на бесконечно тонких металлических полосках (лентах) на границе областей 1 и 2 при $z=h$ по базисным функциям. Плотность тока представляется выражением [13]

$$J_x(x) = \sum_{m=1}^M \alpha_m J_{xm}(x), \quad (1)$$

где α_m — неизвестные амплитудные коэффициенты, $J_{xm}(x)$ — базисные функции, в качестве которых могут быть выбраны, например, косинусоидальные функции или полиномы Чебышева второго рода порядка s с весовыми коэффициентами $(1 - (2x/W)^2)^{1/2}$ [13-15].

В итоге применительно к структуре на рис. 1 в режиме возбуждения в ДВ моды типа ТМ получено дисперсионное уравнение относительно $\beta = \beta_0 - j\alpha$ вида

$$\det[G] = 0, \quad (2)$$

где G — квадратная матрица размером $M \times M$ (M — число базисных функций), элементы которой

$$G_{ij} = \sum_{n=-N}^N K_n J_{jn} J_{in}^*, \quad (3)$$

где $K_n = -\frac{\gamma_n}{\omega \epsilon_0} \left(j \epsilon \frac{\gamma_n}{\eta_n} \frac{1}{\tan \eta_n h} - 1 \right)^{-1}$; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость ДВ; $\beta_n = \beta + 2\pi n/d_x$, $n = -N; N$ — продольная постоянная распространения n -й ПГ в структуре, $2N+1$ — число учитываемых ПГ; $\gamma_n = (k_0^2 - \beta_n^2)^{1/2}$ и $\eta_n = (k_0^2 \epsilon - \beta_n^2)^{1/2}$ — поперечные постоянные распространения n -й ПГ над структурой и в слое диэлектрика соответственно; $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновое число свободного пространства, λ — длина волны излучения;

$$J_{xmn} = \frac{1}{d_x} \int_{-w/2}^{w/2} J_{xm}(x) \exp(j\beta_n x) dx \quad \text{— } n\text{-я компонента разложения плотности тока } J_x(x) \text{ в ряд Фурье по пространственным гармоникам.}$$

Понента разложения плотности тока $J_x(x)$ в ряд Фурье по пространственным гармоникам.

Практика синтеза антенн вытекающей волны показывает, что геометрические параметры элементов излучающей апертуры, выбираемые в результате анализа рассчитанных дисперсионных характеристик бесконечно-протяженной структуры, требуют некоторой коррекции с учетом реальных значений длины и ширины апертуры. Эта процедура выполняется в процессе компьютерного моделирования характеристик антенны с помощью специализированных программ.

На рис. 3 и 4 приведены результаты компьютерного моделирования с помощью CST Microwave Studio электрических характеристик APBB с размерами раскрытия $L_x \times L_y = 156 \times 156 \text{ мм}^2$, рассчитанной для средней частоты 24,1 ГГц, в полосе частот 23,6–24,8 ГГц. Диэлектрический волновод выполнен из материала Teflon с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,1$ (тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta \leq 0,001$ на частотах до 10 ГГц); толщина $h = 2 \text{ мм}$; размеры входной щели для подключения к питающему волноводу — $11,0 \times 5,5 \text{ мм}^2$. На рис. 3 показана частотная характеристика модуля коэффициента отражения напряжения s_{11} на входе, на рис. 4 — частотная характеристика коэффициента усиления.

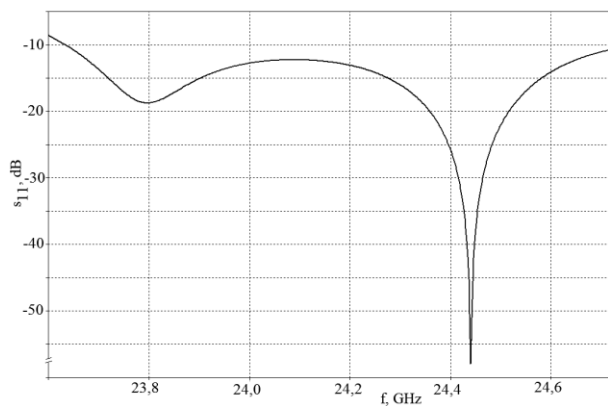


Рис. 3. Частотная характеристика модуля коэффициента отражения напряжения

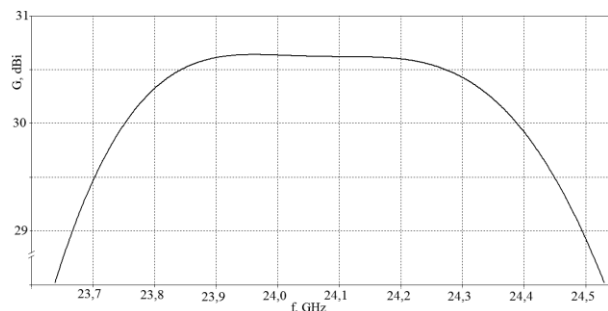


Рис. 4. Частотная характеристика коэффициента усиления

Максимальный коэффициент усиления (КУ) G составил 30,7 дБ при эффективности излучения

$\Xi = 63 \%$; причем в полосе частот 23,75–24,38 ГГц $G \geq 30 \text{ дБ}$ ($\Xi \geq 50 \%$). Ширина ДН в Е- и Н-плоскостях в указанной полосе частот ~ 4 град., уровень боковых лепестков — не более -16 дБ .

На рис. 5 и 6 приведены результаты компьютерного моделирования с помощью Ansys HFSS характеристик аналогичной APBB с размерами раскрытия $L_x \times L_y = 40 \times 40 \text{ мм}^2$, рассчитанной для работы в полосе частот 81–82 ГГц. Диэлектрический волновод выполнен из фольгированного диэлектрика Rogers/RT Duroid 5880 ($\epsilon = 2,2$, $\tan \delta \leq 0,0009$ на частотах до 10 ГГц) толщиной $h = 0,51 \text{ мм}$, ДР составлена из полосок шириной $W = 1,55 \text{ мм}$ с периодом $d_x = 3 \text{ мм}$. На рис. 5 показана частотная характеристика модуля коэффициента отражения напряжения на входе, на рис. 6 — частотные характеристики коэффициентов направленного действия D и усиления G — без учета рассогласования по входу и GR — с учетом рассогласования.

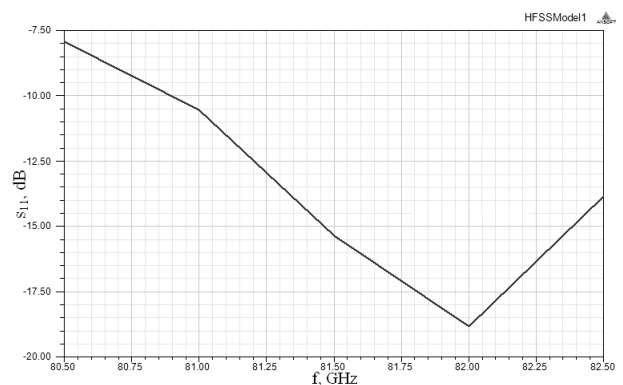


Рис. 5. Частотная характеристика модуля коэффициента отражения напряжения

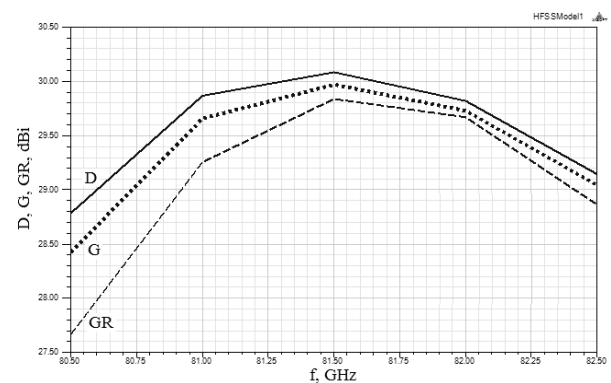


Рис. 6. Частотные характеристики коэффициентов направленного действия (D), усиления без учета отражений (G) и с учетом отражений на входе (GR)

Из представленных данных следует, что в полосе частот 81–82 ГГц антенна обладает эффективностью более 50 % (максимальное значение 58 % при коэффициенте усиления 29,8 дБ на частоте 81,5 ГГц) и характеризуется приемлемым согласованием с питающим волноводом — максимальное значение модуля коэффициента отражения напряжения $s_{11} = -11 \text{ дБ}$ на частоте 81 ГГц ($K_{CB} = 1,84$). Ширина

диаграммы направленности антенны в Е- и Н-плоскостях ~ 5 град., уровень боковых лепестков не более -13 дБ.

Заслуживает внимания то, что потери усиления обусловлены в основном рассогласованием антенны по входу, а не тепловыми потерями, относительный уровень которых в худшем случае составил $0,4$ дБ на частоте $80,5$ ГГц. Соответственно, КПД антенны, ограниченный тепловыми потерями, превышает 91% и оказывается практически таким же, как и КПД волноводно-щелевых антенных решеток, изготавливаемых на основе металлических конструкций.

Полученные результаты показывают, что данный вариант антенны (рис. 1) обеспечивает высокую эффективность излучения как в СВЧ, так и в КВЧ-диапазоне на частотах выше 80 ГГц. Кроме того, этот вариант обладает очевидным резервом повышения эффективности за счет снижения потока мощности собственного излучения устройства возбуждения во внешнее пространство и увеличения потока мощности поверхностных волн, распространяющихся вдоль ДВ и вносящих вклад в основное излучение раскрытия антенны.

Поэтому во втором варианте АРВВ, также с волноводным питанием через щель в центре экрана ДВ, использовано иное устройство возбуждения ДВ в виде волноводно-щелевого делителя мощности. Общий вид антенны показан на рис. 7, на котором обозначено: 1 — экранированный плоский ДВ; 2 — элементы полосковой ДР; 3 — центральная полоска ДР с металлическими стержнями 4, замыкающими ее на экран ДВ; 5 — короткозамыкающие элементы делителя мощности; 6 — отражающие металлические бортики; 7 — направление максимального излучения антенны. Устройство возбуждения представляет собой совокупность центральной полоски 3, стержней 4 и расположенного под полоской фрагмента экранированного ДВ 1.

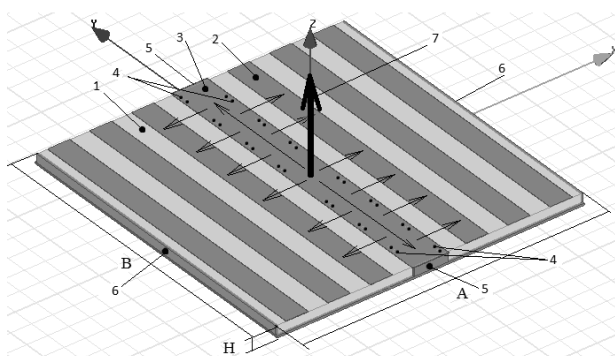


Рис. 7. Общий вид АРВВ с волноводно-щелевым устройством возбуждения поверхностных волн

Одними из прототипов этого варианта АРВВ служат хорошо известные примеры волноводно-щелевых решеток СВЧ и КВЧ с центральным питанием, построенные на основе «Post-Wall» структур или, иначе говоря, на основе SIW (Substrate Integrated Waveguide), представляющих собой волноводно-щелевые устройства, реализованные путем сквозной

металлизации отверстий в фольгированном диэлектрике [3, 5]. Обладая эффективностью порядка $40-60\%$ на частотах вплоть до десятков ГГц, такие антенны характеризуются довольно высоким УБЛ ДН в плоскости ХОZ, в лучшем случае около -9 дБ при минимально реализуемом разнесении щелевых подрешеток, ограничивающем поперечный размер так называемой «блокирующей зоны» [5]. Другим прототипом служит техническое решение [12], тоже предусматривающее использование волноводно-щелевого «Post-Wall» делителя мощности в составе антенны на основе плоскопараллельного волновода с двумерной решеткой излучающих щелей.

Результаты компьютерного моделирования электрических характеристик АРВВ с волноводно-щелевым делителем мощности, интегрированным с ДВ и ДР, иллюстрируются рис. 8 и 9.

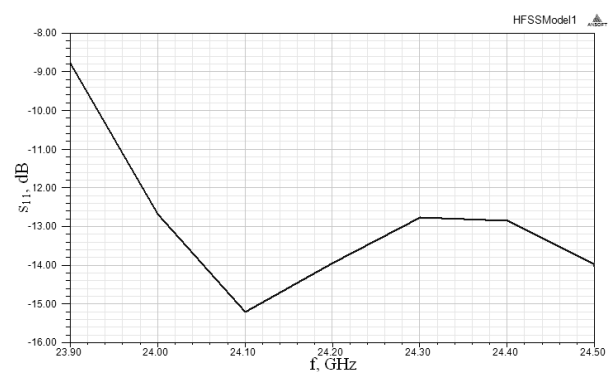


Рис. 8. Частотная характеристика модуля коэффициента отражения напряжения

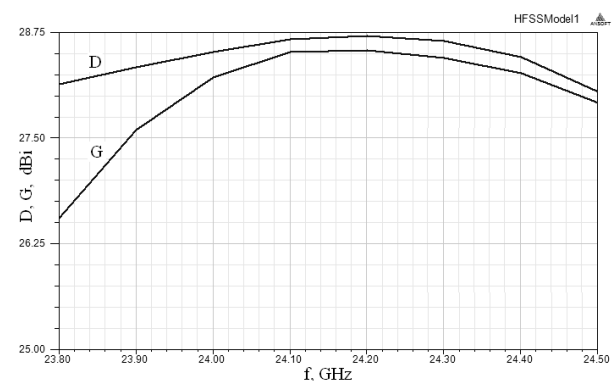


Рис. 9. Частотные характеристики коэффициентов направленного действия (D) и усиления (G)

АРВВ, рассчитанная для полосы частот $24-24,2$ ГГц и имеющая раскрыт с размерами $A \times B = 112 \times 113$ мм², в отличие от первого варианта с полосковым делителем мощности характеризуется максимальной эффективностью 71% при коэффициенте усиления $28,5$ дБ и хорошим согласованием с питающим волноводом — КСВ не более $1,6$.

Уровень боковых лепестков диаграммы направленности в Е- и Н-плоскостях на средней рабочей частоте $24,1$ ГГц не превышает -16 дБ; максимальный уровень во всей полосе частот не более $-14,5$ дБ. Ширина диаграммы направленности в Е- и Н-плоскостях ~ 6 град.

Представленные варианты плоских антенных решеток вытекающей волны линейной поляризации, рассчитанные для режима излучения по нормали к плоскости раскрыва на частотах СВЧ и КВЧ диапазонов, характеризуются высоким (более 90 %) КПД и эффективностью излучения до 50-70 %. Коэффициент усиления антенн достигает при этом 28-31 дБ в относительной полосе частот до 4-5 % при достаточном для многих применений качестве согласования с питающим волноводом.

Полученные результаты дают основания полагать, что новые плоские антенны подобных конструкций могут успешно конкурировать не только с микрополосковыми, но и волноводно-щелевыми антенными решетками СВЧ и КВЧ аналогичного назначения.

Литература

1. Sakakibara, K. High-gain Millimeter-wave Planar Array Antennas with Traveling-wave Excitation [Text] / K. Sakakibara. – Ch. 16 in Book: Radar Technology, Ed. by G. Kouemou: InTech, Croatia, 2010. – 430 p.
2. Sabbah, A. Microstrip Antenna Arrays [Text] / A. Sabbah. – Ch. 15. in Book: Microstrip Antennas, Ed. by N. Nasimuddin: InTech, 2011. – 552 P.
3. Ando, M. Planar Waveguide Arrays for Millimeter Wave Systems [Text] / M. Ando // IEICE Trans. Commun. - 2010. – V. E93-B, № 10. – P. 2504-2513.
4. Advanced Millimeter-wave Technologies: Antennas, Packaging and Circuits [Text] / D. Liu, U. Pfeiffer, J. Grzyb, B. Gaucher. – John Wiley & Sons, 2009. – 850 P.
5. Ando, M. A Post-Wall Center-Fed Waveguide Circuit Consisting of T-Junctions for Reducing the Slot-Free Area in a Parallel Plate Slot Array Antenna [Text] / M. Ando, K. Hashimoto, J. Hirokawa // IEICE Transactions. – 2010. – № 10. – P. 1047-1054.
6. Experiments on Dielectric Leaky-Wave Antennas with Parallel-Plate Waveguide Feed [Text] / T. Kawamura [et al] // ISAP2008, 27—28 October 2008. – № 1C06-1. – P. 36-42.

7. Разработка и экспериментальное исследование плоских антенных решеток вытекающей волны [Текст] / Д. Н. Борисов, А. В. Золотухин, А. И. Климов, Ю. Б. Нечаев // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 2013. – Т. 56, № 11. – С. 3-12.

8. Останков, А. В. Ретроспективный анализ возможностей, конструкций и основных характеристик дифракционных антенн вытекающей волны [Текст] / А. В. Останков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, № 8. – С. 75-81.

9. Borisov, D. N. Planar Leaky-Wave Antenna Arrays for Millimeter Wave Application [Text] / D. N. Borisov, A. I. Klimov, Ju. B. Nechaev // Recent Advances in Circuits, Systems, Telecommunications and Control: Proceedings on the 1st WSEAS International Conference on Wireless and Mobile Communication Systems (WMCS'13): Paris, France, 29-31 Oct., 2013. – P. 85-89.

10. Dielectric Leaky Wave Antenna [Text] / T. Teshirogi [et al.]: United States Patent Application Publication. – Pub. No.: US 2008/0303734 A1, Pub. Date: Dec. 11, 2008.

11. Пат. 2517724 Российская Федерация. Плоская антенна вытекающей волны [Текст] / Д. Н. Борисов, А. В. Золотухин, А. И. Климов, Ю. Б. Нечаев, В. И. Юдин. - № 2012144897/08; заявл. 22.10.2012; опубл. 2014. Бюл. № 15.

12. Pat. US 8421698 B2, Int. Cl. H01Q 13/10. Leaky Wave Antenna Using Waves Propagating Between Parallel Surfaces / A. Neto [et al]. Date of Patent 16.04.2013.

13. Ogusu K. Propagation Properties of a Planar Dielectric Waveguide with Periodic Metallic Strips [Text] / K. Ogusu // IEEE Trans. MTT, 1981. - V. 29, № 1. -P. 16-21.

14. Исследование характеристик плоских антенных решеток СВЧ и КВЧ диапазонов на основе ленточных структур вытекающей волны [Текст] / С. А. Антипов, Д. Н. Борисов, Д. А. Ерошенко [и др.] // Радиотехника. - 2014. – № 6. – С. 78-81.

15. Lee, C.W. Analysis of Electromagnetic Scattering by Periodic Strip Grating on a Grounded Dielectric/Magnetic Slab for Arbitrary Plane Wave Incidents Case [Текст] / C. W. Lee, H. Son // IEEE Trans. Antennas and Propag., 1999. - V. 47, № 9. – P. 1386-1392.

Воронежский государственный технический университет
Воронежский государственный университет
Воронежский институт МВД России

CENTER-FED SINGLE-LAYER LEAKY-WAVE ANTENNA ARRAYS

D.N. Borisov, D.A. Eroshenko, A.I. Klimov, Ju.B. Nechaev, V.I. Yudin

Two examples of planar center-fed leaky-wave antenna arrays for broadside radiation in SHF and EHF frequency ranges are presented. The antennas have a hybrid structure combining a metal strip grating on a grounded dielectric substrate with a feeding device (strip comb line coplanar to the strip grating or substrate integrated waveguide with slots). The radiation efficiency of the antennas exceeds 50 %, while the antenna gain is about 28-30 dBi

Key words: leaky waves, antenna array, broadside radiation, antenna gain, radiation efficiency

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЗ ЛЮНЕБЕРГА В ПОЛОСКОВОМ ИСПОЛНЕНИИ

А.С. Авдюшин, К.О. Волков, К.А. Разинкин, С.М. Фёдоров

В работе представлена методика проектирования антенны на основе линзы Люнеберга, реализованной с помощью различных вариантов топологии полосковых линий передачи, отличающаяся использованием электростатической модели фидерных линий при синтезе топологии печатной платы и метода конечного интегрирования Вейланда при анализе входных характеристик и направленных свойств антенны

Ключевые слова: диаграммообразующая схема, линза Люнеберга, печатная антенна

Возможность использования квазистатического приближения для анализа щелевой линии, проводники которой расположены по разные стороны диэлектрической подложки (рис. 1), основана на том, что толщина подложки и расстояние между проводниками существенно меньше длины волны, а основная волна линии является волной квази-ТЕМ типа.

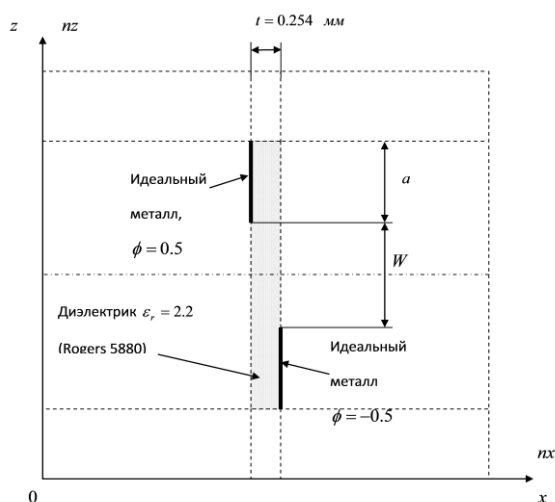


Рис. 1. Статическая модель регулярной щелевой линии конечной ширины

Выбор диэлектрика марки Rogers 5880 обусловлен удобством реализации значения эффективной диэлектрической проницаемости линии передачи $\epsilon_r = 2$ при расположении проводников строго друг над другом и достаточно быстрым убыванием значения ϵ_r при увеличении размера щели W .

Пространственное распределение потенциала электрической компоненты поля вычис-

лялось с помощью итерационной процедуры, описанной в [1]:

$$\phi_{nx,nz} \Big|_{\text{новое}} = \frac{\epsilon_{rnx-1,nz} \cdot \phi_{nx-1,nz} + \epsilon_{rnx+1,nz} \cdot \phi_{nx+1,nz} + \epsilon_{rnx,nz-1} \cdot \phi_{nx,nz-1} + \epsilon_{rnx,nz+1} \cdot \phi_{nx,nz+1}}{\epsilon_{rnx-1,nz} + \epsilon_{rnx+1,nz} + \epsilon_{rnx,nz-1} + \epsilon_{rnx,nz+1}} \Big|_{\text{старое}}$$

с учетом того, что разность потенциалов между точками запитки полосков равна 1 В.

Оценка погонной емкости и волнового сопротивления щелевой линии проводилась с использованием методики, описанной Фуско в работе [1]:

$$C_{\text{пос}}(y_j) = \Delta_x \cdot \Delta_z \cdot \sum_{i,k} \epsilon_{i,k}^{\text{среды}} \cdot \left(|E_x(x_i, y_j, z_k)|^2 + |E_y(x_i, y_j, z_k)|^2 + |E_z(x_i, y_j, z_k)|^2 \right) \\ Z_0(y) = \frac{1}{c_0 \cdot C_{\text{пос}}(y)},$$

где

$$\epsilon_{i,k}^{\text{среды}} = \begin{cases} \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9} \text{ Ф/м для воздуха} \\ \frac{\epsilon_r}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9} \text{ Ф/м для подложки} \end{cases}$$

– абсолютные диэлектрические проницаемости диэлектриков, входящих в состав анализируемой структуры;

Δ_x, Δ_z – шаг сетки по осям x, y соответственно;

$c_0 = 3 \cdot 10^8$ м/с – фазовая скорость электромагнитных волн в вакууме.

Результаты исследования сходимости итерационного процесса для частного случая линии передачи с полосками шириной $a = 1$ мм и зазором между полосками $W = 1$ мм представлены на рис. 2.

Было выяснено, что для достижения приемлемой в инженерных расчетах степени точности достаточным является использование 2000 итераций. Величина погрешности при этом не превышает 3%.

Авдюшин Артем Сергеевич – ЗАО «ИРКОС», нач. отдела; ВГТУ, аспирант, тел. 8 (473) 2-39-23-00
Волков Константин Олегович – ВГТУ, аспирант, тел. 8(908) 141-76-34
Разинкин Константин Александрович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8(473) 2-41-85-35
Фёдоров Сергей Михайлович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(904) 210-05-35

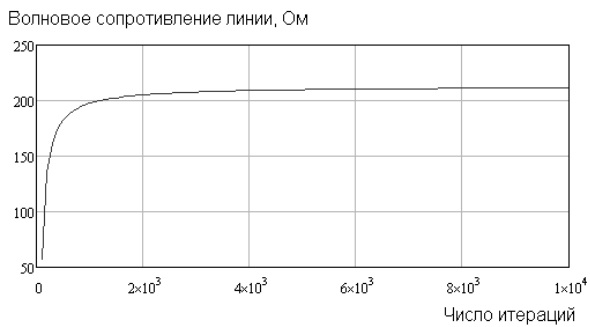


Рис. 2. Зависимость волнового сопротивления щелевой линии передачи с полосками шириной $a = 1$ мм и зазором между полосками $W = 1$ мм от числа выполненных итераций

Зависимости эффективного коэффициента преломления полосковой линии, а также ее волнового сопротивления от смещения верхнего проводника влево относительно его центра, а нижнего – на такое же расстояние вправо показаны на рис. 3, 4 соответственно.

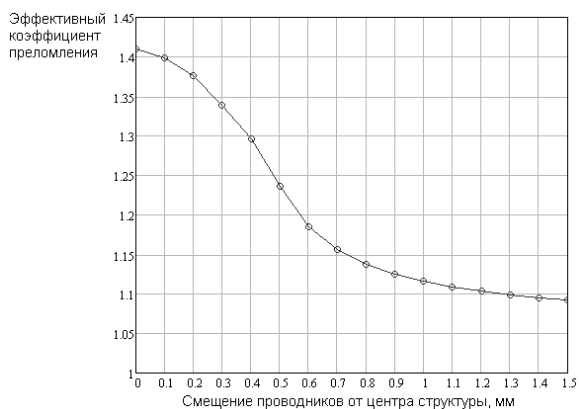


Рис. 3. Зависимость эффективного коэффициента преломления полосковой линии от смещения верхнего проводника влево, а нижнего - вправо

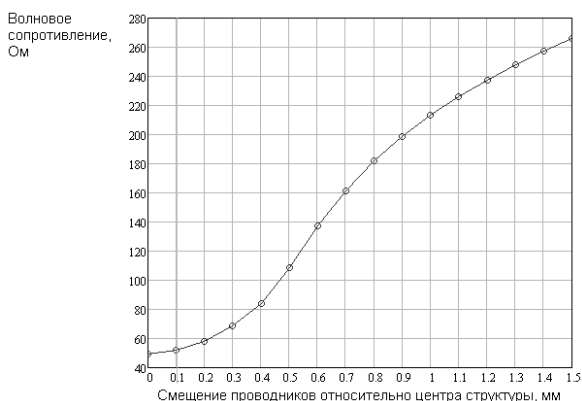


Рис. 4. Зависимость волнового сопротивления полосковой линии от смещения верхнего проводника влево, а нижнего - вправо

На рис. 5 показана идеальная зависимость коэффициента преломления в зависимости от радиуса, которую необходимо реализовать в линзе Лüneберга.

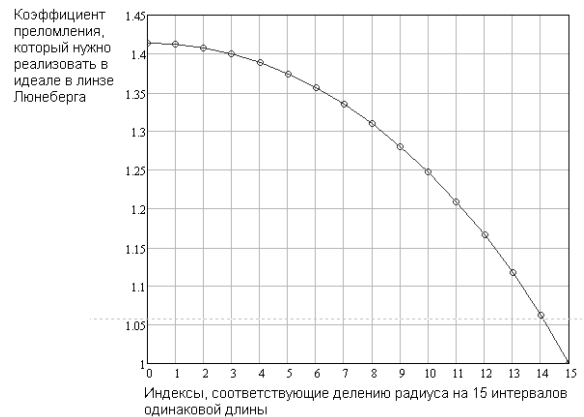


Рис. 5. Идеальная зависимость коэффициента преломления от радиуса

На рис. 6 показана зависимость смещения полосков (верхнего проводника влево относительно его центра, а нижнего – на такое же расстояние вправо) от текущей радиальной координаты, полученная из зависимостей, показанных на рис. 3, 5.

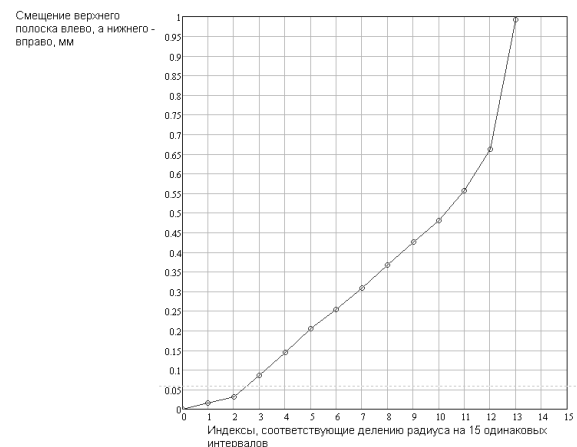


Рис. 6. Зависимость смещения полосков (мм) от радиуса

На рис. 7 показана антенна на основе линзы Лüneберга, особенностью которой является перфорирование (лазерная резка) диэлектрической подложки вблизи ее периметра, необходимая для приближения коэффициента преломления к 1.

Из рис. 4 видно, что недостатком предложенного варианта реализации печатной линзы Лüneберга является изменение значения волнового сопротивления линии передачи более чем в 5 раз, что существенно затрудняет реализацию согласующего трансформатора, используемого для запитки диаграммообразующей схемы.

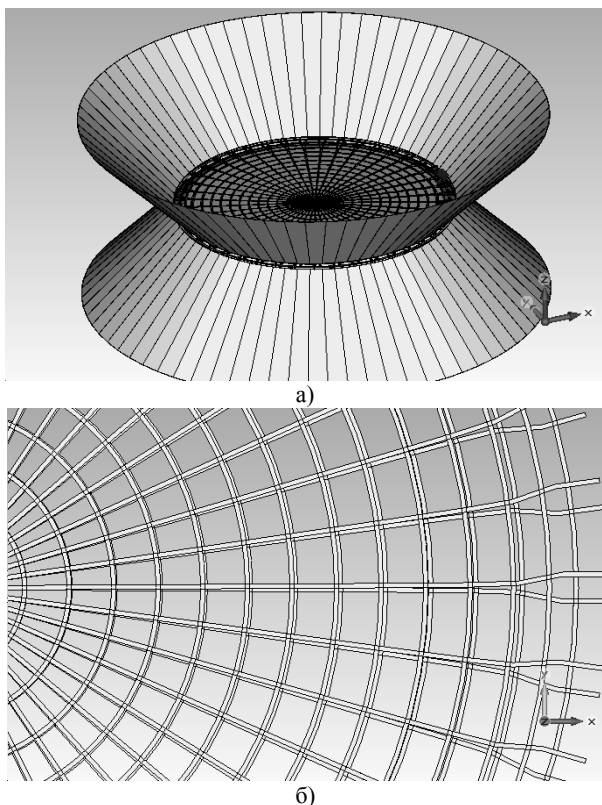


Рис. 7. Антенна на основе полосковой линзы Лüneберга, состоящей из системы сдвинутых друг относительно друга проводников: а) общий вид; б) система кольцевых и радиальных проводников, образующих линзу Лüneберга

В работе [2] описаны конструкция и методика проектирования антенны на основе печатной линзы Лüneберга, предназначенной для управления главным лепестком диаграммы направленности в азимутальной плоскости в широком секторе углов в диапазоне частот 8-14 ГГц. Внешний вид антенны и топологии печатной платы диаграммообразующей схемы показан на рис. 8.

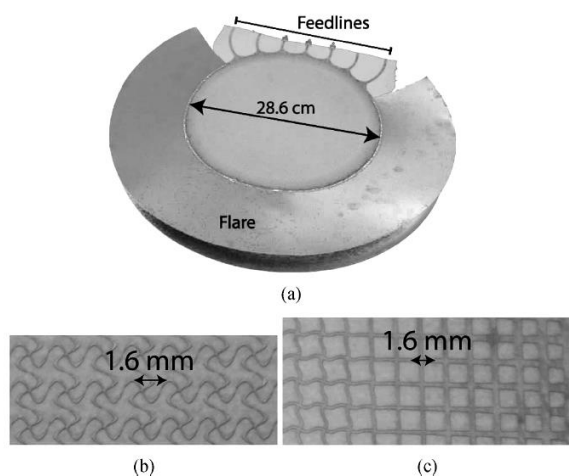


Рис. 8. Вариант конструктивного исполнения антенны с ДОС в виде печатной линзы Лüneберга, описанный в работе [2]. Диапазон рабочих частот 8-14 ГГц

Недостатками данной конструкции являются:

- невозможность реализации полноазимутального сканирования;
- ограничение на минимальный шаг сканирования;
- сложность согласования точек запитки ДОС с несимметричной линией передачи с волновым сопротивлением 50 Ом.

Вышеперечисленные недостатки обусловлены весьма малыми значениями входного сопротивления в точках подключения линии передачи непосредственно к полосковой ДОС (единицы Ом) и необходимостью использования достаточно громоздких согласующих трансформаторов.

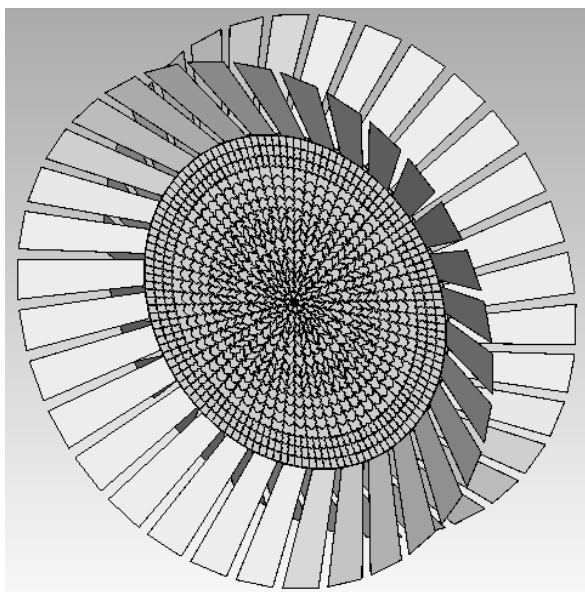
В настоящей работе предпринята попытка устранения вышеперечисленных недостатков путем увеличения расстояния между проводниками ДОС.

Конструктивными особенностями модифицированной ДОС (рис. 9) являются:

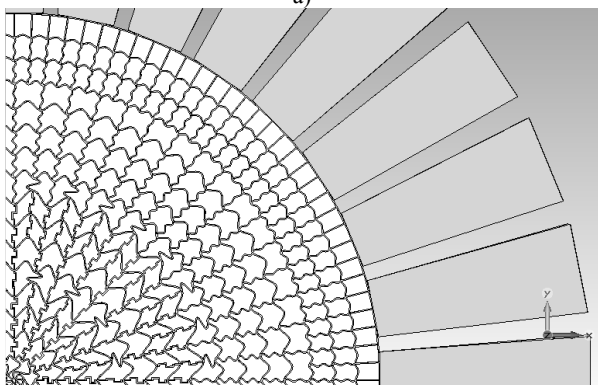
- использование тонкой (0.127 мм, или 0.254 мм) диэлектрической подложки из материала Rogers 5880 ($\epsilon_r = 2.2$), по сравнению с величиной зазора между параллельными платами, образующими ДОС (3-6 мм), заполненной вспененным диэлектриком;
- значение эффективной диэлектрической проницаемости линии передачи $\epsilon_r^{эфф}$, близкое к 1, при радиально-кольцевом законе расположения проводников;
- возможность реализации значения $\epsilon_r^{эфф} = 2$ в центре ДОС за счет пространственной модуляции проводников в радиальном и кольцевом направлениях с периодом и амплитудой, существенно меньшими длины волны;
- возможность запитки ДОС линиями передачи с волновым сопротивлением 50 Ом.

Для численного анализа синтезированной структуры использовался метод конечного интегрирования (Finite Integration Technique (FIT)), предложенный Вейландом в работе [3], подробно описанный в работах [4-6].

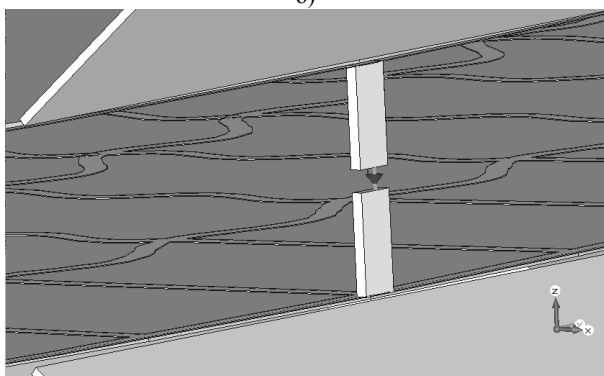
Основные характеристики антенны с диаграммообразующей схемой в виде печатной линзы Лüneберга (рис. 9) приведены на рис. 10-12. Максимальный раскрыв излучающей апертуры (высота антенны) составлял 212 мм; диаметр линзы Лüneберга – 300 мм; зазор между полосками диаграммообразующей схемы – 6 мм; диаметр антенны – 600 мм.



а)



б)



в)

Рис. 9. Конструкция модифицированной антенны на основе ДОС в виде печатной линзы Лунеберга: а) общий вид; б) топология проводников на печатной плате, реализующая закон изменения $\epsilon_r^{эфф}(r) = 2 - (r/r_0)^2$; в) точки запитки ДОС от источника с внутренним сопротивлением 50 Ом

На рис. 10 приведена частотная зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН); на рис. 11 и 12 – ее диаграммы направленности в Е- и Н- плоскостях.

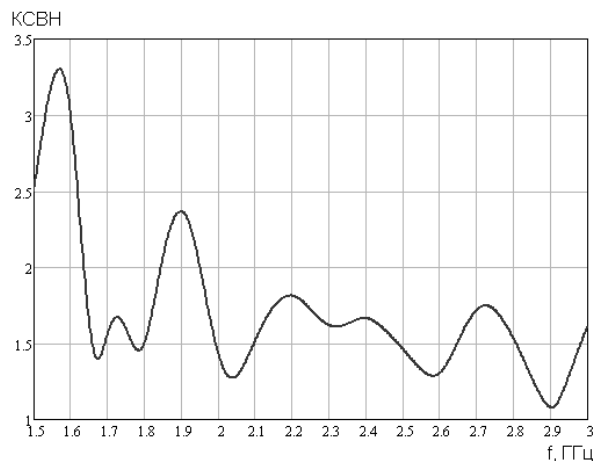


Рис. 10. Частотная зависимость КСВН антенны с печатной линзой Лунеберга

Довольно высокий уровень боковых лепестков в Н- плоскости, рис. 12 ($-6 \div -7$ дБ), является следствием того, что отношение диаметра диаграммообразующей схемы $D_{\text{ДОС}}$ к длине волны в свободном пространстве λ_0 составляет весьма малое значение для антенного устройства с ДОС оптического типа: на частоте 2 ГГц электрический диаметр диаграммообразующего устройства составляет $D_{\text{ДОС}} / \lambda_0 = 2$; на частоте 3 ГГц – $D_{\text{ДОС}} / \lambda_0 = 3$.

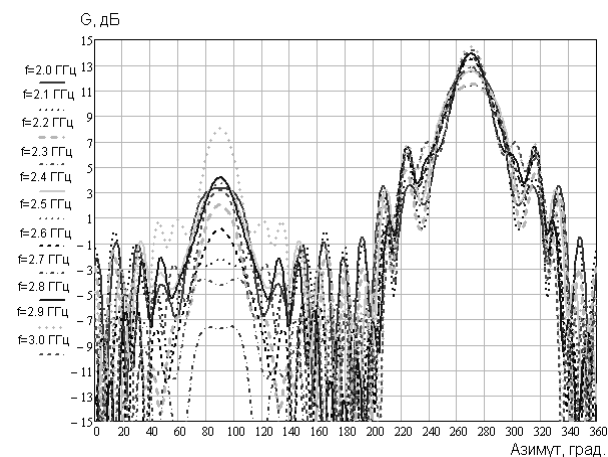


Рис. 11. ДН в Е- плоскости антенны с печатной линзой Лунеберга на частотах 2.0; 2.1; 2.2; ...; 3.0 ГГц

При увеличении отношения $D_{\text{ДОС}} / \lambda_0$ и уменьшении угла раскрытия конического ТЕМ-рупура уровень боковых лепестков удаётся снизить приблизительно до -10 дБ.

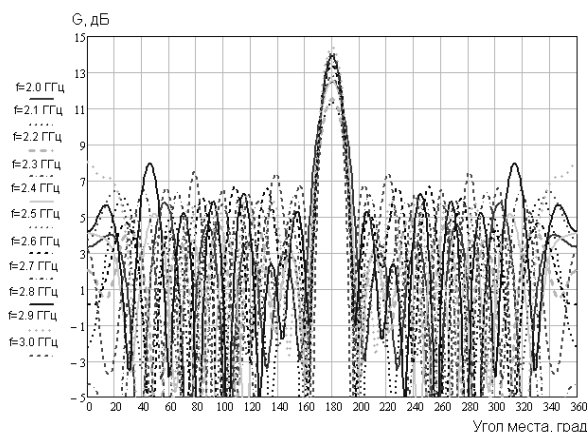


Рис. 12. ДН в Н-плоскости антенны с печатной линзой Лüneберга на частотах 2.0;2.1;2.2;...;3.0 ГГц

Таким образом, в настоящей статье разработана методика проектирования антенны с диаграммообразующей схемой в виде линзы Лüneберга, реализованной с помощью различных вариантов топологии полосковых линий передачи, отличающаяся использованием электростатической модели фидерных линий при синтезе топологии печатной платы и метода конечного интегрирования Вейланда при ана-

лизе входных характеристик и направленных свойств антенны.

Литература

1. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование [Текст] / В. Фуско; пер. с англ. А.А. Вольман, А.Д. Муравцова; под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
2. Pfeiffer, C. A Printed, Broadband Luneburg Lens Antenna [Text] / C. Pfeiffer, A. Grbic. // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. - 2010. - Vol. 58, № 9. - P. 3055-3058.
3. Weiland T. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields [Text] / T. Weiland // Electronics and Communication. - 1977. - Vol. 31. - P. 116-120.
4. Clemens, M. Discrete Electromagnetism With The Finite Integration Technique [Text] / M. Clemens, Weiland T. // Progress In Electromagnetics Research, PIER 32. – 2001. - P. 65–87.
5. Горбачев, А.П. Проектирование печатных фазированных антенных решеток в САПР «CST Microwave Studio» [Текст]: учеб. пособие / А.П. Горбачев, Е.А. Ермаков. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008 - 88 с.
6. Курушин, А.А. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio4 / А.А. Курушин, А.Н. Пластиков. - М.: Издательство МЭИ, 2010. - 160 с.

Воронежский государственный технический университет
ЗАО «ИРКОС», г. Воронеж

MODELLING OF LENSES OF LYUNEBERG IN STRIP EXECUTION

A.S. Avdyushin, K.O. Volkov, K.A. Razinkin, S.M. Fedorov

The paper presents a methodology for the design of antenna based on Luneberg lens, implemented using different topologies of transmission stripline characterized by use of electrostatic model of feeder lines at synthesis of PCB layout, and Weiland finite integration method when analyzing input characteristics and directional properties of the antenna

Key words: beamforming scheme, Luneberg lens, printed antenna

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ЦИЛИНДРЕ, РАСПОЛОЖЕННОМ В ДВУМЕРНО-НЕОДНОРОДНОМ ПОГЛОЩАЮЩЕМ ПЛАЗМЕННОМ ОБРАЗОВАНИИ

А.Н. Косенков, А.П. Ярыгин

Представлены результаты исследования влияния поглощающих свойств плазменного образования с радиальной и угловой неоднородностью на дифракцию электромагнитных волн на идеально проводящем цилиндре. Показано, что применение поглощающих плазменных образований позволяет исказить диаграмму обратного рассеяния идеально проводящего цилиндра, помещенного в двумерно-неоднородное поглощающее плазменное образование

Ключевые слова: плазменное образование, эйконал, цилиндр

Одним из направлений в области снижения радиолокационной заметности является использование радиофизических свойств плазмы. До настоящего времени основное внимание уделялось исследованию рефракционных свойств «бесстолкновительной» непоглощающей плазмы [1, 2]. В настоящей работе рассматривается влияние поглощающих свойств двумерно неоднородного плазменного образования (струи) на характер рассеяния электромагнитных волн на объекте, прикрываемом таким образованием. В качестве объекта рассматривается идеально проводящий цилиндр.

Актуальность исследования заключается в необходимости исследования влияния процессов взаимодействия электромагнитных волн с плазменными образованиями с радиальной и угловой неоднородностью и рассеяния радиоволн на объектах, расположенных в рассматриваемых плазменных образованиях.

Рассмотрим поглощающее плазменное образование с диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'', \quad (1)$$

где

$$\varepsilon' = 1 - \frac{N(r)}{N_{кр}} = 1 - \frac{\Phi^2}{r^2}, \quad (2)$$

$$\varepsilon'' = \frac{N(r)}{N_{кр}} \left(\frac{v_{эфф}}{\omega} \right), \quad (3)$$

$N_{кр} = \frac{\varepsilon_0 m (\omega^2 + v_{эфф}^2)}{e^2}$ - критическая концентрация электронов, ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, m - масса электрона, e - заряд электрона, ω - циклическая частота, $v_{эфф}$ - эффективная частота столкновений электронов,

N - концентрация электронов, $\Phi = \cos 2\theta$ - функция распределения концентрации электронов.

Будем полагать, что направление облучения остается неизменным и совпадает с осью вращения плазменного образования. Центр цилиндра смещен относительно начала координат вдоль оси z_1 на расстояние z_0 , при этом он находится в области плазменного образования с докритической концентрацией электронов. Рассматривается радиолокационный случай. Внешний радиус области плазменного образования обозначим a , радиус цилиндра - d , h - половина высоты цилиндра. На рис. 1 показана схема облучения цилиндра в плазменном образовании

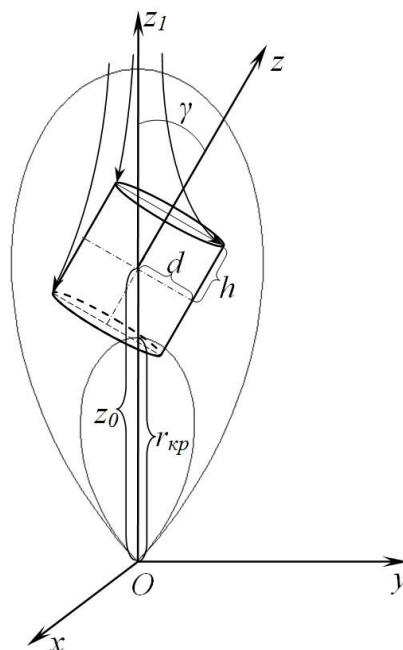


Рис. 1. Схема облучения цилиндра в плазменном образовании

Необходимо найти падающее поле в двумерно неоднородном поглощающем плазмен-

ном образовании. Для этого воспользуемся методом геометрической оптики, который достаточно апробирован для случая плавно неоднородных сред, в том числе для сред с поглощением.

Рассматривая далее случай слабого поглощения, можем представить облучающее поле в виде

$$A = \left(A_0 e^{-\frac{k_0}{2} \int_r^a \varepsilon'' ds} \right) e^{ik_0 L}, \quad (4)$$

где $ds = \frac{\sqrt{m^2 + r^2 - 2\Phi^2}}{\sqrt{r^2 - \Phi^2}} dr$ - элемент длины дуги луча, A и L амплитуда и эйконал падающей волны, m - параметр разделения переменных определяется из уравнения траектории луча (9).

Решая уравнение переноса [1], амплитуду поля можно записать в виде

$$A = \sqrt{\frac{1}{Dr \cdot \sin \theta}} \sqrt{\frac{m^2 - \Phi^2}{r^2 - m^2}}. \quad (5)$$

В результате решения дифференциального уравнения эйконала методом разделения переменных

$$\left(\frac{\partial L}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \right)^2 = \varepsilon', \quad (6)$$

эйконал принимает следующий вид

$$L = \int_0^\theta \sqrt{m^2 - \Phi^2} d\theta - m \cdot \arcsin\left(\frac{m}{r}\right) - \sqrt{r^2 - m^2}, \quad (7)$$

$$D = \frac{m^2 - \Phi^2}{m^2} \left[\frac{1}{\sqrt{r^2 - m^2}} + \int_0^\theta \frac{\Phi^2}{[m^2 - \Phi^2]^{3/2}} d\theta \right]. \quad (8)$$

Уравнение траектории луча, проходящего через рассматриваемую точку внутри плазменного образования, определяется как

$$\int_0^\theta \frac{m}{\sqrt{m^2 - \Phi^2}} d\theta = \arcsin \frac{m}{r}. \quad (9)$$

Для дальнейших вычислений удобнее перейти к цилиндрической системе координат (ρ, φ, z) , начало которой совпадает с центром цилиндра. В результате имеем, что на поверхности цилиндра выполняются соотношения

$$r \sin \theta = \sqrt{\rho^2 \cos^2 \varphi + (h \sin \gamma + \rho \sin \varphi \cos \gamma)^2}, \quad (10)$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{z_0 + h \cos \gamma - \rho \sin \varphi \sin \gamma}{r} \right), \quad (11)$$

$$r = \sqrt{\rho^2 + h^2 + z_0^2 + 2z_0 h \cos \gamma - 2z_0 \rho \sin \varphi \sin \gamma}. \quad (12)$$

Общее поле рассеяния цилиндра в направлении на источник облучения может быть представлено в виде [2]

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{от}} + \vec{E}_{\text{кр}}, \quad (13)$$

$$\vec{E}_{\text{от}}(0) = \vec{e}_0 \frac{e^{ikR}}{2R} \cdot \sum_{q=1}^n \frac{\sqrt{\varepsilon(\theta_q)}}{\sqrt{D_q \cdot C_q}} \frac{\rho_q + z_0 \sin \gamma}{\sqrt{\rho_q \sin \gamma \cos \gamma}} \exp \left[2ik_0 L_q + i \frac{\pi}{2} \delta \right] \times \\ \times \exp \left[- \frac{\nu_{\varphi} \Phi^2}{2c} \int_{z_0}^a \frac{\sqrt{m^2 - \Phi^2}}{r^2 \sqrt{r^2 - \Phi^2}} dr \right], \quad (14)$$

где $C_q = 1 - D_q(z_0 + h) \cos \gamma \frac{\partial}{\partial \rho_q} \left[(\rho_q + z_0 \sin \gamma) \sqrt{\varepsilon(\theta_q)} \right] - B_q$

$$B_q = D \frac{(d + z_0 \cos \gamma) \Phi(\theta) \Phi'(\theta)}{h + z_0 \sin \gamma} \frac{1}{r^2 \sqrt{\varepsilon}},$$

$\delta = \text{sign} \left(\frac{\partial^2 L}{\partial \rho^2} \right)$, если $\Delta > 0$ и $\delta = 0$, если $\Delta < 0$,

$\Delta = \left(\frac{\partial^2 L}{\partial \rho^2} \right) \left(\frac{\partial^2 L}{\partial \varphi^2} \right) - \left(\frac{\partial^2 L}{\partial \rho \partial \varphi} \right)^2$ - гессиан.

$$\vec{E}_{\text{кр}} = \frac{e^{ikR}}{2R \sqrt{\pi k_0 a \sin \gamma}} \sum_j^2 \left(\frac{\sqrt{p_{nj} |Z_j|}}{D_j \sqrt{r_j^2 - m_j^2}} \right) \left\{ \frac{f(\alpha_j)}{-g(\alpha_j)} \right\} \times \\ \times \exp \left[2ik_0 L_j \pm i \frac{\pi}{4} \right] \exp \left[- \frac{\nu_{\varphi} \Phi^2}{2c} \int_{r_q}^a \frac{\sqrt{m^2 - \Phi^2}}{r^2 \sqrt{r^2 - \Phi^2}} dr \right], \quad (15)$$

где $p_{nj} = \frac{\sqrt{m_j^2 - \Phi^2}(\Theta_j)}{a \cos \gamma}$, $Z_j = 1 + \frac{(z_0 + h) \cos \gamma \sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{m_j^2 - \Phi^2}}$.

Выражение (14) определяет поле, отраженное от «блестящих» точек на поверхности цилиндра, где выполняется условие стационарности фазы $\nabla L = 0$.

Выражение (15) описывает поле, рассеянное от «светящихся» краевых точек на контуре основания цилиндра, в которых выполняется условие стационарности $\frac{\partial L}{\partial l} = 0$, где l - длина

контура. Это условие эквивалентно обобщенному закону отражения геометрической теории дифракции $(\vec{\tau} \vec{t}) = 0$, где $\vec{\tau}$ - единичный вектор, касательный к контуру цилиндра. В общем случае в процессе формирования общего поля рассеяния принимают участие поля от трех «светящихся» точек, однако при малых углах поворота цилиндра в результате рефракции лучей поле от точки 3 не формируется. Аналогичная ситуация происходит с точкой 2 при углах γ , близких к 90° , и в этих случаях общее

поле формируется двумя «светящимися» точками. Входящие в (15) функции f и g характеризуют диаграмму полной краевой волны, излучаемой от ребра соответствующего клина [3]

$$f_j = \frac{2 \cdot \sin \frac{2\pi}{3}}{3} \left(\frac{1}{\cos \frac{2\pi}{3} - 1} - \frac{1}{\cos \frac{2\pi}{3} - \cos \frac{4\delta_j}{3}} \right), \quad (16)$$

$$g_j = \frac{2 \cdot \sin \frac{2\pi}{3}}{3} \left(\frac{1}{\cos \frac{2\pi}{3} - 1} + \frac{1}{\cos \frac{2\pi}{3} - \cos \frac{4\delta_j}{3}} \right), \quad (17)$$

$$\delta_j = \psi_j \pm \gamma, \quad (18)$$

$$\psi_{1,2} = \frac{\pi}{2} - \mu_{1,2} + \theta_{1,2}, \quad \psi_3 = \theta_3 - \mu_3, \quad (19)$$

где δ_j - угол между касательной к лучу и плоскостью

диска, $\mu_j = \arcsin \left(\frac{\sqrt{m_j^2 - \Phi^2}}{\sqrt{r_j^2 - \Phi^2}} \right)$ - угол

между касательной к лучу и радиус-вектором.

В выражениях (15), (18) верхний знак применяется для краевой точки с $\varphi = \frac{3\pi}{2}$, нижний

– для $\varphi = \frac{\pi}{2}$. D_j определяется из выражения (8)

при $m = m_j$ и $\rho = d$, при этом m_j определяется из уравнения траектории луча (9) при $\rho = d$, $\varphi_1 = \frac{3\pi}{2}$, $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$, $m_1 \left(\varphi = \frac{3\pi}{2}, d \right)$, $m_2 \left(\varphi = \frac{\pi}{2}, d \right)$.

Выражения для определения вклада краевых точек в общее поле рассеяния справедливы для углов облучения, удовлетворяющих условию

$$k_0 d \sin \gamma \ll 1. \quad (20)$$

В случае однородной среды это неравенство является условием асимптотического представления стоящей в выражении для рассеянного поля функции Бесселя J_1 [3].

Для вычисления координат «блестящих» точек на поверхности верхнего основания цилиндра необходимо решить систему уравнений

$$\begin{cases} \nabla_\rho L(\rho, \varphi) = 0, \\ \nabla_\varphi L(\rho, \varphi) = 0. \end{cases} \quad (21)$$

Результатом решения уравнения являются

$$\varphi_1 = \frac{3\pi}{2}, \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2},$$

$$m_0^2 = (\rho_0 - z_0 \sin \varphi \sin \gamma)^2 \varepsilon(\rho_0, \varphi_{1,2}) + \Phi^2(\rho_0, \varphi_{1,2}). \quad (22)$$

Подставляя (22) в (9), получим

$$\arccos \left(\frac{z_0 - \rho_0 \sin \varphi \sin \gamma}{r_0} \right) - \int_0^{\arccos \left(\frac{z_0 - \rho_0 \sin \varphi \sin \gamma}{r_0} \right)} \frac{m_0}{\sqrt{m_0^2 - \Phi^2(\theta)}} d\theta = \arcsin \frac{m_0}{r_0}. \quad (23)$$

Таким образом, условием наличия «блестящих» точек на поверхности цилиндра является существование решения уравнения (23).

При $\varphi = \frac{\pi}{2}$ уравнение (23) не имеет реше-

ний, а при $\varphi = \frac{3\pi}{2}$, как и в случае сферически симметричного плазменного образования [4], уравнение (23) имеет не более двух решений.

При изменении угла γ изменяется количество и тип «блестящих» точек. На рис. 2 показан характер поведения образующих поверхностей равных фаз, т.е. $L = \text{const}_{1,2}$ и принцип формирования «блестящих» точек. При $\gamma = 0$ существует одна «блестящая» точка 1 рода, которая совпадает с центром основания цилиндра. При увеличении угла γ данная точка смещается к краю цилиндра, а также в зависимости от значений z_0 , d , γ на краю цилиндра появляется «блестящая» точка 2 рода, которая смещается к центру цилиндра при увеличении угла γ .

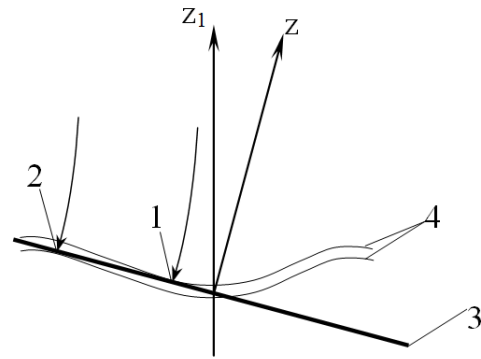


Рис. 2. Формирование «блестящих» точек на поверхности цилиндра

1 – «блестящая» точка первого рода, 2 – «блестящая» точка второго рода, 3 – плоскость основания цилиндра, 4 – образующие поверхности равных фаз $L = \text{const}_{1,2}$

При некотором угле $\gamma_{кр}$ обе точки сливаются в одну «блестящую» точку параболического типа. При этом выражение (14) утрачивает справедливость и необходимо иное асимптотическое разложение. Требуемое разложение получено в [5] с использованием приема последовательного применения метода стационарной фазы с разложением до 3-го порядка, так как в

рассматриваемой точке параболического типа $\partial^2 L / \partial \rho^2 = 0$.

Рассмотрим случай облучения цилиндра вдоль оси z_1 ($\gamma = 0$). В этом случае существует одна «блестящая» точка первого рода, которая совпадает с центром основания цилиндра. При этом вклад этой точки в рассеянное поле будет определяться выражением (14), в котором необходимо раскрыть неопределенность вида $0/0$, в результате получим

$$\vec{E}_{\partial l}(0) = \vec{e}_0 \frac{e^{ik(R+2L_0)}}{2R} \cdot \frac{2\sqrt{\alpha}}{\text{sh}(2\sqrt{\alpha}X)} K(z_0) \times \exp \left[-\frac{\nu_{\text{эфф}} \Phi^2}{2c} \int_{z_0}^a \frac{\sqrt{m^2 - \Phi^2}}{r^2 \sqrt{r^2 - \Phi^2}} dr \right], \quad (24)$$

где $K(z_0) = \frac{1}{1 - \frac{(z_0 + h)\sqrt{\varepsilon(0)}}{\sqrt{\alpha}} \text{th}(\sqrt{\alpha}X)}$ и

$$X = \arcsin \frac{1}{z_0 + h}.$$

На рис. 3 показана схема облучения цилиндра при $\gamma = 0$

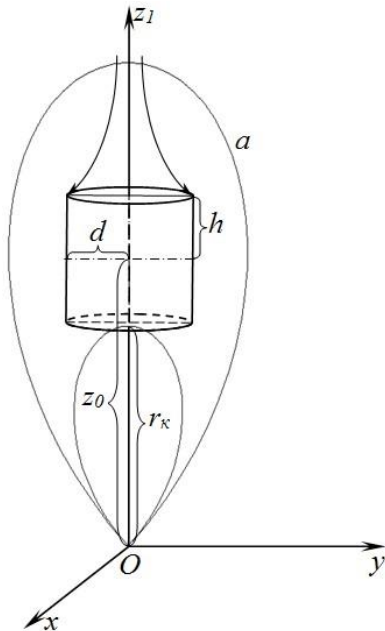


Рис. 3. Схема облучения цилиндра при $\gamma = 0$

Второй составляющей, вносящей вклад в общее поле рассеяния при облучении по нормали к плоскости основания цилиндра, является весь контур основания. Данное слагаемое определяется выражением

$$\vec{E}_{\text{кр}}(0) = \vec{e}_0 \frac{e^{ik(R+2L)}}{2R} \frac{\sqrt{r_d^2 - \Phi^2(\theta_d)}}{D_d \sqrt{r_d^2 - m_d^2}} [f(\psi_d) - g(\psi_d)] \times \exp \left[-\frac{\nu_{\text{эфф}} \Phi^2}{2c} \int_{\sqrt{z_0^2 + d^2}}^a \frac{\sqrt{m^2 - \Phi^2(\theta_d)}}{r_d^2 \sqrt{r_d^2 - \Phi^2(\theta_d)}} dr \right], \quad (25)$$

$$\text{где } f(\psi_d) - g(\psi_d) = \frac{r_d^2 \sqrt{r_d^2 - \Phi^2(\theta_d)}}{r \sqrt{m_d^2 - \Phi^2(\theta_d)} - a \sqrt{r_d^2 - m_d^2}}.$$

На основе вышеприведенных выражений были проведены расчеты диаграммы эффективной площади рассеяния цилиндра, расположенного в поглощающем плазменном образовании, при различных значениях смещения z_0 с учетом поглощения и без него. Расчеты проводились при условии $d = 0,5$, $h = 0,5$, $k_0 d = 6,6$, $\nu_{\text{эфф}} = 2 \cdot 10^9$.

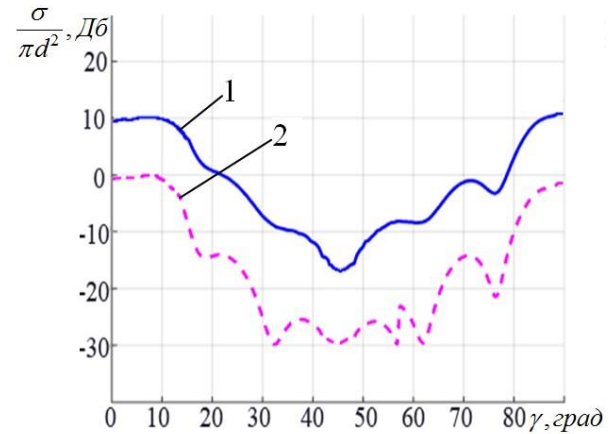


Рис. 4. Диаграммы ЭПР цилиндра в плазменном образовании (Е-поляризация):

- 1 — без поглощения при $z_0=1$;
- 2 — с поглощением, при $z_0=1$

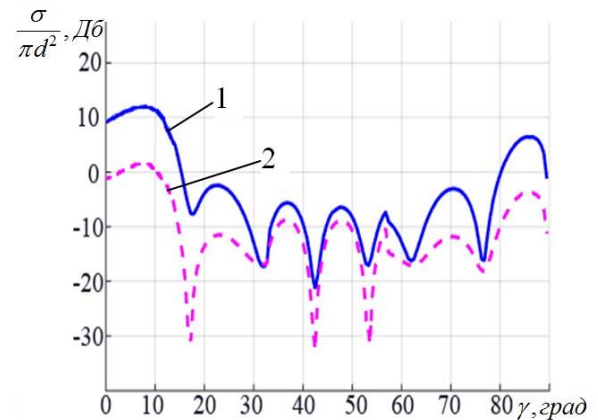


Рис. 5. Диаграммы ЭПР цилиндра в плазменном образовании (Н-поляризация):

- 1 — без поглощения при $z_0=1$;
- 2 — с поглощением, при $z_0=1$

Анализ диаграмм эффективной поверхности цилиндра (рис. 4, 5) показывает, что плазменное образование существенно изменяет их характер. Это обусловлено тем, что в плазменном образовании в результате рефракции электромагнитных волн происходит значительное изменение траектории их распространения. В связи с этим изменяются углы облучения «светящихся» точек. При этом наиболее чувствительной к этому изменению является краевая функция f . Поэтому существенное влияние плазменное образование оказывает на волну с Е-поляризацией, в то время как для Н-поляризации влияние плазмы на характер поведения диаграммы рассеяния цилиндра незначительно. Следует отметить, что в однородной среде [4] диаграммы ЭПР цилиндра имеют практически одинаковый характер для Е и Н поляризаций облучающей волны.

Поглощающие свойства плазменного образования в меньшей степени влияют на характер диаграммы рассеяния цилиндра, но при этом значительно уменьшают величину его ЭПР.

Таким образом, двумерно-неоднородное поглощающее плазменное образование в значительной степени обеспечивает как уменьше-

ние ЭПР цилиндра, так и угловую зависимость изменения его диаграммы рассеяния.

Литература

1. Колычев, С.А. Строгое решение скалярной задачи дифракции плоской волны на протяженных двумерно-неоднородных плазменных образованиях, содержащих металлическую сферу или цилиндр [Текст] / С. А. Колычев, А. П. Ярыгин // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. 29, № 1. – С. 5-11.
2. Ярыгин, А. П. Диаграмма эффективной поверхности рассеяния металлического диска, расположенного в плазменном образовании с радиальной и угловой неоднородностью [Текст] / А. П. Ярыгин // Радиотехника. – 2001. – № 6. – С. 87-90.
3. Кравцов, Ю. А. Геометрическая оптика неоднородных сред [Текст] / Ю. А. Кравцов, Ю. И. Орлов. – М.: Наука, 1980. – 304 с.
4. Уфимцев, П. Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. [Текст] / П. Я. Уфимцев. – М.: Советское радио, 1962. – 244 с.
5. Косенков, А.Н. Дифракция электромагнитных волн на идеально проводящем цилиндре [Текст] / А. Н. Косенков, А. П. Ярыгин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10, № 4 – С. 93-99.
6. Ярыгин, А. П. Вопросы дифракции электромагнитных волн на телах, расположенных в плавно неоднородной среде, возникающие в некоторых задачах радио-электронной защиты объектов: дис. ... канд. физ.-мат. наук / А. П. Ярыгин. – Воронеж, 1970, 141 с.

Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC WAVES BY A CYLINDER LOCATED IN TWO-DIMENSIONAL ABSORBING PLASMA FORMATION

A.N. Kosenkov, A.P. Yargin

The effect of absorbing properties of plasma formation with radial and angular inhomogeneity at the diffraction of electromagnetic waves by a perfectly conducting cylinder. It is shown that the use of absorbing plasma formations allows distort chart backscatter perfectly conducting cylinder placed in a two-dimensional inhomogeneous absorbing plasma formation

Key words: plasma formation, the eikonal, cylinder

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ С ИТЕРАЦИОННЫМ АЛГОРИТМОМ

Б.В. Матвеев, В.П. Дубыкин, Д.Ю. Крюков, Ю.С. Курьян, Е.М. Кирпичев

В представленной работе исследуются свойства разностно-дальномерной системы (РДС) произвольной конфигурации с итерационным алгоритмом по определению координат источников радиоизлучения (ИРИ) при круговом обзоре. С помощью математического моделирования проведен ряд исследований по определению «слепых зон» и секторов достоверного обнаружения. Сформулированы рекомендации по улучшению свойств РДС

Ключевые слова: разностно-дальномерная система, источник радиоизлучения, измерение координат, круговой обзор, зоны обнаружения

Введение

Среди различных способов определения координат источников радиоизлучения наиболее применяемым в последнее время является разностно-дальномерный метод. Разностно-дальномерная система представляет собой территориально распределенные приемные пункты (ПП), соединенные между собой линиями связи. Под ПП понимается радиоизмерительный приемник с ненаправленной антенной, на выходе которого выдается сигнал [1].

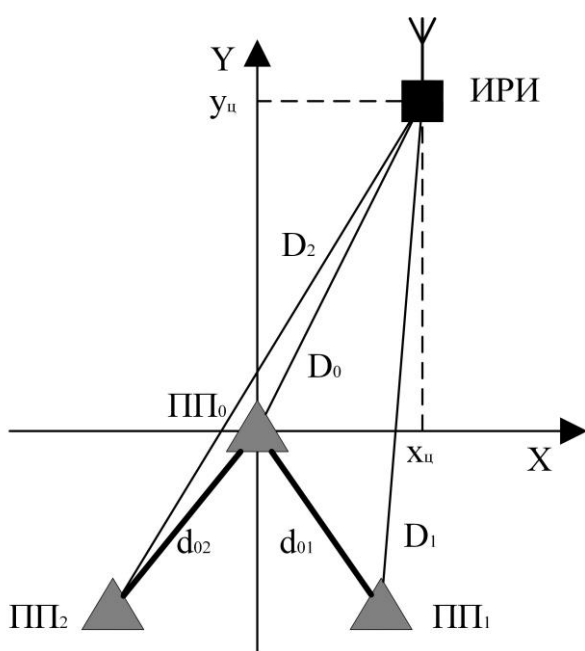


Рис. 1. Симметричная трехпозиционная РДС обнаружения координат ИРИ

Для определения плоскостных координат ИРИ требуются как минимум три ПП, которые могут быть расположены симметрично друг от друга (рис. 1) и с произвольной конфигурацией (рис. 2). Для того чтобы система нелинейных уравнений, связывающих координаты ИРИ, координаты приемных пунктов с разностями моментов прихода сигнала от ИРИ, не была переопределенной, один из ПП располагают на плоскости с координатами $x = 0, y = 0$.

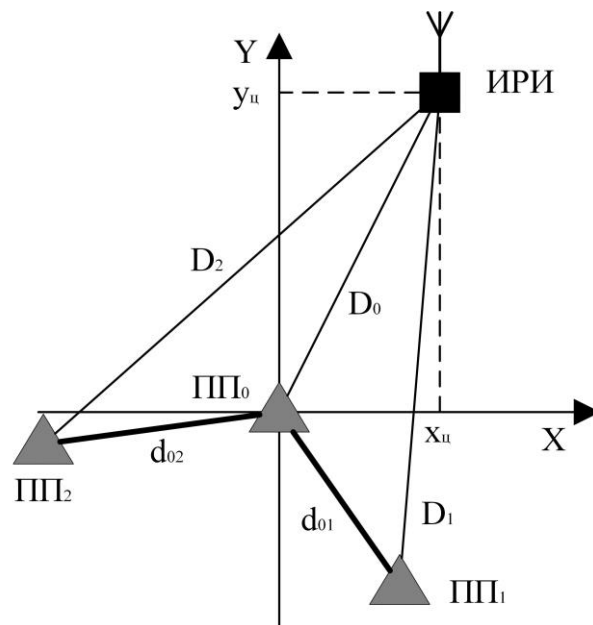


Рис. 2. Трехпозиционная РДС обнаружения координат ИРИ произвольной конфигурации

Исходной информацией для вычисления местоположения ИРИ являются координаты $ПП_i$ и разности дальностей $R_i = (D_i - D_0)$ на независимых базах d_{01} и d_{02} . Измерение разности дальностей эквивалентно измерению относительных временных сдвигов сигналов, прошедших разные пути распространения. Определение положения ИРИ в таких системах можно интерпретировать как вычисление координат точки пересечения гипербол (гиперболоидов), фокусы которых совпадают с положением ПП сигналов. В соответствии с этим выражение, связывающее коор-

Матвеев Борис Васильевич - ВГТУ, канд. техн. наук, профессор, тел. 8-960-138-4561

Дубыкин Владимир Прохорович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-951-547-86-34

Крюков Дмитрий Юрьевич - ВГТУ, студент, e-mail: KrukovDY@bk.ru

Курьян Юрий Сергеевич - ВГТУ, студент, e-mail: kuryanus@yandex.ru

Кирпичев Егор Максимович - ВГТУ, магистрант, тел. (473) 2437665

и далее из (7) определяем, что

$$\xi^{(p)} = W^{-1}(x^{(p)}) \cdot f(x^{(p)}), \quad (8)$$

где $W^{-1}(x^{(p)})$ - обратная матрица.

Новое приближение корня $x^{(p+1)}$ при очередной итерации получается, если (8) подставить в (3) и тогда

$$x^{(p+1)} = x^{(p)} - [f'(x^{(p)})]^{-1} f(x^{(p)}), \quad (9)$$

где $p = 0, 1, \dots, k$.

Расчетная модель определения координат ИРИ

Формирование расчетной модели предусматривает использование алгоритма решения систем нелинейных уравнений (3) для определения РДС координат ИРИ.

Последовательность процедур алгоритма обеспечивается с учетом следующих особенностей и условий функционирования РДС:

1. При использовании трех ПП аналитические выражения для определения расстояний от приемных пунктов до источника радиоизлучения, исходя из геометрии (рис. 3), записываются в виде

$$\begin{cases} D_0 = \sqrt{(x_0 - x_u)^2 + (y_0 - y_u)^2} \\ D_1 = \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2} \\ D_2 = \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2} \end{cases}, \quad (10)$$

где x_u, y_u - координаты ИРИ, x_i, y_i - координаты ПП.

2. Переход от дальностей (7) к временным характеристикам РДС, т. е. к расчету взаимных задержек τ_{01}, τ_{02} сигналов по независимым базам в предположении отсутствия ошибок при измерениях задержек сигнала обеспечивается расчетными формулами

$$\begin{cases} \tau_{01} = \left(\frac{D_0}{c} - \frac{D_1}{c} \right) \\ \tau_{02} = \left(\frac{D_0}{c} - \frac{D_2}{c} \right) \end{cases}, \quad (11)$$

где c - скорость распространения радиоволны.

3. Выражение для вектор-функции, которое является основой для расчетной модели итерационной процедуры составляется с учетом (7) и (8) в виде

$$\begin{cases} H_0 - H_1 - c\tau_{01} \\ H_0 - H_2 - c\tau_{02} \end{cases} = f(x, y) = 0, \quad (12)$$

где

$$\begin{cases} H_0 = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} \\ H_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\ H_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \end{cases}. \quad (13)$$

4. В соответствии с расчетным соотношением (9) и выражением для вектор-функции (12) организуются вычисления приближений к корням вектор-функции (12) в соответствии с расчетным соотношением, например, в формате Mathcad

$$\text{iter}(x, y) := \begin{matrix} \left[\begin{matrix} x \\ y \end{matrix} \right] - \left[\begin{matrix} \frac{d}{dx}(f(x, y)_0) & \frac{d}{dy}(f(x, y)_0) \\ \frac{d}{dx}(f(x, y)_1) & \frac{d}{dy}(f(x, y)_1) \end{matrix} \right]^{-1} \cdot f(x, y) \end{matrix} \quad (14)$$

5. Учет близости между текущим и приближением производится через вычисление «невязки» (norma), которое производят по соотношению

$$\text{norma}(x, y, x_1, y_1) := \begin{cases} a \leftarrow \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \\ a \end{cases}. \quad (15)$$

6. Итерационная процедура организуется последовательностью ряда вычислений с использованием выражений (14) и (15) до получения заданной точности «eps» между текущим и последующим значениями приближения корней из (14). Программная реализация вычислений может быть представлена в виде

$$\text{Newton}(x, y, \text{eps}) := \begin{matrix} \text{for } i \in 0..N \\ \quad Z \leftarrow \text{iter}(x, y) \\ \quad b \leftarrow \text{norma}(x, y, Z_0, Z_1) \\ \quad \text{if } b > \text{eps} \\ \quad \quad \left[\begin{matrix} x \leftarrow Z_0 \\ y \leftarrow Z_1 \end{matrix} \right] \\ \quad \text{break if } b < \text{eps} \\ Z \end{matrix} \quad (16)$$

Итогом итерационной процедуры являются координаты ИРИ x_u, y_u , определенные с заданной точностью.

Выбор начального приближения

Известно [2], что итерационные процедуры требуют рационального выбора начального приближения, от которого напрямую зависит количество итераций, сходимость алгоритма, его точность и надежность.

Функционирование РДС в таких условиях разбивается на два этапа: определение координат ИРИ в ближней зоне (внутри расположения ПП) и в дальней зоне (за пределами расположения ПП).

Моделирование РДС на основе рассмотренной расчетной модели для расположения ПП как на рис. 3 (ближняя зона) показало, что в этом случае координаты начального приближения могут быть выбраны в любой точке внутри геометрии расположения ПП при полной сходимости алгоритма. Из результатов следует, что оптимальным выбором положения начального приближения является точка с координатами геометрического центра за счет наименьшего количества итераций, требуемых для определения координат ИРИ.

В дальней зоне РДС (рис. 2) определение координат ИРИ неоднозначно. Проведенные исследования показали наличие «слепых зон» как для случая симметричной конфигурации (рис. 4), так и для произвольного расположения ПП (рис. 5) при выборе начального приближения в геометрическом центре.

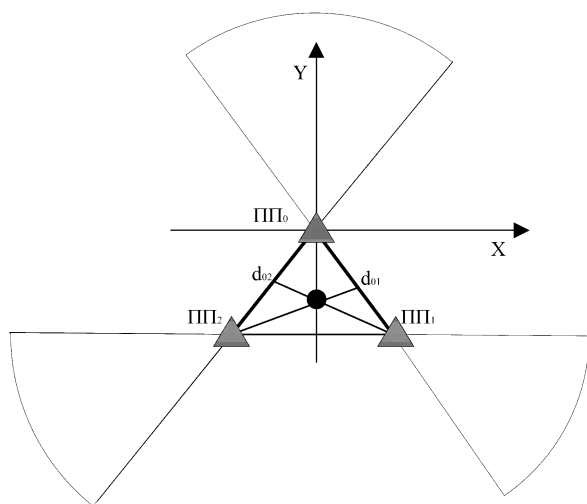


Рис. 4. РДС симметричной конфигурации

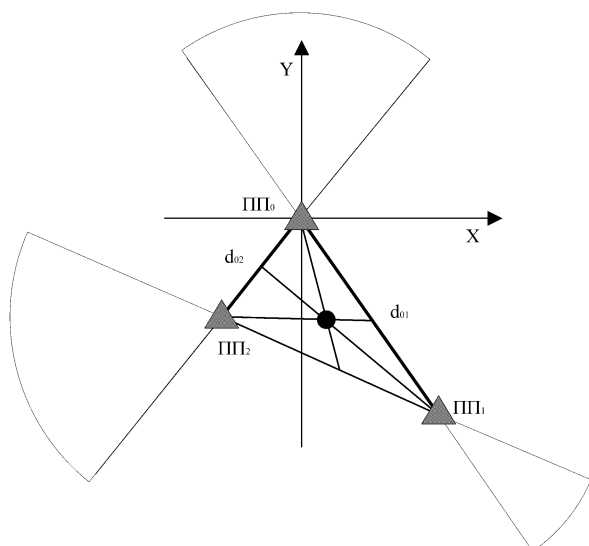


Рис. 5. РДС произвольной конфигурации

Геометрия «слепых зон» изменяется от конфигурации расположения ПП. В «слепых зонах» итерационный алгоритм не дает решение с заданной точностью.

Устранение этого недостатка возможно соответствующим подбором начального приближения

вне конфигурации системы (дальняя зона) с выбором направления на ИРИ.

Как показали исследования, направления на ИРИ зависят от соотношений между задержками сигналов по независимым базам.

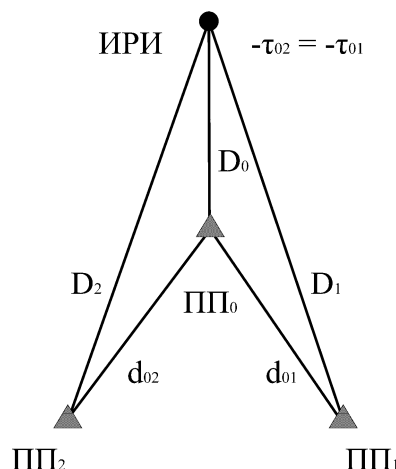


Рис. 6. Пример расположения ИРИ относительно ПП

Из рис. 6 видно, что расстояния от первого и второго ПП до ИРИ одинаковы и определяются по формуле (10). Зная, что расстояния пересчитываются в задержки, как показывает выражение (11), легко увидеть, что при таком расположении ИРИ задержки отрицательны и равны друг другу. Подбирая точки расположения ИРИ определенным образом, определим все возможные комбинации.

Рассмотрим различные варианты расположения ИРИ с соответствующими им временными характеристиками (рис. 7). На основании этого проиллюстрируем более наглядное представление зависимости комбинаций задержек от азимутального расположения источников радиоизлучения (рис. 8).

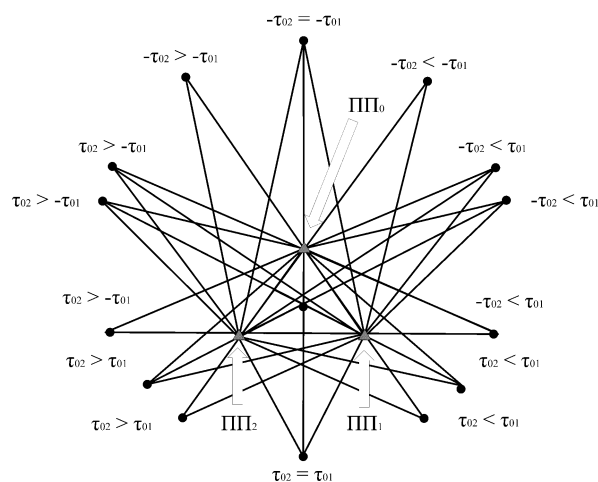


Рис. 7. Зависимости комбинаций задержек от расположения ИРИ

В итоге получим шесть секторов по 60 градусов, в одном из которых следует выбирать начальное

приближение в зависимости от расположения ИРИ для успешного решения. То есть сравнением двух разниц расстояний или задержек на практике можно определить сектор, где расположен ИРИ (рис. 8).

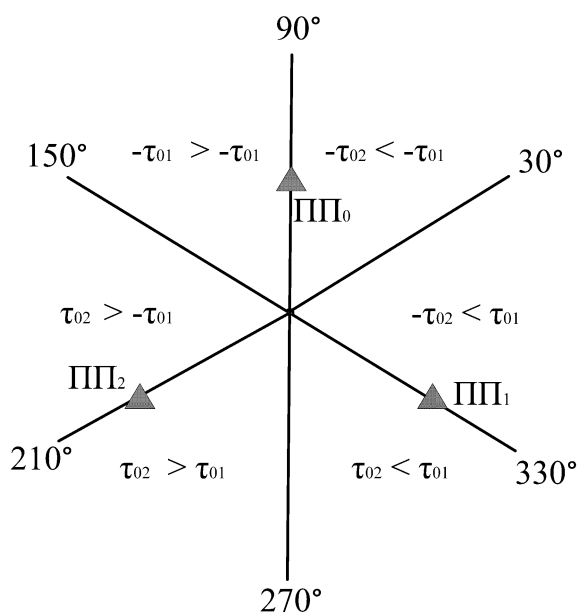


Рис. 8. Секторальное расположение задержек

Все расчеты были произведены для симметричной системы в виде равностороннего треугольника. Для несимметричного расположения ПП выявление зависимости задержек от местоположения ИРИ требует более глубокого изучения данной тематики и проведения иного математического моделирования.

Заключение

Таким образом, рассмотренный метод имеет свои достоинства и недостатки. Достоинства: сам алгоритм не вносит ошибки в определение координат; требует малого количества итераций при грамотном выборе начального приближения; задача внутри системы решается при всех возможных случаях; для симметричной системы «слепые зоны» устраняются; точность определения координат выше, чем у метода прямого алгебраического вычисления. Недостатки: задача нахождения координат ИРИ вне системы решается только не в «слепых зонах» и для симметрич-

ной системы; на практике сложно сделать разграничение на две задачи внутри и вне базы. Но оба эти недостатка устраняются, если в качестве начального приближения использовать координаты ИРИ, полученные при методе прямого алгебраического вычисления.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) проект №13-08-97538-р. центр. а.

Литература

1. Черняк, В.С. Многопозиционная радиолокация. – [Текст] / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. Деннис, Дж., мл. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений [Текст]: пер. с англ. / Дж. Деннис, мл., Р. Шнабель. – М.: Мир, 1988. – 440 с.
3. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука. 1978. – 831 с.
4. Оценка влияния выбора опорной точки для итерационной процедуры определения координат источника радиоизлучений в разностно-дальномерной системе [Текст] / В.П. Дубыкин, Б.В. Матвеев, Р.В. Степаненко, А.А. Саликов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т.8, №3. – С.9-12.
5. Симаков, В.А. Определение плоскостных и пространственных координат источников радиоизлучения автономными разностно-дальномерными системами пассивной локации [Текст] / В.А. Симаков, В.М. Терешко // Приоритеты военно-технической деятельности ФПС России по предупреждению и пресечению террористической деятельности на современном этапе: науч.-техн. сб. по материалам межвед. конф.; НИИТЦ ФПС. – М., 2003. – С. 45-47.
6. Моделирование М-позиционной пассивной разностно-дальномерной системы обнаружения сигналов и измерения координат источников радиоизлучения [Текст] / В.П. Дубыкин, Д.Ю. Крюков, Ю.С. Курьян, Д.В. Асотов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т.9, №6-1. – С.44-47.
7. Монаков, А.А. Основы математического моделирования радиотехнических систем [Текст]: учеб. пособие / А. А. Монаков. – СПб.: ГУАП, 2005. 100 с.: ил.
8. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория [Текст]: справочник / под ред. Я.Д. Ширмана. – изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.: ил.
9. Knopp, R. 'Remark on algorithm 334 [G5]: normal random deviates' [Text] / R. Knopp // Communications of the ACM. – Vol. 12, No. 5. – 1969.

Воронежский государственный технический университет

INVESTIGATION DIFFERENCE – RANGEFINDER SYSTEM OF ARBITRARY CONFIGURATION ITERATIVE ALGORITHM

B.V. Matveev, V.P. Dubykin, D.Yu. Kryukov, Yu.S. Kuryan, E.M. Kirpichev

In this work, we study the properties range-difference system arbitrary configuration with an iterative algorithm for the detection of the coordinates of radio sources at the circular review. With the help of mathematical modeling of a number of studies on the definition of "blind spots" and sectors of reliable detection. Recommendations are made to improve the properties of the range-difference system

Key words: difference-rangefinder system, radio source, coordinate measuring, circular review, detection zones

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КРИСТАЛЛЫ, ИХ ОСОБЕННОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ**А.С. Авдюшин, М.Ю. Власов, Ю.Г. Пастернак, А.П. Ярыгин**

В статье приводится обзор информации и научных работ об электромагнитных кристаллах, дается краткое описание особенностей распространяющихся в них электромагнитных волн

Ключевые слова: электромагнитные кристаллы, метаматериалы, отрицательная среда, киральная среда

Начиная с девяностых годов XX века в научной литературе наблюдается лавинообразный рост публикаций по ряду направлений, которые впоследствии были объединены общим названием «метаматериалы». К этим направлениям относятся бианизотропные и киральные среды, фотонные, электромагнитные, магнитные и фоновые кристаллы, отрицательные среды и т.д. Все перечисленные структуры представляют собой искусственные объекты, в которых могут распространяться волны различной природы. Интерес к этим объектам обусловлен тем, что они часто обладают свойствами, которые либо вообще не встречаются в естественных средах, либо выражены весьма слабо. Наибольшее внимание исследователей привлекали электромагнитные волны и, соответственно, электромагнитные свойства метаматериалов [1]. Тем не менее, особенно когда речь идет о кристаллических метаматериалах, следует отметить работы, посвященные свойствам спиновых (магнитостатических) [2] и акустических волн [3] в искусственных средах.

Идея искусственной среды появилась задолго до девяностых годов [4]. Основой искусственной среды служит искусственная частица, которая может иметь произвольную структуру. В качестве таких частиц используют диэлектрические, металлические, магнитные и другие образцы различной формы: сферы, цилиндры и т.д. [5]. Искусственные частицы располагаются в некотором объеме, формируя искусственный материал. Распределение частиц в объеме может быть случайным или регулярным, когда частицы располагаются упорядоченно в узлах решетки. В последнем случае уместно говорить об искусственном кристалле.

Искусственные материалы, как они понимались на первых этапах исследования, имели две существенные особенности:

- характерное расстояние между частицами (в случае упорядоченного расположения частиц – период решетки) много меньше длины волны в среде;

- частица имеет простую структуру, т.е. обладает малыми по отношению к длине волны размерами, не имеет резонансных или особых пространственных свойств.

Выполнение этих условий позволяло описывать искусственные материалы в терминах усредненных макроскопических параметров, таких как диэлектрическая и магнитная проницаемости. Качественный скачок в исследовании искусственных сред и переход к метаматериалам был обусловлен снятием ограничений на свойства частиц и расстояния между ними [6].

Увеличение периода решетки искусственного кристалла до размеров, сравнимых с половиной длины волны, привело к появлению ряда новых физических особенностей у волн в таких кристаллах. Все они связаны со структурными резонансами, наиболее ярким проявлением которых является появление полосы запирания, в которой волна становится затухающей [7]. При этом ее поле описывается экспонентой с действительным показателем. Оказалось, что при определенных условиях возможно создание сред, в которых в некоторой полосе частот будут отсутствовать распространяющиеся волны [8]. То есть ни при каких направлениях и ни для какой поляризации волна не может иметь действительную постоянную распространения. Указанная полоса частот называется полосой запирания.

Впервые такие кристаллы были предложены для использования в оптическом диапазоне частот [9]. По этой причине для них был предложен англоязычный термин photonic bandgap (PBG) crystal, который можно перевести на русский язык как «фотонный кристалл в запрещенной зоне» (полосе запирания).

Поскольку с точки зрения распространения между волнами оптического и СВЧ-диапазонов существенной разницы нет, то вскоре появились электромагнитные и electromagnetic bandgap (EBG) кристаллы, являющиеся полным аналогом фотонных кристаллов, но в СВЧ-диапазоне [10]. Построение феноменологической модели электромагнитного кристалла, позволяющей определить параметры его собственных волн, показано в работе [1] с использованием результатов работ [11-17]. Эффекты, возникающие на границах электромагнитных кристаллов, также описаны в работе [1] с применением соотношений, полученных в [18-25].

Приставка «мета» в переводе с греческого означает «следующий». Таким образом, метамате-

Авдюшин Артем Сергеевич – ЗАО «ИРКОС», нач. отдела, e-mail: AvdushinAS@gmail.com.

Власов Михаил Юрьевич – ВГТУ, аспирант, e-mail: mivlas@inbox.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: PasternakYG@mail.ru.

Ярыгин Анатолий Петрович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: YaryginAP@mail.ru

риал – это следующий за материалом (за «обычным» искусственным материалом). В этом смысле перечисленные выше классы искусственных кристаллических структур имеет смысл называть метакристаллами, которые являются следующим этапом развития «обычных» кристаллов. На сегодня термин метакристаллы объединяет фотонные, электромагнитные, магнитные и фононные кристаллы. В будущем можно ожидать появления новых типов метакристаллов.

В теории периодических структур появление запрещенных зон известно достаточно давно [26]. Его связывают с синфазным сложением отраженных волн от периодически расположенных нерегулярностей. В электромагнитном кристалле в качестве таких нерегулярностей выступают слои частиц (см. рис. 1).

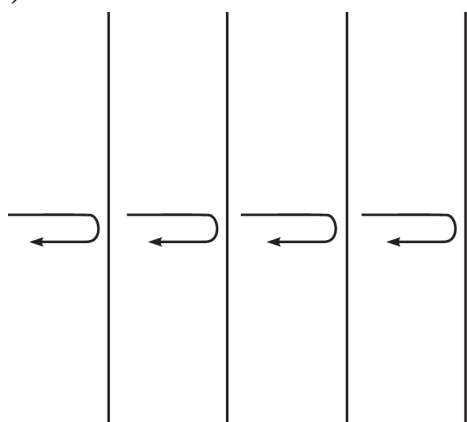


Рис. 1. Синфазное сложение волн, отраженных от слоев электромагнитного кристалла

Если расстояние между слоями кратно половине длины волны в среде, в которой они расположены, то отраженные волны суммируются синфазно. Поэтому на частотах, соответствующих этому условию, собственная волна периодической структуры оказывается нераспространяющейся. Ее волновое число является мнимой величиной, которая характеризует скорость затухания волны. В оптическом диапазоне эффект синфазного сложения отраженных волн называют брэгговским отражением. Процессы формирования запрещенных зон в двумерных электромагнитных кристаллах подробно рассмотрены в работах [27-29].

В одномерных электромагнитных кристаллах, образованных диэлектрическими слоями (см. рис. 2), могут существовать запрещенные зоны, в которых плоско-слоистая структура не пропускает, а полностью отражает электромагнитные волны. Это свойство представляет большой интерес для создания в оптическом диапазоне сильно отражающих поверхностей. Проблема в том, что металлы в видимом диапазоне ведут себя принципиально иначе, чем на СВЧ, и не могут выполнять функцию поверхности с большим коэффициентом отражения. Напротив, различные периодические структуры, находящиеся в полосе запираения, могут играть такую роль.

Полоса запираения – не единственное физическое явление, связанное с увеличением периода кристаллической решетки. Ему предшествует явление пространственной дисперсии, связанное с нелокальностью взаимодействия поля с материальной средой [30]. Классическая теория исходит из того, что векторы электрической и магнитной индукции связаны с векторами электрического и магнитного полей локально, т. е. значение индукции в точке связано со значением поля в той же точке пространства. При увеличении периода решетки такое предположение оказывается несправедливым. В этом случае указанные выше векторы связываются интегральным оператором, определенным в некоторой области около точки наблюдения. Переход от точки к области означает нелокальный характер связи. Ее внешним проявлением служит, в частности, зависимость (дисперсия) постоянных распространения волн в среде от направления их распространения, которая послужила основанием для использования термина «пространственная дисперсия».

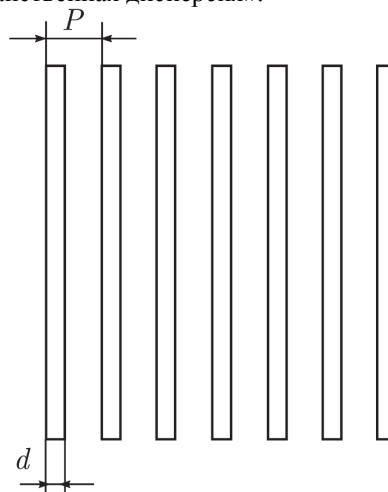


Рис. 2. Структура, образованная диэлектрическими слоями

Нелокальность взаимодействия полей вообще характерна для метакристаллов [31]. Кроме усложнения материальных уравнений она существенно меняет взаимодействие волн на границе такой среды и свободного пространства [32]. В общем случае это взаимодействие также становится нелокальным. На границе «обычных» сред устанавливаются локальные граничные условия непрерывности тангенциальных компонент электрического и магнитного полей. Эти условия становятся некорректными, когда речь идет о метаматериале с достаточно большим периодом, так как взаимодействие волн на границе с пространственно дисперсионной средой также становится нелокальным и требует использования других граничных условий [33].

К числу физических явлений, обусловленных усложнением структуры частиц, формирующих искусственную среду, следует отнести киральность [34]. Один из наиболее простых способов создать киральную среду – это использовать в качестве частицы спираль из обыкновенной проволоки [35]. Удивительным свойством спирали является ее реак-

ция на внешнее поле, которую можно описать суммой электрического и магнитного дипольных моментов. Таким образом, внешнее электрическое поле порождает вторичное поле, которое можно описать как сумму полей электрического и магнитного элементарных диполей. В некиральных средах электрическое поле создает электрический дипольный момент, а магнитное – только магнитный. Явление киральности с точки зрения макроскопических параметров среды приводит к связи вектора электрической индукции с магнитным полем, а вектора магнитной индукции – с электрическим полем.

Киральные среды могут иметь анизотропные свойства и в этом случае они называются киральными анизотропными средами [36]. Такие среды остаются взаимными. В самом общем случае, когда в анизотропной среде не выполняется принцип взаимности, она называется бианизотропной средой.

Существенным образом на параметры метаматериала и метакристалла, в частности, влияют резонансные свойства частицы. Оказывается, что частицы определенной структуры демонстрируют резонансные свойства, выражающиеся в резком изменении их параметров некотором диапазоне частот [37]. Резонансы частиц имеют квазистатическую природу, поскольку размер самой частицы весьма мал. Таким образом, ее можно рассматривать как некоторый контур, имеющий свою собственную частоту и добротность. Материальные параметры среды, составленной из резонирующих частиц, выделяет наличие области частот, в которой они оказываются отрицательными [38]. Существенно, что могут быть предложены такие материалы, у которых одновременно и диэлектрическая, и магнитная проницаемости будут меньше нуля. Такие среды называются отрицательными средами. В англоязычной литературе используют термин *double negative* [39], т.е. дважды отрицательная среда, который, возможно, лучше отражает физические особенности среды, но в русском варианте он распространения не получил.

Проще всего можно получить отрицательные значения эффективной диэлектрической проницаемости в двумерных проволочных структурах, которые в англоязычной литературе получили название *wire media*, т.е. проволочные среды [40]. Пример такой структуры, образованной металлическими цилиндрами (нитеями), показан на рис. 3.

Структура, изображенная на рис. 3, безусловно, обладает анизотропией, и ее можно рассматривать в качестве среды с отрицательной ϵ_e только для волны, имеющей компоненту электрического поля E_x . При этом волны могут распространяться только в плоскости YOZ, т.е. $\partial/\partial x \equiv 0$. На рис. 4 показана зависимость от частоты эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_e для проволочной среды с расстоянием между частицами, равным 3 мм, и диаметром проволочных частиц, равным 0,05 мм [1]. Из этого рисунка хорошо видно, что на низких частотах ϵ_e оказывается меньше нуля. Существенно, что отрицательной диэлектрической проницаемостью будет вплоть до нулевой частоты. Начиная с некоторой частоты, которую можно назвать критической, ди-

электрическая проницаемость оказывается положительной величиной.

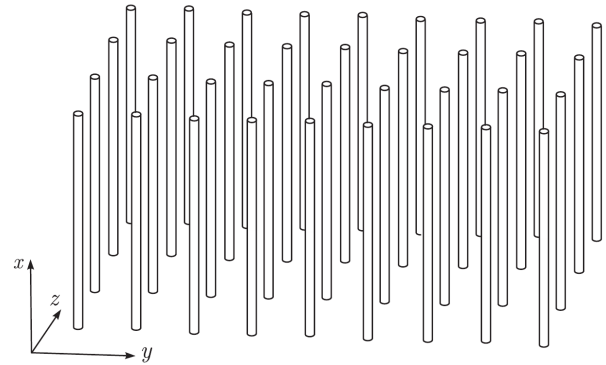


Рис. 3. Проволочная среда

Отрицательная ϵ_e делает постоянную распространения волны в среде мнимой, а саму волну нераспространяющейся, запредельной. Ее поле экспоненциально затухает. Подобные волны встречаются также в плазме [41].

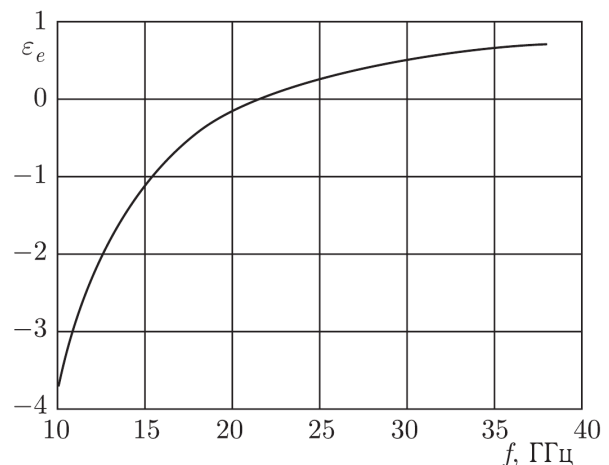


Рис. 4. Эффективная диэлектрическая проницаемость проволочной среды

Значительно более сложной проблемой является создание отрицательной магнитной проницаемости. Точнее, проблемой является просто создание структур с существенными магнитными свойствами. Дело в том, что в природе магнитные заряды не существуют. Поэтому магнитный диполь может быть реализован только с помощью электрических токов. Известно, что кольцевой электрический ток создает поле, которое на некотором удалении от него (дальнее поле) может быть описано как поле магнитного диполя (см. рис. 5).

Однако интенсивность этого поля много меньше, чем интенсивность поля, создаваемого линейным электрическим током с той же амплитудой. Причина этого понятна, так как элементы тока, расположенные на противоположных сторонах кольца, направлены в разные стороны, и их поля компенсируют друг друга.

Поэтому, если мы, например, создаем магнитный диполь с помощью металлической рамки, то ее

дипольный момент намного меньше, чем электрический дипольный момент металлической проволоки. Поэтому, чтобы создать среду с заметными магнитными свойствами, необходимо усилить эффективность взаимодействия поля с магнитным диполем, точнее, со структурой, которая выполняет функцию магнитного диполя.

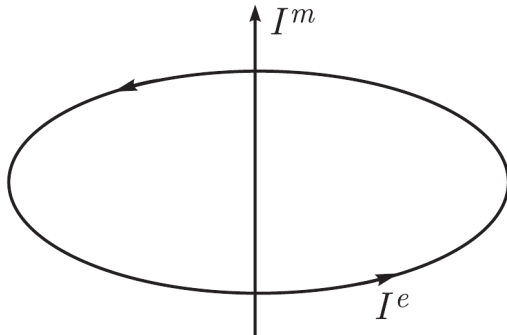


Рис. 5. Магнитный диполь в виде кольцевого электрического тока

Средством усиления взаимодействия служит резонанс, который в некоторой полосе частот увеличивает амплитуду тока и, как следствие, магнитный дипольный момент. Можно предложить большое число структур, имеющих резонансные свойства, поле которых близко к полю магнитного диполя. Наибольшее распространение получили так называемые split ring резонаторы, т. е. резонаторы на расщепленных кольцах. Пример такого резонатора показан на рис. 6 [42].

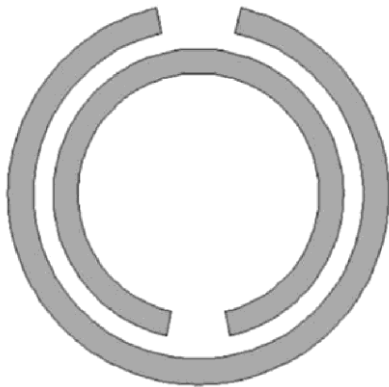


Рис. 6. Резонатор с расщепленными кольцами

Резонатор данного типа имеет квазистатическую природу и напоминает резонансный контур на сосредоточенных емкостях и индуктивностях. Металлические проводники шириной, много меньшей длины волны, характеризуются индуктивностью, а зазоры между внешним и внутренним кольцами создают емкости. Таким образом, электрические токи на кольцах замыкаются через токи смещения в емкостных зазорах, создавая единый кольцевой ток. На частоте резонанса, когда реактивные импедансы емкостей и индуктивностей совпадают, происходит резкое усиление тока, эквивалентное росту магнитного дипольного момента. Важным достоинством резонатора на расщепленных кольцах являются его

малые по сравнению с длиной волны размеры, которые позволяют создавать структуры с малым периодом.

Типичная частотная зависимость действительной и мнимой частей магнитной проницаемости μ_e показана на рис. 7.

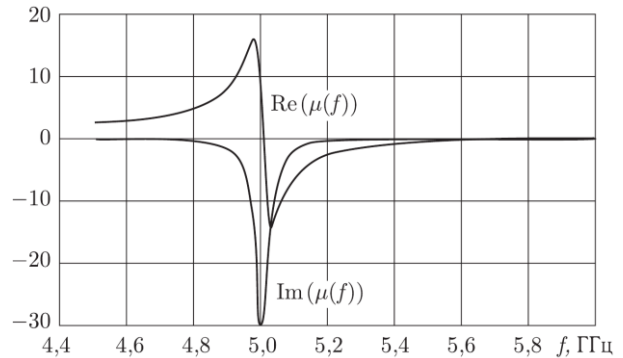


Рис. 7. Частотная зависимость действительной и мнимой частей магнитной проницаемости

Из этого рисунка видно, что на частотах выше резонансной действительная часть магнитной проницаемости меньше нуля. При удалении от резонанса она стремится к единице. Мнимая часть отрицательна. По абсолютной величине она резко растет на частоте резонанса, а затем падает быстрее, чем мнимая часть стремится к единице. Поэтому можно выделить такую область частот, в которой, с одной стороны, $Re(\mu_e) < 0$, а с другой — $Im(\mu_e)$ достаточно мало.

Комбинация электрических и магнитных диполей позволяет создать среду, имеющую одновременно отрицательные ϵ_e и μ_e . Такие среды получили название double negative [39], т.е. дважды отрицательные среды. В русскоязычной литературе используется термин «отрицательная среда» [43]. Одна из первых попыток создать отрицательную среду была основана на использовании двумерно-периодической решетки из металлических стержней, которые играли роль электрических диполей, и резонаторов на расщепленных кольцах [44]. Эта структура схематично показана на рис. 8.

В работе [45] был предложен интересный вариант создания отрицательной среды с помощью спиральных частиц, длина спирали в которых имеет резонансные размеры.

В качестве частицы рассматриваются металлические спирали (см. рис. 9).

Электрический ток в спирали течет вдоль металлического проводника. Поэтому он имеет азимутальную (кольцевую) и продольную (вдоль оси спирали) компоненты. Азимутальная компонента электрического тока формирует магнитный диполь, а продольная компонента — электрический. Таким образом, спираль представляет собой довольно сложный объект, который описывается совокупностью двух диполей.

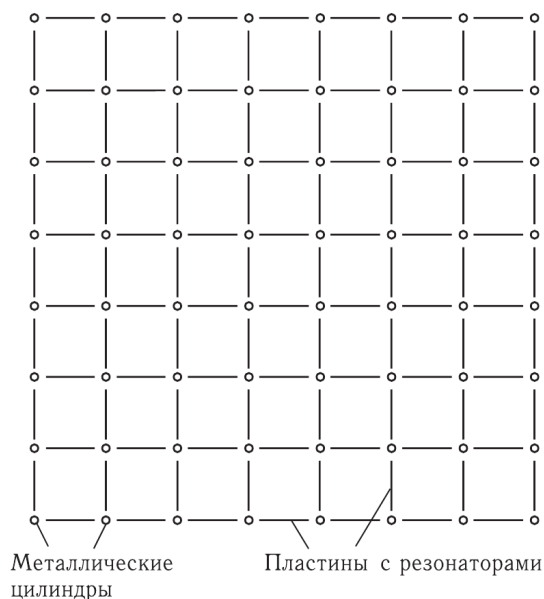


Рис. 8. Двумерная отрицательная среда

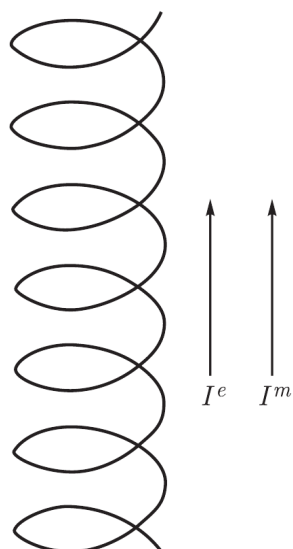


Рис. 9. Спиральная частица

Важным обстоятельством является то, что внешнее электрическое поле, создавая в спирали электрический ток, одновременно возбуждает как электрический, так и магнитный диполи. Точно так же действует и внешнее магнитное поле. Частицы такого типа являются киральными частицами, а среды на их основе - киральными.

Спираль - наиболее распространенный вид киральных частиц. Особенностью спирали является то, что ее поле может быть представлено в виде поля двух элементарных диполей - электрического и магнитного, направленных вдоль оси спирали.

Одна спираль обладает анизотропией. Изотропная киральная частица может быть получена с помощью трех спиралей, ориентированных вдоль координатных осей $0x, 0y, 0z$ (см. рис. 10).

Спиральная частица имеет магнитный момент. На частотах, когда длина проводника спирали близка к половине длины волны в свободном простран-

стве, в ней возникает резонанс. Отметим, что длина самой спирали при больших углах намотки оказывается много меньше длины проводника. Поэтому условие близости ее к половине длины волны не означает, что вся частица также имеет аналогичные размеры. На резонансе, который наступает одновременно для электрического и магнитного диполей, так как они создаются одним и тем же электрическим током, резко усиливаются дипольные моменты и возникает область частот, в которой одновременно и диэлектрическая и магнитная проницаемости отрицательны. Таким образом, мы получаем отрицательную среду.

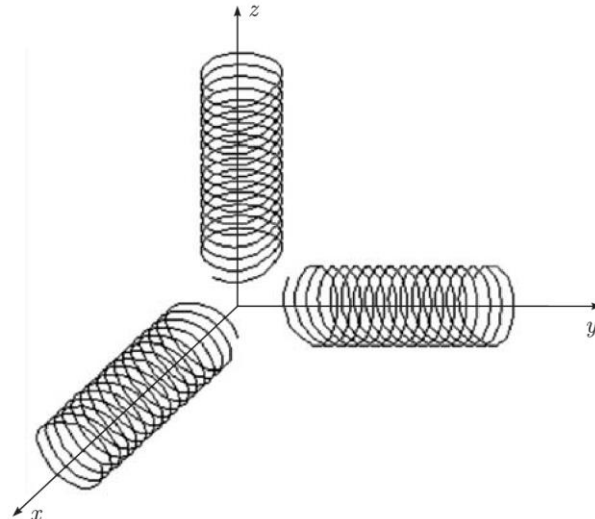


Рис. 10. Изотропная киральная частица

Отрицательные среды обладают рядом удивительных свойств. Интересно, что некоторые свойства волн в отрицательных средах были исследованы еще в шестидесятые годы XX века В.Г. Веселаго [46]. Он, в частности, показал, что волны в отрицательных средах являются обратными волнами, для которых действуют новые законы преломления. Однако теория В. Г. Веселаго была чисто феноменологической. В ней никак не ставился вопрос о реализации такой среды.

Создание отрицательной среды было связано с «конструированием» специального метакристалла, который был исследован затем экспериментально [44, 47]. Таким образом, развитие метаматериалов создало условия для экспериментальной, а затем технологической реализации отрицательных сред. При этом, конечно, следует учитывать, что само развитие этого направления сильно стимулировалось надеждой на реализацию уникальных свойств структур, содержащих отрицательные среды.

К числу таких структур, безусловно, относится линза Веселаго, представляющая собой пластину из отрицательной среды. В работе [48] впервые был теоретически обоснован эффект сверхфокусировки поля линзой Веселаго. В ряде последующих работ [44, 47] этот эффект был экспериментально подтвержден. Несмотря на теоретическую небезупречность работы Дж. Пендри, она явилась сильным стимулом развития целого направления, связанного

с исследованием и экспериментальной реализацией сферхфокусировки.

Линза Веселаго представляет собой одиночный слой отрицательной среды с $\varepsilon_e = \mu_e = -1$. Интерес к этому объекту обусловлен тем, что в нем может быть реализована предсказанная в работе [48] сферхфокусировка электромагнитного поля, т. е. концентрация поля в области меньшей, чем допускает известный в оптике критерий Рэлея [49]. Несмотря на исключительную геометрическую простоту линзы Веселаго, ее теоретическое исследование потребовало коррекции классического подхода к анализу плоско-слоистых структур, изложенному в монографиях [50, 51].

Последовательная теория линзы Веселаго начала разрабатываться в работах А.Д. Шатрова [52], в которых он, в частности, показал, что задача о возбуждении магнито-диэлектрического слоя с $\varepsilon = -1$ и $\mu = -1$ математически некорректна. Продолжением работы [52] можно считать работу [53], в которой был получен ряд аналитических оценок эффекта сферхфокусировки.

В работе [54] В.В. Шевченко представил альтернативный подход к описанию электромагнитных явлений в линзе Веселаго. Он основан на использовании нового интегрального представления поля. Достоинство такого интегрального представления состоит в том, что оно естественным образом описывает как расходящиеся, так и сходящиеся волны. При этом при $\varepsilon = -1$ и $\mu = -1$ не возникают расходящиеся интегралы. Автору работы [54] впервые удалось математически корректно показать, что в предельном случае при $\varepsilon = -1$ и $\mu = -1$ одиночная граница раздела двух сред с положительными и отрицательными материальными параметрами осуществляет идеальную фокусировку поля. Следует отметить, что теория, развитая в [54], не описывает случаев $\varepsilon = -1$, $\mu \neq -1$ и рассматривает каждую границу линзы независимо друг от друга.

Линза Веселаго является резонансным объектом. Резонанс, связанный с вырождением прямой и обратной собственных волн в продольно однородной структуре, был впервые изучен в работе [55], в которой исследовались волны плазменного слоя. При отсутствии потерь добротность резонатора стремится к бесконечности. По этой причине задача возбуждения такого резонатора при $\varepsilon, \mu = -1$ является некорректной задачей, так как поле резонирующего колебания стремится к бесконечности. Следовательно, корректный анализ линзы Веселаго обязательно должен подразумевать наличие потерь в структуре. Потери могут быть обусловлены потерями в среде или потерями в приемнике (см. [56]).

Продольный резонанс собственных волн пластины, образующей линзу Веселаго, не является резонансом затухающих волн. Усиление затухающих волн, получившее это название (см., например, [57]), является причиной сферхфокусировки. В нашем случае, наоборот, продольный резонанс негативно сказывается на сферхфокусировке, поскольку она обеспечивается, как показано ранее, волнами непрерывного спектра (интеграл по берегу разреза).

Резонансная добавка от дискретного спектра волн только ослабляет эффект сферхфокусировки.

Другим необычным эффектом, который предсказан пока только теоретически и который также основан на использовании отрицательных сред, является эффект невидимости [58]. В англоязычной литературе для него используется термин *cloaking* – маскировка, который более адекватно отражает существо явления. Речь идет о создании специального укрытия, которое отклоняет электромагнитные волны таким образом, что они огибают объект, расположенный внутри него. В результате объект становится «невидимым», прозрачным для электромагнитных волн. Таким образом, свойства самого объекта остаются неизменными, но укрытие из отрицательной среды маскирует его [59].

Продолжая разговор о метаматериалах и их практическом использовании, следует остановиться на метакристаллах с дефектами. Интерес к дефектам в фотонных кристаллах был стимулирован потребностью оптических устройств в эффективно отражающих поверхностях и средах, которые могли бы сыграть роль, аналогичную той, что играют металлы в СВЧ-диапазоне. В запрещенной зоне фотонный кристалл представляет собой среду, в которой электромагнитные волны не могут распространяться [60]. Они экспоненциально затухают аналогично волнам в металле или плазме. В этом случае, вводя в фотонный кристалл дефект, например, удаляя элемент кристалла из решетки, мы создаем некоторую полость. В этой полости может накапливаться электромагнитная энергия, так как излучиться оттуда она не в состоянии, поскольку полость окружена средой, полностью отражающей электромагнитные волны. Таким образом, мы получаем возможность создать высокодобротный резонатор [61].

Продолжая процесс формирования дефектов в фотонных кристаллах путем удаления элементов из решетки, можно создать волноведущий канал – волновод, который обеспечивает направленную передачу электромагнитной энергии вдоль своей оси [62]. Далее, формируя волноводные сочленения, изгибая волноводы и т.д., мы можем создавать широкий спектр функциональных элементов и устройств на их основе [63]. Эти устройства обладают рядом уникальных свойств, которые определяют перспективность их применения в оптическом и СВЧ-диапазонах. Принципы построения волноводных СВЧ-устройств на основе электромагнитных кристаллов с использованием результатов работ [64–71] приведены в [1]. В этой же работе приведены принципы построения EBG-волноводов, связанных волноводов и устройств на их основе, основанные на работах [72–78].

Интересные физические эффекты наблюдаются при введении дефекта в одномерный электромагнитный кристалл, находящийся в полосе запираания. В работе [79] было показано, что введение дефекта может приводить к возникновению высокодобротных колебаний, получивших название Юховских колебаний [80]. Два дефекта могут сформировать систему связанных колебаний. Увеличение числа

дефектов образует многосвязанную систему, способную играть роль полосового фильтра.

На рис. 11 представлены зависимости модулей коэффициентов прохождения и отражения (кривые 1 и 2) от частоты, построенные для следующих параметров: $\varepsilon = 3$, $P = 15$, $d = 2$, $N = 15$. Эти зависимости имеют типичный для периодических структур вид.

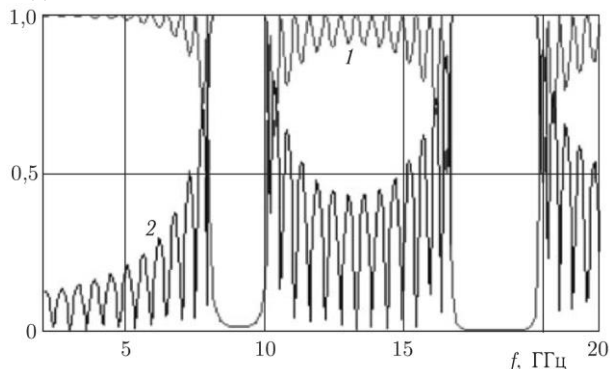


Рис. 11. Частотные характеристики регулярной структуры

В окрестности частоты 9 ГГц наблюдается полоса запираания первого порядка. Вторая полоса запираания располагается в окрестности удвоенной частоты, равной примерно 18 ГГц. В пределах полосы запираания электромагнитная энергия не проходит через периодическую структуру и практически полностью отражается от нее. Показательно также то, что в полосе пропускания наблюдаются сильные пульсации модуля коэффициента передачи, что еще раз подтверждает тот факт, что простая периодическая структура не обеспечивает частотную характеристику, которая обычно требуется от фильтра [81].

Колебания в дефектах в одномерных плоско-слоистых электромагнитных кристаллах получили названия юховских колебаний. Как уже отмечалось выше, они нашли наибольшее применение в оптическом диапазоне. Может быть, по этой причине многие авторы видели аналогию между такого типа и квантовыми процессами в твердом теле, где тоже есть запрещенные зоны и резонансы проводимости, обусловленные дефектами [82]. Однако нам кажется, что в электродинамике есть структуры, которые намного ближе по физике своего функционирования к рассмотренным выше. К ним можно отнести диэлектрические резонаторы в запердельных волноводах [83].

Для описания электродинамических явлений в электромагнитных кристаллах с дефектами используется метод компенсирующих источников [84] — численный метод, позволяющий находить количественные связи между параметрами сложных структур, а также метод теоретического исследования таких структур, позволяющий решать фундаментальные для этого класса объектов задачи. Смысл применения этого метода состоит не только в его эффективности, которая весьма высока, но также и в том, что он позволяет анализировать идеализированные структуры, такие как бесконечный волно-

вод, образованный последовательностью дефектов в кристалле, связанные волноводы и т.д. С его помощью можно решать задачи о собственных волнах таких волноводов, что служит основой для корректного использования классического аппарата матриц рассеяния, описывающих сложные многополюсники. Решение ряда ключевых задач для метода компенсирующих источников с использованием соотношений, полученных в [85-89], приведено в [1]. В этой работе с использованием соотношений, полученных в работах [12, 90-92], также описывается применение метода компенсирующих источников для щелевых решеток.

Интересные перспективы с точки зрения практического использования имеют отражающие поверхности на основе фотонных и электромагнитных кристаллов, которые можно назвать метаповерхностями [93]. С их помощью можно создавать, например, не встречающиеся в естественных условиях магнитные стенки, т.е. поверхности, на которых выполняется граничное условие равенства нулю тангенциальных компонент магнитного поля [94]. Такие структуры находят применение в антенной технике при создании сверхмалогабаритных направленных антенн, а также других типов антенн с необычными свойствами [95]. Особенности распространения собственных волн в планарных периодических структурах на базе [96-102] рассматриваются в работе [1], где приводятся примеры синтеза антенн и квазиоптических устройств на основе двумерных электромагнитных кристаллов, в том числе проектирование планарных линз и антенн на основе ленточных решеток [103].

Как развитие идеи фотонных и электромагнитных кристаллов можно рассматривать магнетонные кристаллы. Свойства этих структур в существенной степени определяются необычными свойствами распространяющихся в них магнитостатических волн [104]. Магнитостатические волны в тонких пленках были изучены достаточно давно [105]. Известно, что их свойства существенно отличаются от свойств электромагнитных волн. Они имеют длину волны, на много порядков меньшую длины волны в свободном пространстве или в «обычной» среде. Одно это открывает большие перспективы для миниатюризации различных радиоэлектронных устройств. Дополнительные возможности появляются при взаимодействии магнитостатических волн с периодическими структурами, которые по аналогии с электромагнитными волнами имеют полосы запираания и демонстрируют свойства магнетонных кристаллов [106,107]. При этом необходимо иметь в виду, что взаимодействие магнитостатических волн с периодическими структурами сильно отличается от случая электромагнитных волн. Поэтому важным этапом развития этого направления является исследование закономерностей физических явлений в магнетонных кристаллах, в том числе поиск оптимальной структуры элементарной частицы магнетонного кристалла, которая обеспечивает максимальную эффективность взаимодействия с магнитостатическими волнами.

Перечисленные выше физические эффекты и их применения показывают, что переход от искусственных сред с «простыми» частицами и малым периодом их размещения к метаматериалам и метакристаллам был не простым изменением количественных характеристик, а качественным скачком, который позволяет говорить о появлении нового научного направления. Его развитие требует создания новой совокупности представлений о физических явлениях в новом классе структур, новых способов их математического описания, новых технологий изготовления таких структур.

Литература

1. Банков, С.Е. Электромагнитные кристаллы [Текст] / С.Е. Банков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 352 с.
2. Гуляев, Ю.В. Отражение поверхностных магнитостатических волн от периодически неровного участка поверхности феррита [Текст] / Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, В.П. Плесский // Радиотехника и электроника. – 1981. – Т. 26, № 11. – С. 2282-2290.
3. Распространение упругих волн в фоновых кристаллах [Текст] / И.В. Лисенков [и др.] // РЭ. – 2007. – Т. 52, №9. – С. 1122-1134.
4. Фельд, Я.Н. Антенно-фидерные устройства [Текст] / Я.Н. Фельд, Л.С. Бененсон. – М.: Изд-во ВВИА, 1959. – Ч.2. – 551 с.
5. Зелкин, Е.Г. Линзовые антенны [Текст] / Е.Г. Зелкин, Р.А. Петрова. – М.: Сов. Радио, 1974. – 280 с.
6. Sihvola, A. Metamaterials in electromagnetics [Text] / A. Sihvola // Metamaterials. – 2007. – Vol. 1, № 1. – P. 2-11.
7. Силин, Р.А. Периодические волноводы [Текст] / Р.А. Силин. – М.: ФАЗИС, 2002. – 438 с.
8. Joannopoulos, J. D. Photonic Crystals: Modeling the Flow of Light [Text] / J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, J.N. Winn. – Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 2008. – 2nd ed. – 304 p.
9. Yablonovitch, E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics [Text] / E. Yablonovitch // Phys. Rev. Lett. – 1987. – Vol. 58, № 20. – P. 2059-2062.
10. Sakoda, K. Optical Properties of Photonic Crystals [Text] / K. Sakoda. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – 253 p.
11. Caloz, C. Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications [Text] / C. Caloz, T. Itoh. – NY.: J. Wiley and Sons, 2006. – 352 P.
12. Марков, Г.Т. Возбуждение электромагнитных волн [Текст] / Г.Т. Марков, А.Ф. Чаплин. – М.: Радио и связь, 1983. – 296 с.
13. Чаплин, А.Ф. Анализ и синтез антенных решеток [Текст] / А.Ф. Чаплин. – Львов: Выщ. шк., 1987. – 180 с.
14. Градштейн, И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений [Текст] / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 1100 с.
15. Прудников, А.П. Интегралы и ряды [Текст] / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев. – М.: Физматлит, 2002. – Т.1. – 688 с.
16. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients [Text] / D.R. Smith [et al.] // Phys. – Rev. B. – 2002. – Vol. 65, №. 19. – P. 195104-1-195104-5.
17. Simovsky, C.R. Bloch material parameters of magneto-dielectric metamaterials and the concept of Bloch lattices [Text] / C.R. Simovsky // Metamaterials. – 2007. – Vol. 1, № 2. – P. 62-80.
18. Нобл, Б. Метод Винера–Хопфа [Текст] / Б. Нобл. – М.: Иностран. лит., 1962. – 280 с.
19. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Т.4: Оптика [Текст] / Д.В. Сивухин. – М.: Физматлит, 2002. – 792 с.
20. Вайнштейн, Л.А. Электромагнитные волны [Текст] / Л.А. Вайнштейн. – М.: Радио и связь, 1988. – 442 с.
21. Сазонов, Д.М. Антенны и устройства СВЧ [Текст] / Д.М. Сазонов. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.
22. Simovski, C.R. Approaches to the homogenization of periodical metamaterials [Text] / C.R. Simovski, I. Kolmakov, S.A. Tretyakov // Proc. of the 11th Intern. Conf. Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. – Kharkiv, Ukraine, 2006. – P.41-44.
23. Belov, P.A. Dispersion and Reflection Properties of Artificial Media Formed By Regular Lattices of Ideally Conducting Wires [Text] / P.A. Belov, S.A. Tretyakov, A.J. Viitanen // J. of Electromagnetic Waves and Applications. – 2002. – Vol. 16, № 8. – P. 1153-1170.
24. Миллер, М.А. Использование понятия поверхностного импеданса в теории поверхностных электромагнитных волн [Текст] / М.А. Миллер, В.И. Таланов // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. – 1961. – Т.4, №5. – С. 795-830.
25. Банков, С. Е. Волноводы с нелокальными границами / С.Е. Банков // Журнал радиоэлектроники [Электронный ресурс], 2008. – № 6. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/iso/jun08/5/contents.html>.
26. Сазонов, В.П. Замедляющие системы [Текст] / В.П. Сазонов, Р.А. Силин. – М.: Сов. радио, 1966. – 316 с.
27. Банков, С. Е. Повороты волноводов на разреженных двумерных PBG кристаллах [Текст] / С.Е. Банков // РЭ. – 2005. – Т.50, № 1. – С. 23-30.
28. Банков, С. Е. Математическое моделирование PBG фотонных кристаллов с дефектами методом компенсирующих источников [Текст] / С.Е. Банков // РЭ. – 2005. – Т. 50, № 9. – С. 1048-1060.
29. Банков, С. Е. Сверхвысокочастотные волноводы в EBG структурах на основе коаксиальных цилиндров [Текст] / С.Е. Банков // РЭ. – 2009. – Т. 54, № 6. – С. 671-680.
30. Туров, Е. А. Материальные уравнения электродинамики [Текст] / Е.А. Туров. – М.: Наука, 1983. – 158 с.
31. Belov, P. Boundary conditions for interfaces of electromagnetic crystals and the generalized Ewald–

Oseen extinction principle [Text] / P. Belov, C. Simovski // Phys. Rev. B. – 2006. – Vol. 73, № 4. – P. 045102-(1-14).

32. Strong spatial dispersion in wire media in the very large wavelength limit [Text] / P. Belov [et al.] // Phys. Rev. B. – 2003. – Vol. 67, № 11. – P. 113103.

33. Шевченко, В.В. Киральные электромагнитные объекты и среды [Текст] / В.В. Шевченко // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – №2. – С. 109-114.

34. Киральные электродинамические объекты [Текст] / Б.З. Каценеленбаум [и др.] // УФН. – 1997. – Т. 167, № 11. – С. 1201-1212.

35. Костин, М.В. К теории киральной среды на основе сферических кирально проводящих частиц [Текст] / М.В. Костин, В.В. Шевченко // РЭ. – 1998. – Т. 43, № 8. – С. 921-926.

36. Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media [Text] / I.V. Lindell [et al.] // Norwood. MA: Artech House, 1994. – 332 p.

37. Microwave Transmission Through a Two-Dimensional, Isotropic, Left-Handed Metamaterial [Text] / Shelby R. A. [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2001. – Vol. 78, № 4. – P. 489-491.

38. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity [Text] / D.R. Smith [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 84, № 18. – P. 4184-4187.

39. Eleftheriades, G.V. Negative-Refractive Metamaterials: Fundamental Principles and Applications [Text] / G.V. Eleftheriades, K. Balmain // Wiley-IEEE Press, 2005. – 440 p.

40. Strong spatial dispersion in wire media in the very large wavelength limit [Text] / P.A. Belov [et al.] // Phys. Rev. B. – 2003. – Vol. 67, № 11. – P. 113103.

41. Гинзбург, В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме [Текст] / В.Л. Гинзбург. – М.: Наука, 1967. – 685 с.

42. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [Text] / J. Pendry [et al.] // IEEE Trans. MTT. – 1999. – Vol. 47, № 11. – P. 2075-2084

43. Шевченко, В.В. Об обратных плоских волнах в однородных изотропных средах [Текст] / В.В. Шевченко // РЭ. – 2003. – Т. 48, № 10. – С. 1202.

44. Shelby, R.A. Experimental verification of a negative index of refraction [Text] / R.A. Shelby, D.R. Smith, S. Schultz // Science. – 2001. – Vol. 292, № 6. – P. 77-79.

45. Kostin, M.V. A novel model of an artificial chiral electromagnetic medium [Text] / M.V. Kostin, V.V. Shevchenko // Proc. of Intern. Conf. «Chiral'95». – Penn. State Univ., USA, 1995. – P.64.

46. Веселаго, В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными ϵ и μ [Текст] / В.Г. Веселаго // УФН. – 1967. – Т. 92, № 3. – С. 517-526.

47. Lagarkov, A.N. Near-Perfect Imaging in a Focusing System Based on a Left-Handed-Material Plate [Text] / A.N. Lagarkov, V.N. Kissel // Phys. Rev. Lett. – 2004. – Vol. 92, № 7. – P. 774011-774014.

48. Pendry, I.B. Negative refraction makes a perfect lens [Text] / I.B. Pendry // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 85, № 18. – P. 3966-3969.

49. Борн, М. Основы оптики [Текст] / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 721 с.

50. Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах [Текст] / Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 343 с.

51. Фелсен, Л. Излучение и рассеяние волн [Текст] / Л. Фелсен, Н. Маркувиц. – М.: Мир, 1978. – Т.1. – 555 с.

52. Шатров, А. Д. О разрешимости задач возбуждения плоскостойких сред из метаматериалов [Текст] / А.Д. Шатров // РЭ. – 2007. – Т. 52, № 8. – С.909-916.

53. Банков, С. Е. Аналитическое исследование фокусировки электромагнитного поля линзой Веселаго [Текст] / С.Е. Банков // РЭ. – 2009. – Т. 54, № 2. – С. 133-143.

54. Шевченко, В.В. О сверхфокусировке плоской линзы из отрицательного материала / В.В. Шевченко // Журнал радиоэлектроники [Электронный ресурс]. – 2007. – №6. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/mac/jun07/5/text.html>.

55. Шатров, А.Д. Разложение поля в открытом слоистом волноводе в случае вырождения направляемых волн [Текст] / А.Д. Шатров, В.В. Шевченко // Изв. вузов. Радиофизика. – 1974. – Т. 17, № 11. – С. 1692-1702.

56. Vinogradov, A.P. Destruction of the image of the Pendry lens during detection [Text] / A.P. Vinogradov, A.V. Dorofeenko // Optics Communications. – 2005. – Vol. 256, № 6. – P. 333-336.

57. Belov, P.A. Canalization of subwavelength images by electromagnetic crystals [Text] / P.A. Belov, C.R. Simovski, P. Ikonen // Phys. Rev. B. – 2005. – Vol. 71, № 19. – P. 193105-1-193105-4.

58. Alu, A. Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings [Text] / A. Alu, N. Engheta // Phys. Rev. E. – 2005. – Vol. 72, № 1. – P. 016623-1-016623-9.

59. Ziolkowsky, R.W. Wave propagation in media having negative permittivity and permeability [Text] / R.W. Ziolkowsky, E. Heyman // Phys. Rev. E. – 2001. – Vol. 64, № 5. – P. 056625-1-056625-15.

60. Mosallaei, H. Periodic bandgap and effective dielectric materials in electromagnetics: characterization and applications in nanocavities and waveguides [Text] / H. Mosallaei, Y. Rahmat-Samii // IEEE Trans. – 2003. – Vol. AP-51, № 3. – P. 549.

61. Two-Dimensional Photonic Band-Gap Defect Mode Laser [Text] / O. Painter [et al.] // Science. – 1999. – Vol. 284, № 6. – P. 1819-1821.

62. High Transmission through Sharp Bends in Photonic Crystal Waveguides [Text] / A. Mekis [et al.] // Phys. Rev. Lett. – Vol. 77, № 18. – P. 3787-3790.

63. Rahmat-Samii, Y. Electromagnetic bandgap structures: Classification, characterization and applications [Text] / Y. Rahmat-Samii, H. Mosallaei // Proc. of the 11th Intern. Conf. «Antennas and Propagation». – Manchester, UK, 2001. – P. 560-564.

64. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств [Текст] / под ред. В.И. Вольмана – М.: Радио и связь, 1982. – 326 с.

65. Computational and experimental study of a microwave electromagnetic bandgap structure with waveguide defect for potential use as a bandpass wireless interconnect [Text] / J.J. Simpson [et al.] // IEEE Microwave and Wireless components letters. – 2004. – Vol. 14, № 7. – P. 343-345.
66. Гупта, К. Машинное проектирование СВЧ устройств [Текст] / К. Гупта, Р. Гардж, Р. Чадха. – М.: Радио и связь, 1987. – 435 с.
67. Bankov, S.E. Waveguide power divider [Text] / S.E. Bankov // J. of Radioelectronics [Электронный ресурс]. – 1999. – № 11. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/koi/nov99/3/text.html>.
68. Банков, С.Е. Проектирование и экспериментальное исследование решеток щелевых излучателей [Текст] / С.Е. Банков // РЭ. – 2004. – Т. 49, № 6. – С. 701-706.
69. Гвоздев, В.И. Объемные интегральные схемы СВЧ [Текст] / В.И. Гвоздев, Е.И. Нефёдов. – М.: Наука, 1985. – 256 с.
70. Kelly, J.R. Modelling and Design of Sub-wavelength Metamaterial Resonant Cavity Antennas [Text] / J.R. Kelly, T. Kokkinos, A.P. Feresidis // Proc. on the First Intern. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. – Rome, 2007. – P. 231.
71. Проектирование фазированных антенных решеток [Текст] / под ред. Д.И. Воскресенского – М.: Радиотехника, 2003. – 744 с.
72. Шевченко, В.В. Плавные переходы в открытых волноводах [Текст] / В.В. Шевченко. – М.: Наука, 1969. – 192 с.
73. Банков, С.Е. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ структур с помощью HFSS [Текст] / С.Е. Банков, А.А. Курушин, В.Д. Разевиг. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 216 с.
74. Адамс, М. Введение в теорию оптических волноводов [Текст] / М. Адамс. – М.: Мир, 1984. – 512 с.
75. Корн, Г. Справочник по математике [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 823 с.
76. Bankov, S.E. Analysis of a Millimeter Wave Integrated Beamforming Network for Quasioptical Multibeam Antennas [Text] / S.E. Bankov, T.I. Bugrova // Microwave and Optical Technology Letters. – 1993. – Vol. 6. – P. 782.
77. Фрадин, А.З. Антенны сверхвысоких частот [Текст] / А.З. Фрадин. – М.: Сов. радио, 1957. – 648 с.
78. Миттра, Р. Аналитические методы теории волноводов [Текст] / Р. Миттра, С. Ли. – М.: Мир, 1974. – 327 с.
79. Filtering properties of periodic and fractal 1-D EBG multilayers [Text] / F. Chiadini [et al.] // Proc. on the First Intern. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. – Rome, 2007. – P.677.
80. Nemec, H. Thermally tunable filter for terahertz range based on a one-dimensional photonic crystal with a defect [Text] / H. Nemec, L. Duvillaret, F. Garet // J. Appl. Phys. – 2004. – Vol. 96, № 8. – P. 4065-4072.
81. Альтман, Дж. Устройства СВЧ [Текст] / Дж. Альтман – М.: Мир, 1968. – 487 с.
82. Савельев, И.В. Курс общей физики [Текст] / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1979. – Т. 3. – 432 с.
83. Капилевич, Б.Ю. Волноводные диэлектрические фильтры [Текст] / Б.Ю. Капилевич. – М.: Связь, 1980. – 136 с.
84. Шестопапов, В.П. Резонансное рассеяние волн. Т.1: Дифракционные решетки [Текст] / В.П. Шестопапов, А.А. Кириленко, Ю.К. Сиренко. – Киев: Наук. думка, 1986. – 232 с.
85. Ватсон, Г. Н. Теория бесселевых функций [Текст] / Г.Н. Ватсон. – Иностран. лит., 1949. – Т. 1. – 798 с.
86. Гуревич, А. Г. Ферриты на СВЧ [Текст] / А.Г. Гуревич. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1960. – 408 с.
87. Левин, Л. Теория волноводов [Текст] / Л. Левин. – М.: Радио и связь, 1981. – 311 с.
88. Федоров, Н.Н. Основы электродинамики [Текст] / Н.Н. Федоров. – М.: Высшая школа, 1965. – 399 с.
89. Никольский, В.В. Электродинамика и распространение радиоволн [Текст] / В.В. Никольский. – М.: Наука, 1973. – 607 с.
90. Банков, С.Е. Двумерно-периодическая решетка щелевых излучателей [Текст] / С.Е. Банков // РЭ. – 2000. – Т. 46, № 4. – С. 441-447.
91. Банков, С.Е. Численное исследование двумерно-периодической решетки щелевых излучателей [Текст] / С.Е. Банков, М.Д. Дупленкова // РЭ. – 2003. – Т. 48, № 3. – С. 268-275.
92. Никольский, В.В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики [Текст] / В.В. Никольский. – М.: Наука, 1967. – 460 с.
93. Wu, T.K. Frequency Selective Surface and Grid Array [Text] / T.K. Wu. – New York: Wiley, 1995. – 475 p.
94. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band [Text] / D. Sievenpiper [et al.] // IEEE Trans. MTT. – 1999. – Vol. 47, № 11. – P. 2059-2047.
95. Artificial Magnetic Conductor Surfaces and Their Application to Low-Profile High-Gain Planar Antennas [Text] / A.P. Feresidis [et al.] // IEEE Trans. AP. – 2005. – Vol. 53, № 1. – P. 209-215.
96. Нефедов, Е.И. Электродинамика периодических структур [Текст] / Е.И. Нефедов, А.Н. Сивов. – М.: Наука. 1977. – 105 с.
97. Банков, С.Е. Плоские диэлектрические волноводы с нагруженными границами [Текст] / С.Е. Банков, С.А. Жаров // Пути повышения технологичности: межвуз. сб. тр. – М.: МЭИ, 1984. – № 48. – С.91.
98. Bankov, S.E. Planar Lens for Millimeter Wave Integrated Antennas [Text] / S.E. Bankov, T.I. Bugrova, I.V. Levchenko // 24-th European Microwave Conf. Proc. – Nice, France, 1994. – P. 76-80.
99. Корнблит, С. СВЧ-оптика. Оптические принципы в приложении к конструированию СВЧ-антенн [Текст] / С. Корнблит. – М.: Связь, 1980. – 360 с.

100. Унгер, Г.Г. Оптическая связь [Текст] / Г.Г. Унгер. – М.: Связь, 1979. – 264 с.
101. Уолтер, К. Антенны бегущей волны [Текст] / К. Уолтер. – М.: Энергия, 1970. – 448 с.
102. Нефедов, Е.И. Полосковые линии передачи [Текст] / Е.И. Нефедов, А.Т. Фиалковский. – М.: Наука, 1980. – 312 с.
103. Банков, С.Е. Щелевые интегральные схемы миллиметрового диапазона [Текст] / С.Е. Банков // РЭ. – 2007. – Т. 51, № 9. – С. 1066-1086.
104. Вашковский, А.В. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот [Текст] / А.В. Вашковский, В.С. Стальмахов, Ю.П. Шараевский. – Саратов.: Изд-во Саратовск. ун-та, 1993. – 311 с.
105. Гуляев, Ю.В. Спинволновая электроника [Текст] / Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман. – М.: Знание, 1988. – 63 с.
106. Банков, С.Е. Рассеяние объемных магнитостатических волн на щелевых периодических решетках [Текст] / С.Е. Банков, С.А. Никитов // РЭ. – 2007. – Т. 52, № 11. – С. 1301-1311.
107. Nikitov, S.A. Magnetostatic bandgap structures based on periodic arrays of slots and strips [Text] / S.A. Nikitov, S.E. Bankov // First Intern. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. – Rome, 2007. – P.685.

ЗАО «ИРКОС», г. Воронеж
Воронежский государственный технический университет

ELECTROMAGNETIC CRYSTALS, CHARACTERISTICS AND APPLICATIONS

A.S. Avdyushin, M.Yu. Vlasov, Yu.G. Pasternak, A.P. Yarygin

The article provides an overview of information and scientific papers on electromagnetic crystals. A brief description of electromagnetic waves in them is given

Key words: electromagnetic crystals, metamaterials, negative materials, chiral materials

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ВЫСОТЫ И ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ СЛУЧАЙНЫХ АНТЕНН В ШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ

С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет

Приводятся расчетные и экспериментальные методы определения основных характеристик пространственно-распределенных случайных антенн в широкой полосе частот. Анализируется специфика случайных антенн, влияющая на их параметры в режимах приема и излучения электромагнитных волн

Ключевые слова: полоса частот, действующая высота антенны, ПРСА, оптимизационная задача

1. Введение

В настоящее время в связи с усложнением проблемы обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств (ЭМС РЭС) большой научный и практический интерес представляет изучение свойств пространственно-распределенных случайных антенн (ПРСА). В отличие от специально разработанных и сконструированных штатных антенн РЭС такие случайные антенны представляют собой проводники и элементы с зачастую априорно неизвестной сложной конфигурацией. Классификация и свойства ПРСА исследованы в работах [1,2]. Вследствие комбинированной в общем случае гальванической, емкостной и индуктивной связи элементы СА формируют или принимают электромагнитные излучения, влияющие на качество работы РЭС и технических средств.

Неопределенность геометрических и физических параметров (размеры, физические свойства, взаимное пространственное положение элементов, поляризация) приводит к сложности в определении электрических характеристик таких антенн. Характерными отличиями случайных антенн от регулярных, влияющими на их электрические характеристики, являются:

- случайный характер размещения и возбуждения линейно протяженных, пространственно-распределенных или плоскостных токопроводящих элементов (цепи сигнализации, управления, заземления, электропитания, водопроводные и отопительные коммуникации, проводники, платы, панели и др.);
- трудности моделирования ПРСА, которые препятствуют достоверному расчету характеристик таких антенн, например, действующей длины или эффективной площади;
- наличие многочисленных паразитных связей между элементами случайной антенны гальванического, индуктивного и (или) емкостного характера;
- неявно выраженная либо отсутствующая у ПРСА полезная или паразитная радиотехническая несогласованная нагрузка;
- наличие в составе ПРСА элементов с нелинейными электрическими свойствами (окисные контакты, радиодетали с нелинейной вольт-амперной

характеристикой, индуктивности, параметрические контуры и др.).

Задача определения основных антенных характеристик резонансных и апертурных ПРСА, таких как действующая высота, эффективная площадь имеет значение для решения прикладных задач, связанных с обеспечением ЭМС РЭС и защиты информации. Проблемы с выявлением нагрузки у ПРСА могут быть частично компенсированы определением наряду с антенными электрическими характеристиками и эффективной поверхности рассеяния (ЭПР). Знание соотношения между ЭПР и эффективной площадью такой антенны позволяет судить о свойствах ПРСА: является ли она паразитной антенной или пассивным ретранслятором электромагнитных волн.

Целью данной статьи является обоснование предложений по расчетным и экспериментальным методам определения основных электрических характеристик ПРСА.

2. Обоснование основных характеристик ПРСА

Определение 1. Действующей высотой передающей ПРСА является действующая высота такой эквивалентной ей по свойствам неслучайной резонансной антенны простой геометрической формы, которая определяется как коэффициент пропорциональности между напряженностью поля, создаваемой эквивалентной антенной, и напряжением, поданным на ее вход:

$$h_e = \frac{U_{in}}{E}. \quad (1)$$

Определение 2. Эффективной площадью передающей ПРСА является эффективная площадь такой эквивалентной ей по свойствам неслучайной апертурной антенны простой геометрической конструкции, которая определяется как коэффициент пропорциональности между мощностью сигнала, поданной на вход эквивалентной антенны и плотностью потока мощности создаваемого ей излучения в осевом направлении:

$$S_{ef} = \frac{P_{in}}{\Pi}. \quad (2)$$

Определения 1 и 2 позволяют оценивать действующую высоту и эффективную площадь передающих случайных антенн в общепринятой терминологии, причем как для ПРСА с выраженной, так и для ПРСА с явно не выраженной радиотехнической нагрузкой.

Определение 3. Показатель вида

$$A = S_{ef} / \sigma. \quad (3)$$

σ - ЭПР случайной антенны, характеризует свойства ПРСА: чем больше эффективная площадь, тем более явно выражены антенные свойства ПРСА и эта случайная антенна имеет поглощающую радиотехническую нагрузку и, наоборот, чем больше ЭПР случайной антенны, тем более явно выражены рассеивающие свойства ПРСА (в пределе антенна не имеет нагрузки, даже рассогласованной).

3. Принцип невязимности коэффициентов усиления случайных антенн на передачу и прием

Для регулярных антенн справедлив принцип взаимности (обратимости): коэффициент усиления (КУ) приемной антенны соответствует КУ этой же антенны при работе ее на передачу. Однако для ПРСА этот принцип не выполняется. Расхождение КУ случайных антенн на прием и на передачу объясняется следующим.

Рассмотрим ситуацию работы ПРСА на прием. При облучении случайной антенны внешним электромагнитным полем значительная часть падающей на нее электромагнитной энергии излучения отражается в обратном направлении и рассеивается в пространстве в других направлениях рассеивающими элементами ПРСА. Это явление обусловлено тем обстоятельством, что в общем случае элементы ПРСА распределены в пространстве, она не имеет явно выраженной радиотехнической нагрузки для поглощения падающей на нее энергии либо рассогласована с имеющейся нагрузкой. ПРСА не имеет важнейшего свойства регулярной антенны: поглощения большей части электромагнитной энергии, падающей на нее, в согласованной нагрузке. КПД таких антенн в большинстве случаев чрезвычайно низок, поэтому коэффициент усиления также невысок.

В случае работы ПРСА на передачу условия передачи энергии от эквивалента радиотехнической нагрузки или источника первичного излучения в сторону излучения электромагнитной волны в общем случае отличаются от условий, характерных для приема радиоволн случайной антенной, поэтому коэффициенты усиления ПРСА на передачу и прием закономерно отличаются.

Следует отметить, что в отличие от принятого в антенной технике подхода (КПД определяется омическими потерями на сопротивлении излучения) КПД случайной антенны учитывает потери на рассеяние радиоволн, а также потери, обусловленные рассогласованием нагрузки с антенной. Как известно [3 - 15], эффективная поверхность рассеяния антенн имеет две составляющие: антенную и структурную. В случайных антеннах более явно выражена структурная составляющая. Структурная составляющая ЭПР ПРСА обусловлена рассеянием электромагнитных волн на отражающих элементах конструкции антенны. Антенная составляющая ЭПР зависит от условий согласования антенны с нагрузкой и закономерно проявляется в случайных антеннах, поскольку часть электромагнитной энергии, падающей на антенну, возвращается в

обратном направлении из-за отражения от несогласованной по волновому сопротивлению нагрузки. При работе на передачу случайная антенна имеет другие условия для формирования электромагнитного поля в пространстве, а именно:

- направление передачи электромагнитной энергии в случайной антенне меняется на противоположное, при этом передаточная характеристика тракта прохождения энергии изменяется;

- антенная и структурные составляющие рассеяния при излучении отсутствуют;

- при одинаковых значениях мощности на входе антенны при работе на передачу и мощности на выходе антенны при работе ее на прием плотность потока мощности в зоне ее излучения (приема) отличается при $P_{in} = P_{tr} \dots P_{in} \geq P_{tr}$.

Таким образом, в случайных приемных антеннах в отличие от регулярных антенн значительная часть падающей электромагнитной энергии рассеивается в пространстве за счет наличия структурной и антенной составляющих ЭПР. В большинстве случаев ПРСА работает как некачественная антенна и одновременно как рассеиватель (отражатель) радиоволн. Количественно степень отличия ПРСА от регулярной антенны может быть оценено на основании показателя (3). Чем больше значение этого показателя, тем более ПРСА обладает свойствами реальной антенны.

4. Связь между действующей высотой и коэффициентом усиления ПРСА

Для нахождения аналитической взаимосвязи между действующей длиной и коэффициентом усиления ПРСА используем соотношения (1) и (2). Для этого воспользуемся также известным соотношением

$$S_{ef} = \frac{G\lambda^2}{4\pi}, \quad (4)$$

где λ - длина волны излучения;

G - коэффициент направленного действия антенны (КНД), который связан с коэффициентом усиления (КУ) через коэффициент полезного действия (КПД):

$$g = \eta G. \quad (5)$$

Создаваемая случайной антенной плотность потока мощности (ППМ) определяется по формуле

$$P = \frac{E^2}{120\pi}, \quad (6)$$

где $120\pi = 377$ Ом - сопротивление излучения свободного пространства.

Мощность на входе ПРСА можно рассчитать на основании формулы

$$P = \frac{U^2}{R_{in}}, \quad (7)$$

где R_{in} - входное сопротивление ПРСА.

Подставляя (5) и (6) в (2), имеем

$$S_{ef} = \frac{120\pi U_{in}^2}{E^2 R_{in}} \quad (8)$$

Выразим входное напряжение:

$$U_{in} = E \sqrt{\frac{S_{ef} R_{in}}{120\pi}}. \quad (9)$$

После подстановки (8) в (1) получим функциональную связь между действующей высотой и эффективной площадью случайной антенны:

$$h_e = \sqrt{\frac{S_{ef} R_{in}}{120\pi}}. \quad (10)$$

Используя (3) и (4), несложно получить искомую связь между действующей высотой и коэффициентом усиления случайной антенны:

$$h_e = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{\eta g R_{in}}{480}}. \quad (10)$$

Полученные формульные зависимости позволяют определять основные электрические характеристики ПРСА при ограниченных исходных данных о случайных антеннах. Часть этих характеристик может определяться экспериментально.

5. Нелинейные эффекты в ПРСА и их влияние на антенные характеристики

Рассмотренные параметры случайных антенн, а именно действующая высота и эффективная площадь являются частотно-зависимыми. На практике в ПРСА возникает большое количество нелинейных эффектов, особенно при облучении их сигналами большой мощности. Указанные эффекты проявляются в широкой полосе частот, особенно при облучении случайных антенн многочастотными сигналами. Объясняется это тем, что в составе ПРСА могут присутствовать элементы с нелинейными электрическими свойствами, например окисные биметаллические контакты, транзисторы, диоды, микросхемы, дроссели с ферритовыми сердечниками, платы с набором элементов и проч. При их облучении одночастотным сигналом возникают нелинейные отклики на частотах гармоник сигнала (если ПРСА имеет параметрические свойства, то возникают излучения на субгармониках). При облучении случайных антенн двухчастотным сигналом нелинейные отклики образуются на комбинационных частотах

$$f_k = m f_1 \pm n f_2, \quad (11)$$

где m, n – целые числа.

В таких случаях возникает необходимость определения характеристик антенн в широкой полосе частот на комбинационных частотах, что представляет собой значительно более сложную техническую задачу. Однако в ряде практических важных случаев, например, если случайная антенна представляет собой регулярную антенну, работающую за пределами своего частотного диапазона, для определения характеристик ПРСА можно использовать известное соотношение между

ЭПР и КУ рассогласованной с нагрузкой антенны [8, 11]:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_S + \sigma_a = \nu G S_g + \frac{g \lambda^2}{4\pi} \left| \frac{K_U - 1}{K_U + 1} \right|^2. \quad (12)$$

где σ_S , σ_a – соответственно, структурная и антенная составляющие ЭПР антенны;

ν – коэффициент использования поверхности антенны (КИП);

S_g – геометрическая площадь поверхности антенны;

K_U – коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) в антенном тракте.

6. Экспериментальные методы определения характеристик ПРСА

Как следует из анализа приведенных выше формул, для определения важнейших характеристик случайных антенн требуется целый ряд исходных данных, при этом только часть из них могут быть определены расчетным путем, а остальные требуют экспериментального измерения. Наиболее просто измеряются такие характеристики, как КСВН, геометрическая площадь, входное сопротивление антенн, а также интенсивность создаваемого ими электромагнитного поля. Измерения ЭПР антенн в широкой полосе частот сопряжены с необходимостью применения дорогостоящего измерительного оборудования и специальных методик измерения.

В качестве примера определения характеристик случайной антенны приведем методику экспериментально-расчетной оценки эффективной площади ПРСА, которая образуется в измерительной установке для анализа высокоинтенсивных СВЧ-излучений (например, РЛС). Из-за недостаточного качественного экранирования измерительного приемника на выход последнего полезный сигнал принимаемого и измеряемого сигнала излучения поступает не только через калиброванный измерительный тракт (от измерительной антенны до выхода приемника), но и через случайную антенну (по цепям питания, заземления, коммутации, управления, путем просачивания через экран и т.д.). Требуется оценить эффективную площадь такой ПРСА. Поставленная задача может быть решена следующим образом.

От входа измерительного приемника отключают измерительную антенну. Коаксиальный вход измерительного приемника нагружают на согласованное экранированное сопротивление.

В месте размещения измерительного приемника создают калиброванное электромагнитное поле с известной плотностью потока мощности P .

В соответствии с техническим описанием на измерительном приемнике измеряют уровень мощности паразитной наводки, приведенный ко входу приемника P_p .

Рассчитывают эквивалентную эффективную площадь исследуемой ПРСА по формуле

$$S_{eq} = P_p / P. \quad (13)$$

При необходимости корректируют реальную эффективную площадь измерительной антенны путем вычитания из паспортного значения штатной измерительной антенны эквивалентной эффективной площади ПРСА.

7. Заключение

Отсутствие явно выраженной радиотехнической нагрузки, отличие условий генерации и приема электромагнитных сигналов и помех в ПРСА и другие специфические особенности случайных антенн диктуют необходимость поиска достоверных методов оценки их параметров и характеристик в широкой полосе частот. В статье в постановочном плане определены некоторые возможные методические подходы к определению важнейших характеристик ПРСА расчетными и экспериментальными методами. Наиболее важными, на наш взгляд, являющиеся следующие результаты: введен новый классификационный показатель для оценки преобладающих свойств случайной антенны (3), получены соотношения между действующей высотой и коэффициентом усиления ПРСА, предложена простая экспериментальная методика определения эффективной площади случайной антенны.

Таким образом, предложенная процедура решения задачи оптимизации (2),(3) основана на комбинированном использовании методов теории многоуровневых иерархических систем (декомпозиции задачи большой размерности на подзадачи меньшей размерности и координации решений подзадач) и количественных методов оптимизации.

Литература

1. Формализованный подход к генерации рациональных вариантов развития системы испытаний техники радиоэлектронной борьбы [Текст] / С.Н. Паньчев, Д.М. Бывших, С.В. Суровцев, Н.А. Самоцвет // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10, № 3-1. - С. 71-75.
2. Волков, А. В. Синтез схемы дальномера-пеленгатора на основе процедур пересечения и объединения с обработкой сигнала во временной области [Текст] / А.В. Волков, В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, № 4. - С. 12-14.
3. Оптимальный прием и обработка радиосигналов в нелинейном канале ВЧ-облучения для дистанционного снятия акустической информации [Текст] / В.Б. Авдеев, С.Н. Паньчев, Н.Г. Денисенко, Н.А. Самоцвет, М.С. Сковпин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10, № 5. - С. 94-98.
4. Расчетно-инструментальный метод анализа прохождения случайного процесса через нелинейную цепь [Текст] / С.Н. Паньчев, М.Ф. Пашук, В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет, А.Е. Ломовских // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10, № 5. - С. 109-113.
5. Экспериментально-расчетный метод определения двухсигнальной избирательности цифровых радиоприемных устройств [Текст] / В.М. Питолин, С.Н. Паньчев, Н.А. Самоцвет, С.А. Акулинин // Вестник

Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, №. 6-3. - С. 45-48.

6. Самоцвет, Н.А. Анализ методов формирования сигналов и помех с заданными законами распределения параметров [Текст] / В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет, А.В. Волков // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, №. 5-1. - С. 34-36.

7. Паньчев, С.Н. Алгоритм формирования имитационных помех с заданными спектральными и информационными свойствами [Текст] / С.Н. Паньчев, С.В. Суровцев, С.В. Канавин // Радиолокация, навигация, связь (RLNC- 2013): труды XIX Междунар. науч.-техн. конф. - Воронеж, 2013. - Т. 3. - С. 2012-2017.

8. Суровцев, С.В. Когнитивный алгоритм корреляционно-фильтровой обработки сложных сигналов на фоне гауссовых шумов [Текст] / С.Н. Паньчев, С.В. Суровцев, Н.А. Самоцвет / Радиолокация, навигация, связь (RLNC- 2014): труды XX Междунар. науч.-техн. конф. - Воронеж, 2014. - Т. 4. - С. 2000-2008.

9. Маслов, О.Н. Случайные антенны [Текст] / О.Н. Маслов // Электросвязь. - 2006. - № 7. - С.12-15.

10. Маслов, О.Н. Многоканальные случайные антенны [Текст] / О.Н. Маслов, М.А. Соломатин, А.Б. Орлов // Инфокоммуникационные технологии. - 2007. - Т.5, № 4. - С.47-52.

11. Бененсон, Л.Д. Рассеяние электромагнитных волн антеннами [Текст] / Л.Д. Бененсон, Я.Н. Фельд // Радиотехника и электроника. - 1988. - Т. XXXIII, № 2. - С. 225 – 245.

12. Воскресенский, Д.И. Эффективная поверхность рассеяния остроуправленных антенн и антенных решеток [Текст] / Д.И. Воскресенский, Л.И. Пономарев, А.В. Шаталов // Вопросы снижения эффективной поверхности рассеяния; под ред. П.Я. Уфимцева. - М.: ИРЭ РАН, 1989. - С. 117 – 125.

13. Паньчев С.Н. Влияние характеристик рассеяния антенн на точность измерения параметров излучающих систем в ближней зоне [Текст] / С.Н. Паньчев, Э.А. Соломин // Измерительная техника. - 1995. - № 5. - С. 56 – 58.

14. Гладышев, А.К. Влияние характеристик рассеяния антенны на показатели качества функционирования РЭС [Текст] / А.К. Гладышев, Е.Ф. Иванкин, С.Н. Паньчев // Измерительная техника. - 1995. - № 2. - С. 48 – 50.

15. Паньчев, С.Н. Характеристики рассеяния антенн и фазированных антенных решеток [Текст] / С.Н. Паньчев, В.Б. Еремин // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. - 1997. - № 8. - С. 61 – 70.

16. Паньчев, С.Н. Оценка влияния характеристик рассеяния антенны на энергетические параметры спутниковых систем связи [Текст] / С.Н. Паньчев // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. - 2001. - № 3 – 4, С. 74 – 79.

17. Паньчев, С.Н. Косвенный метод определения структурной составляющей рассеяния антенны. [Текст] / С.Н. Паньчев, Э.А. Соломин // Радиопромышленность: сб.тр., - 1993. - С. 60 – 62.

18. Паньчев, С.Н. Оценка влияния характеристик рассеяния измерительных антенн на точность измерения плотности потока энергии электромагнитного поля. [Текст] / С.Н. Паньчев, П.М. Мусабеков // Метрология. - 1998. - № 6. - С. 36 – 41.

19. Паньчев, С.Н. Методика расчета энергетических потерь в радиоприемных устройствах обусловленных рассеянием радиоволн на антеннах СВЧ [Текст] / С.Н. Паньчев // Антенны. - 2001. - Вып. 5 (51). - С. 68 – 70.

20. Гладышев, А.К. Оценка возможности применения измерительных антенн в качестве рабочих мер ЭПР [Текст] / А.К. Гладышев, Е.Ф. Иванкин, С.Н. Панычев // Измерительная техника. - 1993. - № 2. - С. 57 – 59.

21. Ибрагимов, Н.Г. Методика и результаты эксперимента по исследованию характеристик отражения рупорной антенны в широком диапазоне частот [Текст] /

Н.Г. Ибрагимов, С.Н. Панычев, В.А. Савинов // Антенные измерения. - Ереван. – 1990. - С. 191 – 192.

22. Кузнецов А.А. Характеристики рассеяния линейных вибраторных решеток Ван-Атта [Текст] / А.А. Кузнецов // Журнал радиоэлектроники. - 2014. - № 5. - С. 37 – 43.

Воронежский государственный технический университет

Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний России

METHOD OF THE CASUAL ANTENNAS OPERATING HEIGHT AND EFFECTIVE AREA DETERMINATION IN A WIDE STRIP OF FREQUENCIES

S.N. Panychev, N.A. Samotsvet

Calculation and experimental methods definitions of the main characteristics of the spatial distributed casual antennas in a wide strip of frequencies are given. The specifics of casual antennas influencing their parameters in the modes of reception and radiation of electromagnetic waves are analyzed

Key words: a strip of frequencies, the operating height of the antenna, PRSA, an optimizing task

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ С ИТЕРАЦИОННЫМ АЛГОРИТМОМ

Б.В. Матвеев, В.П. Дубыкин, Д.Ю. Крюков, Ю.С. Курьян, Е.М. Кирпичев

В представленной работе исследуются свойства разностно-дальномерной системы (РДС) произвольной конфигурации с итерационным алгоритмом по определению координат источников радиоизлучения (ИРИ) при круговом обзоре. С помощью математического моделирования проведен ряд исследований по определению «слепых зон» и секторов достоверного обнаружения. Сформулированы рекомендации по улучшению свойств РДС

Ключевые слова: разностно-дальномерная система, источник радиоизлучения, измерение координат, круговой обзор, зоны обнаружения

Введение

Среди различных способов определения координат источников радиоизлучения наиболее применяемым в последнее время является разностно-дальномерный метод. Разностно-дальномерная система представляет собой территориально распределенные приемные пункты (ПП), соединенные между собой линиями связи. Под ПП понимается радиоизмерительный приемник с ненаправленной антенной, на выходе которого выдается сигнал [1].

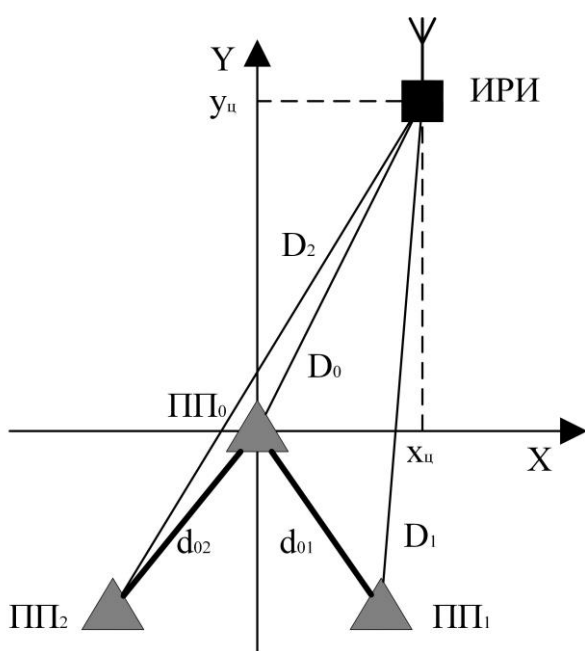


Рис. 1. Симметричная трехпозиционная РДС обнаружения координат ИРИ

Для определения плоскостных координат ИРИ требуются как минимум три ПП, которые могут быть расположены симметрично друг от друга (рис. 1) и с произвольной конфигурацией (рис. 2). Для того чтобы система нелинейных уравнений, связывающих координаты ИРИ, координаты приемных пунктов с разностями моментов прихода сигнала от ИРИ, не была переопределенной, один из ПП располагают на плоскости с координатами $x = 0, y = 0$.

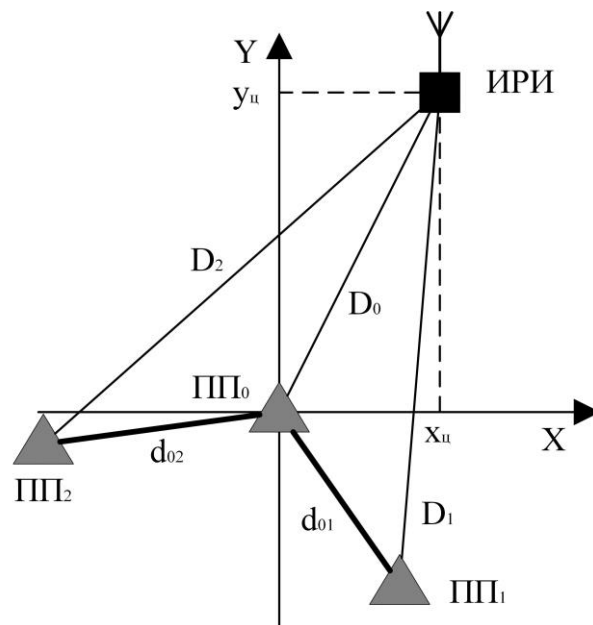


Рис. 2. Трехпозиционная РДС обнаружения координат ИРИ произвольной конфигурации

Исходной информацией для вычисления местоположения ИРИ являются координаты $ПП_i$ и разности дальностей $R_i = (D_i - D_0)$ на независимых базах d_{01} и d_{02} . Измерение разности дальностей эквивалентно измерению относительных временных сдвигов сигналов, прошедших разные пути распространения. Определение положения ИРИ в таких системах можно интерпретировать как вычисление координат точки пересечения гипербол (гиперболоидов), фокусы которых совпадают с положением ПП сигналов. В соответствии с этим выражение, связывающее коор-

Матвеев Борис Васильевич - ВГТУ, канд. техн. наук, профессор, тел. 8-960-138-4561

Дубыкин Владимир Прохорович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-951-547-86-34

Крюков Дмитрий Юрьевич - ВГТУ, студент, e-mail: KrukovDY@bk.ru

Курьян Юрий Сергеевич - ВГТУ, студент, e-mail: kuryanus@yandex.ru

Кирпичев Егор Максимович - ВГТУ, магистрант, тел. (473) 2437665

и далее из (7) определяем, что

$$\xi^{(p)} = W^{-1}(x^{(p)}) \cdot f(x^{(p)}), \quad (8)$$

где $W^{-1}(x^{(p)})$ - обратная матрица.

Новое приближение корня $x^{(p+1)}$ при очередной итерации получается, если (8) подставить в (3) и тогда

$$x^{(p+1)} = x^{(p)} - [f'(x^{(p)})]^{-1} f(x^{(p)}), \quad (9)$$

где $p = 0, 1, \dots k$.

Расчетная модель определения координат ИРИ

Формирование расчетной модели предусматривает использование алгоритма решения систем нелинейных уравнений (3) для определения РДС координат ИРИ.

Последовательность процедур алгоритма обеспечивается с учетом следующих особенностей и условий функционирования РДС:

1. При использовании трех ПП аналитические выражения для определения расстояний от приемных пунктов до источника радиоизлучения, исходя из геометрии (рис. 3), записываются в виде

$$\begin{cases} D_0 = \sqrt{(x_0 - x_u)^2 + (y_0 - y_u)^2} \\ D_1 = \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2} \\ D_2 = \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2} \end{cases}, \quad (10)$$

где x_u, y_u - координаты ИРИ, x_i, y_i - координаты ПП.

2. Переход от дальностей (7) к временным характеристикам РДС, т. е. к расчету взаимных задержек τ_{01}, τ_{02} сигналов по независимым базам в предположении отсутствия ошибок при измерениях задержек сигнала обеспечивается расчетными формулами

$$\begin{cases} \tau_{01} = \left(\frac{D_0}{c} - \frac{D_1}{c} \right) \\ \tau_{02} = \left(\frac{D_0}{c} - \frac{D_2}{c} \right) \end{cases}, \quad (11)$$

где c - скорость распространения радиоволны.

3. Выражение для вектор-функции, которое является основой для расчетной модели итерационной процедуры составляется с учетом (7) и (8) в виде

$$\begin{cases} H_0 - H_1 - c\tau_{01} \\ H_0 - H_2 - c\tau_{02} \end{cases} = f(x, y) = 0, \quad (12)$$

где

$$\begin{cases} H_0 = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} \\ H_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\ H_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \end{cases}. \quad (13)$$

4. В соответствии с расчетным соотношением (9) и выражением для вектор-функции (12) организуются вычисления приближений к корням вектор-функции (12) в соответствии с расчетным соотношением, например, в формате Mathcad

$$\text{iter}(x, y) := \begin{matrix} \left[\begin{matrix} x \\ y \end{matrix} \right] - \left[\begin{matrix} \frac{d}{dx}(f(x, y)_0) & \frac{d}{dy}(f(x, y)_0) \\ \frac{d}{dx}(f(x, y)_1) & \frac{d}{dy}(f(x, y)_1) \end{matrix} \right]^{-1} \cdot f(x, y) \\ x \end{matrix}$$

$$\text{norma}(x, y, x1, y1) := \begin{cases} a \leftarrow \sqrt{(x - x1)^2 + (y - y1)^2} \\ a \end{cases}$$

Моделирование РДС на основе рассмотренной расчетной модели для расположения ПП как на рис. 3 (ближняя зона) показало, что в этом случае координаты начального приближения могут быть выбраны в любой точке внутри геометрии расположения ПП при полной сходимости алгоритма. Из результатов следует, что оптимальным выбором положения начального приближения является точка с координатами геометрического центра за счет наименьшего количества итераций, требуемых для определения координат ИРИ.

В дальней зоне РДС (рис. 2) определение координат ИРИ неоднозначно. Проведенные исследования показали наличие «слепых зон» как для случая симметричной конфигурации (рис. 4), так и для произвольного расположения ПП (рис. 5) при выборе начального приближения в геометрическом центре.

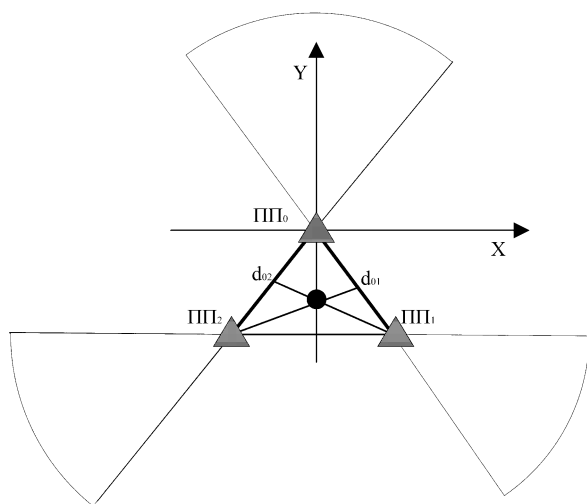


Рис. 4. РДС симметричной конфигурации

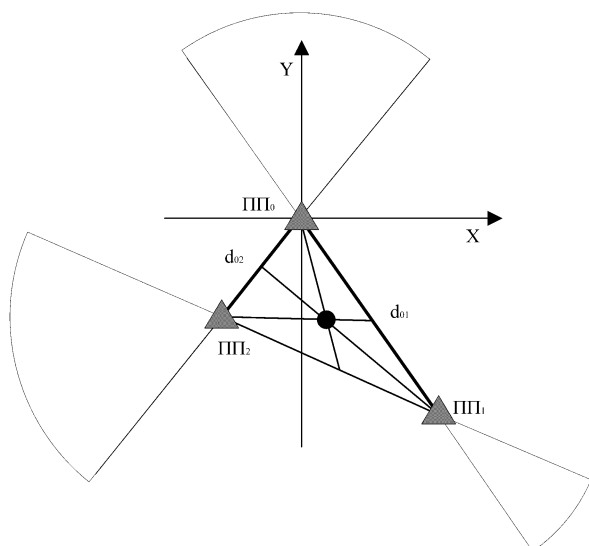


Рис. 5. РДС произвольной конфигурации

Геометрия «слепых зон» изменяется от конфигурации расположения ПП. В «слепых зонах» итерационный алгоритм не дает решение с заданной точностью.

Устранение этого недостатка возможно соответствующим подбором начального приближения

вне конфигурации системы (дальняя зона) с выбором направления на ИРИ.

Как показали исследования, направления на ИРИ зависят от соотношений между задержками сигналов по независимым базам.

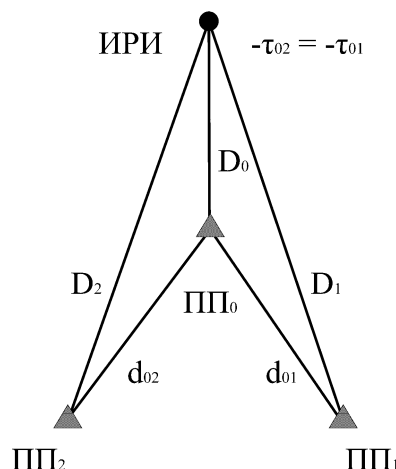


Рис. 6. Пример расположения ИРИ относительно ПП

Из рис. 6 видно, что расстояния от первого и второго ПП до ИРИ одинаковы и определяются по формуле (10). Зная, что расстояния пересчитываются в задержки, как показывает выражение (11), легко увидеть, что при таком расположении ИРИ задержки отрицательны и равны друг другу. Подбирая точки расположения ИРИ определенным образом, определим все возможные комбинации.

Рассмотрим различные варианты расположения ИРИ с соответствующими им временными характеристиками (рис. 7). На основании этого проиллюстрируем более наглядное представление зависимости комбинаций задержек от азимутального расположения источников радиоизлучения (рис. 8).

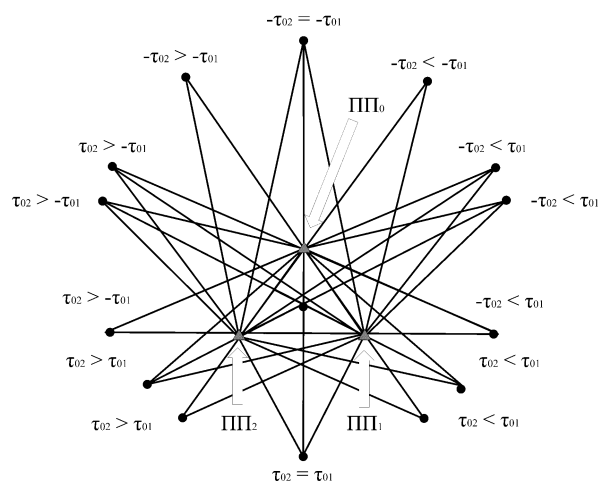


Рис. 7. Зависимости комбинаций задержек от расположения ИРИ

В итоге получим шесть секторов по 60 градусов, в одном из которых следует выбирать начальное

приближение в зависимости от расположения ИРИ для успешного решения. То есть сравнением двух разниц расстояний или задержек на практике можно определить сектор, где расположен ИРИ (рис. 8).

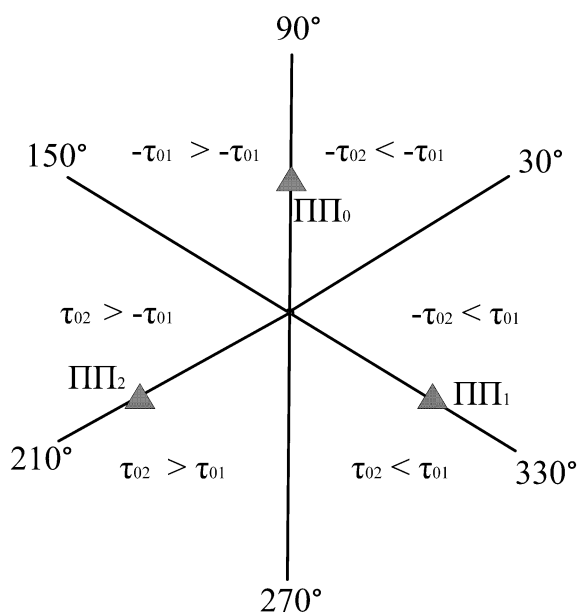


Рис. 8. Секторальное расположение задержек

Все расчеты были произведены для симметричной системы в виде равностороннего треугольника. Для несимметричного расположения ПП выявление зависимости задержек от местоположения ИРИ требует более глубокого изучения данной тематики и проведения иного математического моделирования.

Заключение

Таким образом, рассмотренный метод имеет свои достоинства и недостатки. Достоинства: сам алгоритм не вносит ошибки в определение координат; требует малого количества итераций при грамотном выборе начального приближения; задача внутри системы решается при всех возможных случаях; для симметричной системы «слепые зоны» устраняются; точность определения координат выше, чем у метода прямого алгебраического вычисления. Недостатки: задача нахождения координат ИРИ вне системы решается только не в «слепых зонах» и для симметрич-

ной системы; на практике сложно сделать разграничение на две задачи внутри и вне базы. Но оба эти недостатка устраняются, если в качестве начального приближения использовать координаты ИРИ, полученные при методе прямого алгебраического вычисления.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) проект №13-08-97538-р. центр. а.

Литература

1. Черняк, В.С. Многопозиционная радиолокация. – [Текст] / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. Деннис, Дж., мл. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений [Текст]: пер. с англ. / Дж. Деннис, мл., Р. Шнабель. – М.: Мир, 1988. – 440 с.
3. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука. 1978. – 831 с.
4. Оценка влияния выбора опорной точки для итерационной процедуры определения координат источника радиоизлучений в разностно-дальномерной системе [Текст] / В.П. Дубыкин, Б.В. Матвеев, Р.В. Степаненко, А.А. Саликов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т.8, №3. – С.9-12.
5. Симаков, В.А. Определение плоскостных и пространственных координат источников радиоизлучения автономными разностно-дальномерными системами пассивной локации [Текст] / В.А. Симаков, В.М. Терешко // Приоритеты военно-технической деятельности ФПС России по предупреждению и пресечению террористической деятельности на современном этапе: науч.-техн. сб. по материалам межвед. конф.; НИИТЦ ФПС. – М., 2003. – С. 45-47.
6. Моделирование М-позиционной пассивной разностно-дальномерной системы обнаружения сигналов и измерения координат источников радиоизлучения [Текст] / В.П. Дубыкин, Д.Ю. Крюков, Ю.С. Курьян, Д.В. Асотов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т.9, №6-1. – С.44-47.
7. Монаков, А.А. Основы математического моделирования радиотехнических систем [Текст]: учеб. пособие / А. А. Монаков. – СПб.: ГУАП, 2005. 100 с.: ил.
8. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория [Текст]: справочник / под ред. Я.Д. Ширмана. – изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.: ил.
9. Knopp, R. 'Remark on algorithm 334 [G5]: normal random deviates' [Text] / R. Knopp // Communications of the ACM. – Vol. 12, No. 5. – 1969.

Воронежский государственный технический университет

INVESTIGATION DIFFERENCE – RANGEFINDER SYSTEM OF ARBITRARY CONFIGURATION ITERATIVE ALGORITHM

B.V. Matveev, V.P. Dubykin, D.Yu. Kryukov, Yu.S. Kuryan, E.M. Kirpichev

In this work, we study the properties range-difference system arbitrary configuration with an iterative algorithm for the detection of the coordinates of radio sources at the circular review. With the help of mathematical modeling of a number of studies on the definition of "blind spots" and sectors of reliable detection. Recommendations are made to improve the properties of the range-difference system

Key words: difference-range-finder system, radio source, coordinate measuring, circular review, detection zones

