

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

# **ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ**

Материалы  
II Научно-практической конференции

Томск  
5-7 мая 2011 г.

УДК 621.391.08: 681.2.08 (063)  
ББК 34.9л.0  
И 741

И 741                    **Информационно-измерительная техника и технологии:**  
материалы II Научно-практической конференции/ Под ред. А.В. Юрченко  
– Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 158 с.

Сборник содержит доклады II Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии», проходившей в г.Томск в Национальном исследовательском Томский политехническом университете 5-7 мая 2011 года.

Предназначен для специалистов, исследователей в сфере приборостроения, контроля и управления качеством, а также по проблемам НИРС в вузах.

УДК 621.391.08: 681.2.08 (063)  
ББК 34.9л.0

*Секции конференции:*

*Секция 1.* «Разработка измерительных преобразователей, приборов и систем».

*Секция 2.* «Применения современных средств измерений и информационных технологий».

*Секция 3.* «Инновационные технологии в радиофизике».

*Секция 4.* «СВЧ и полупроводниковая электроника».

*При финансовой поддержке  
РФФИ Грант № 11-07-06023-г*

©ГОУ ВПО «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет», 2011  
©Оформление. Издательство  
Томского политехнического университета, 2011

## **ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ:**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Совет научной молодежи Томского научного центра СО РАН  
ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», г.Томск

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

*Председатель конференции:* Юрченко А.В., д.т.н., профессор каф. ИИТ.

*Председатель 1 секции:* Гольдштейн А.Е., д.т.н., зав.каф. ИИТ ИНК

*Председатель 2 секции:* Козлов А.В. к.т.н., науч. сотр., ИОА СО РАН

*Председатель 3 секции:* Шипилов С.Э., к.ф.-м.н., доцент каф. радиофизики ТГУ

*Председатель 4 секции:* Новиков А.А., инженер конструктор ОАО «НИИПП»

*Ученый секретарь:* Козлов А.В., к.т.н., науч. сотр., ИОА СО РАН

*Секретарь конференции:* Китаева М.В., аспирант кафедры ИИТ ИНК

## Содержание

### СЕКЦИЯ 1

#### РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТОЛЩИНЫ НЕПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ .....	8
<i>Алимов Д. В., Вахрушев Д. В., Алимов А. В.</i>	
ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ БОЛОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРИЕМНИК ИЗ МЕТАЛЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ .....	10
<i>Выборнов П.В., Ерофеев В.Я.</i>	
ПРИМЕНЕНИЯ ЗВУКОВЫХ КАРТ ЭВМ В КАЧЕСТВЕ АЦЦ/ЦАП ДЛЯ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ .....	12
<i>Дмитриев С.Ф. *, Ишков А.В., Лященко Д.Н.</i>	
ПОРТАТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФ НА НАНОЭЛЕКТРОДАХ ДЛЯ СЕМЕЙНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ....	14
<i>Лежнина И.А., Пеньков П.Г., Старикова Н.С.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ЭЛЕКТРОГРАФИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ	16
<i>Авдеева Д.К., Малый М.В., Фролов М.В.</i>	
РАЗРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ НАНОЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ СЪЕМА БИОПОНЦИАЛОВ ЧЕЛОВЕКА .....	18
<i>Авдеева Д.К., Лежнина И.А., Малый М.В., Фролов М.Д., Южасков М.М.</i>	
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКОГО И ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ .....	20
<i>Рыбалка С.А., Грехов И.С., Малый М.В., Фролов М.Д.</i>	
АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ .....	23
<i>Лежнина И.А., Моженина Е.Е.</i>	
МОДЕЛЬ РАБОТЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С СИСТЕМОЙ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ .....	26
<i>Китаева М.В., Юрченко А.В., Охорзина А.В., Скороходов А.В.</i>	
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ИЗМЕРЕНИЯ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ .....	27
<i>Шкляр Е.И., Миляев Д.В.</i>	
ОПТИМИЗАЦИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ .....	29
<i>Охорзина А. В., Китаева М. В., Суматохина К.В., Юрченко А.В.</i>	
ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННОГО РЫНКА АНАЛИЗАТОРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ .....	31
<i>Мирзаханов Р.Р.</i>	
КОНТРОЛЬ СООСНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ .....	33
<i>Якимов Е.В., Гольдштейн А.Е., Алимов Д.В., Вахрушев Д.В.</i>	
СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ С БЕСПРОВОДНЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ .....	38
<i>Вахрушев Д.В., Якимов Е.В., Алимов Д.В.</i>	

### СЕКЦИЯ 2

#### ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ДЕФЕКТЫ В ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ОБНАРУЖИВАЕМЫЕ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ МЕТОДЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ .....	41
<i>Бурцева Л.Б., Редько В.В.</i>	
ТЕХНОЛОГИЯ PLC И ЕЕ ПЕРСПЕКТИВЫ В РАЗВИТИИ АСКУЭ .....	43
<i>Николенко К. В., Юрченко А. В.</i>	
"УМНЫЙ ДОМ" И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ .....	48
<i>Григорьев М. Г., Вавилова Г.В.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ СО СТРУКТУРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	50
<i>Долгих В.Ю., Кононов Ю.М.</i>	
МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗОРА ..	52
<i>Исакова Ю.И., Вахрушев Д.В., Холодная Г.Е.</i>	
СИСТЕМА УЧЕТА РАСХОДА ВОДЫ .....	54
<i>Кадалова Е.В.</i>	
АКТУАЛЬНОСТЬ МНОГОСТАДИЙНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ .....	56
<i>Кононов Ю.М., Долгих В.Ю.</i>	

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ НАГРЕВ ИЗДЕЛИЙ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ.....	58
<i>Куликова И. В.</i>	
ТЕХНОЛОГИЯ PLC И НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА.....	60
<i>Николенко К. В., Юрченко А. В.</i>	
АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ БОЛЬШИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ .....	62
<i>Пустовойт А.В., Миляев Д.В.</i>	
ОПТИМИЗАЦИЯ ДАТЧИКА МАГНИТНЫХ МЕТОК ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ВНЕШНИХ УСЛОВИЯХ.....	64
<i>Силкина М.В.</i>	
СТАНЦИЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ.....	66
<i>Суматохина К.В., Китаева М. В., Охорзина. А. В., Юрченко А.В.</i>	
К ВЫБОРУ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СТАДИИ ПОДГОТОВКИ НЕФТИ.....	68
<i>Уфимцева Е. О.</i>	
НЕЙРОННЫЕ СЕТИ.....	70
<i>Ширшова А.М., Ширяев В.В.</i>	
ПОСЛЕДНИЕ РАЗРАБОТКИ ДАТЧИКОВ ДВИГАТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ.....	72
<i>Скрипка О.А.</i>	
СТАЦИОНАРНЫЕ И МОБИЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ.....	74
<i>Аришинов М.Ю. , Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Ивлев Г.А.</i>	

### СЕКЦИЯ 3 ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАДИОФИЗИКЕ

МЕТОДИКА АКУСТИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ .....	78
<i>Бочаров А.А., Соловьев А.В.</i>	
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, ИЗМЕРЕННАЯ НА СВЧ И КВЧ.....	80
<i>Дорофеева Г.А., Емельянов Е.В.</i>	
СПЕКТРЫ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ СВЧ АВТОГЕНЕРАТОРОВ С НЕУСТОЙЧИВЫМ СИНХРОННЫМ РЕЖИМОМ .....	82
<i>Усюкевич А.А., Новиков С.С.</i>	
ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ТРЕХМЕРНОГО РАДИОВИДЕНИЯ .....	84
<i>Завьялова К.В., Суханов Д.Я.</i>	
ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ И ФАЗИРОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ КОМБИНИРОВАННОЙ АНТЕННЫ НА ДОБРОТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ.....	86
<i>Запасной А.С., Лопатина А.П., Беличенко В.П.</i>	
РАДИОСПЕКТРОСКОП ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОТКЛИКА ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ В ДИАПАЗОНЕ 26-38 ГГц.....	88
<i>Землянухин Ю.П., Журавлев В.А., Сусяев В.И., Бабинович А.Н.</i>	
ЗВУКОВОЕ ВИДЕНИЕ ЗВУКОИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ .....	90
<i>Калашиникова М.А., Суханов Д.Я.</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ ФОКУСИРОВКИ В ЗАДАЧАХ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА НЕРОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	92
<i>Клоков А.В., Якубов В.П., Сато М.</i>	
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ.....	94
<i>Козик А.А., Кузнецова С.И.</i>	
МИКРОПОЛОСКОВАЯ АНТЕННАЯ РЕШЁТКА ДЛЯ РАДИОЛОКАТОРА РЕЧНЫХ СУДОВ .....	96
<i>Коноваленко М.О., Буянов Ю.И.</i>	
ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ AGILENT TECHNOLOGIES PNA E8363B.....	98
<i>Кочеткова Т.Д., Соболев В.А.</i>	
НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ .....	100
<i>Кулешов Г.Е., Доценко О.А., Сусяев В.И., Кочеткова О.А.</i>	
FPGA ИНТЕРПОЛЯТОР ДВУМЕРНЫХ СИГНАЛОВ .....	102
<i>Пономарев О.Г., Малышев В.Н.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАДИОДИАПАЗОНА.....	104
<i>Якубов В.П., Мироньчев А.С.</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ АНТЕНН В ЛОКАЦИОННОЙ ТОМОГРАФИИ .....	106

<i>Разинкевич А.К., Шпилов С.Э., Якубов В.П.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СШП ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОИСКА ЖИВЫХ ЛЮДЕЙ СКРЫТЫХ ЗА ПРЕПЯТСТВИЯМИ .....	108
<i>Сатаров Р.Н., Шпилов С.Э., Якубов В.П.</i> ДОПЛЕРОВСКОЕ РАДИОВИДЕНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОДВИЖНОГО ПЕРЕИЗЛУЧАТЕЛЯ.....	110
<i>Рубаненко А.С., Суханов Д.Я.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В ОБЛАСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА .....	112
<i>Павлова А.А., Суслев В.И.</i> ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ ПОДХОД В ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ.....	114
<i>Маришунин В. М., Мещеряков В.А., Жуков А.А.</i> РАДИОВОЛНОВОЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО МНОГОСЛОЙНОГО КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ И СРЕД.....	116
<i>Маришунин В. М., Мещеряков В.А., Жуков А.А.</i> МЕТОД ИТЕРИРОВАННЫХ ЯДЕР В ТЕОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ.....	118
<i>Бардашов Д.С., Лосев Д.В.</i> АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТОУПОРЯДОЧЕННЫХ ВЕЩЕСТВ .....	120
<i>Политов М.В., Найден Е.П.</i>	

#### **СЕКЦИЯ 4 СВЧ И ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

ИНФОРМАЦИОННО- АНАЛИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОАО НИИПП.....	123
<i>Пономарев А.А., Юрченко В.И., Яук Э.Ф.</i> ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНЫХ АВТОДИННЫХ КВЧ АНТЕНН ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ ..	134
<i>Трубачев А.А., Юрченко В.И.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОРПУСЕ УЛИЧНОГО СВЕТИЛЬНИКА .....	139
<i>Акимов Б.В., Гилева В.Н., Дениско С.В., Лукаш В.С., Сорокин В.Т., Юрченко В.И.</i> РАЗРАБОТКА КРУПНОФОРМАТНЫХ ЭКРАНОВ НА БАЗЕ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	142
<i>Васильев А.В., Юрченко В.И.</i> РЕЗОНАТОРНЫЙ СВЧ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЯ «СОЛНЕЧНОГО КАЧЕСТВА» .....	148
<i>Новиков А.Н., Юрченко А.В.</i> ЖИДКОСТНЫЙ АПЕРТУРНЫЙ СВЧ-КАЛОРИМЕТР.....	150
<i>Климов А.И., Климов Т.А., Цыганков Р.В.</i> ВОЛНОВОДНАЯ АНТЕННА ВОСЬМИМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА.....	152
<i>Климов А.И., Климов Т.А.</i> ПОЛОСОВОЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ФИЛЬТР ВОСЬМИМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА.....	154
<i>Климов А.И., Климов Т.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОВ 8-ММ ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН С МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ.....	156
<i>Цыганков Р.В., Тотьменинов Е.М., Климов А.И., Комаров А.Е., Кицанов С.А, Сухов М.Ю.</i>	

***СЕКЦИЯ 1***  
***РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ***  
***ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ***

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТОЛЩИНЫ НЕПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

*Алимов Д. В., Вахрушев Д. В., Алимов А. В.*

Научный руководитель: Гольдштейн А. Е., д.т.н., профессор  
Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: *alimov\_dima@mail.ru*

### Введение

В настоящее время в различных сферах промышленной деятельности применяются защитные непроводящие покрытия.

Важнейшими функциями покрытия являются коррозионная защита, долговечность, а также привлекательный внешний вид изделия. Одним из существенных показателей качества покрытия является его толщина, от правильного выбора которой зависит эффективность защитной функции покрытия.

Для контроля толщины покрытий используются толщиномеры, основанные на различных принципах действия. В частности, для измерения толщины непроводящих покрытий ферромагнитных объектов широко применяются неразрушающие методы измерения, такие как магнитный метод.

Родственной задачей измерения толщины покрытий является измерение зазора между измерительным устройством и контролируемым объектом. На практике это можно использовать для бесконтактного контроля несоосности сварных соединений бурильных труб.

При измерении зазора одной из основных проблем является влияние края объекта контроля на результаты измерения (краевой эффект).

К счастью, оценить влияние краевого эффекта можно с использованием компьютерного математического моделирования.

Компьютерное моделирование позволяет снизить время на измерение и анализ, для выбранной конфигурации преобразователя, а также повысить точность, сократить стоимость преобразователя. Таким образом, математическое моделирование фактически позволяет сделать выбор оптимальной конструкции магнитного преобразователя в каждом конкретном случае.

### Программное обеспечение для решения задачи

В качестве систем моделирования были рассмотрены системы Maxwell компании Ansoft и COMSOL Multiphysics. Данные системы представляют собой программное обеспечение для моделирования электромагнитных полей, используются для проектирования и исследования двумерных и трехмерных моделей датчиков, трансформаторов и других устройств различного применения. Системы базируются на методе конечных элементов (Finite Element Method - FEM) и точно рассчитывают статические, гармонические элект-

ромагнитные и электрические поля, а также переходные процессы в полевых задачах.

В качестве метода измерения при исследовании был рассмотрен магнитный взаимоиндуктивный метод контроля.

Данный метод основан на изменении магнитного потока, наводимого обмоткой возбуждения, через измерительную обмотку при изменении расстояния до объекта контроля.

### Моделирование преобразователя

Для проведения расчётов в системе моделирования Ansoft Maxwell была построена модель преобразователя в соответствии с разработанной конструкцией (рис. 1).

Измерительный преобразователь состоит из трёх обмоток: обмотки возбуждения  $w_1$ , измерительной обмотки  $w_2$  и компенсирующей обмотки  $w'_2$ .

Обмотка возбуждения расположена в центральной части преобразователя между измерительной и компенсирующей обмотками. Компенсирующая обмотка  $w'_2$  идентична  $w_2$  и расположена симметрично относительно  $w_1$ . Обмотки  $w_2$  и  $w'_2$  включены последовательно, встречно, их суммарное начальное напряжение равно нулю.

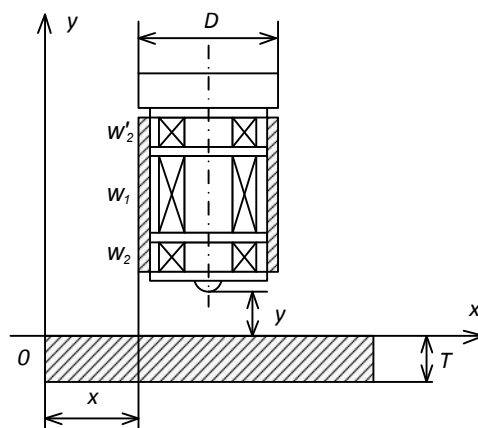


Рис. 1. Конструкция преобразователя

Для уменьшения влияния края объекта на измерение, в преобразователе используется концентратор магнитного поля в виде ферромагнитного сердечника, представляющего собой стержень.

Кроме этого в преобразователе, также применяется цилиндрический экран, для уменьшения влияния внешних факторов и локализации магнитного потока.



Согласно описанной конструкции в Ansoft Maxwell была построена трёхмерная модель магнитного преобразователя (рис. 2).

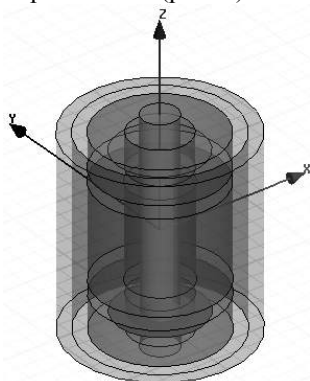


Рис. 2. Модель преобразователя

Полученная модель преобразователя позволяет произвести расчёты и оценить влияние краевого эффекта.

#### Результаты расчетов

Система Ansoft Maxwell не позволяет получить значение магнитного потока для трёхмерных моделей, поэтому в программу было внесено уравнение для определения магнитного потока:

$$\Phi_B = \iint_S B \cdot dS$$

С помощью проведенных методом конечных элементов расчетов получили результаты, при варьировании конструкции составляющих частей преобразователя. А именно было произведено варьирование геометрических размеров сердечника, положения измерительных обмоток, а также размеров экрана.

Полученные результаты показали, что увеличение диаметра стержневого сердечника даёт пропорциональное увеличение величины магнитного потока, наряду с этим, увеличивая и чувствительность. Увеличение длины сердечника, при одновременном перемещении измерительной и компенсирующей обмотки, также увеличивает измеряемое значение магнитного потока.

При помощи модели был оценен краевой эффект, при измерении зазора до электропроводящей пластины, и получены изображения линий индукции магнитного поля при влиянии края (рис. 3), а также без влияния края (рис. 4).

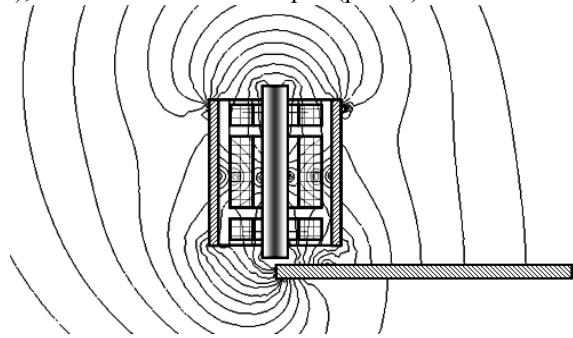


Рис. 3. Линии индукции магнитного поля при краевом эффекте

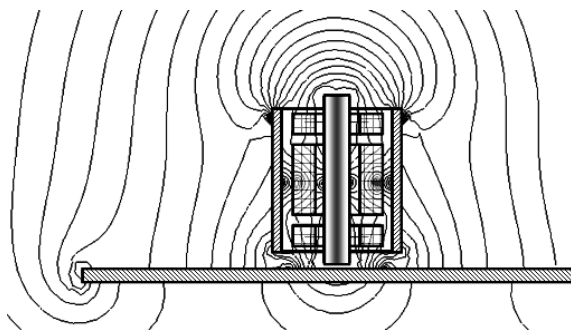


Рис. 4. Линии индукции магнитного поля без влияния края

Полученные с помощью моделирования результаты были сопоставлены с результатами, полученными экспериментально, что дало подтверждение адекватности результатов выбранной методики расчётов при моделировании. Также было обнаружено, что пакета моделирования COMSOL Multiphysics дает более стабильные результаты, по сравнению с Maxwell Ansoft, при том же уровне детализации и времени расчётов. Поэтому, для сравнения с экспериментальными, были использованы данные полученные в пакете COMSOL Multiphysics.

#### Заключение

Серия выполненных экспериментов моделирования в пакетах моделирования Maxwell Ansoft и COMSOL Multiphysics позволила найти оптимальную конструкцию преобразователя, исходя из требований к данной конструкции, обеспечив наименьшее влияние краевого эффекта на результаты измерений.

Полученные результаты в дальнейшем будут использованы при создании системы бесконтактного измерения несоосности сварных соединений буровых труб.

#### Литература

1. Физические основы измерительных преобразований: учебное пособие / А.Е. Гольдштейн. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008. – 253 с.
2. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 1997.
3. Алимов Д.В. Исследование влияния краевого эффекта при измерении толщины непроводящих покрытий ферромагнитных объектов // Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений. Сборник трудов II Международной научно-практической конференции молодых ученых. 23 – 25 ноября 2010 г. – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – С. 315–316.
1. Алимов Д.В. Отстройка от краевого эффекта при реализации вихретокового метода измерения толщины непроводящих покрытий // Современные техника и технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 3-х томах – т. 1 – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – с. 155-156.

## ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ БОЛОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРИЕМНИК ИЗ МЕТАЛЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

*Выборнов П.В., Ерофеев В.Я.*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
634055, Россия, г.Томск, пр. Академический, 10/3  
E-mail: yavay@sibmail.com

Приемники оптического излучения широко используются в современной электронике. Наибольшее распространение получили фотоэлектрические приемники (ФП) на основе внутреннего или внешнего фотоэффекта, в которых в качестве контактирующего вещества используются полупроводниковые материалы [1]. К существенным недостаткам ФП можно отнести сильную зависимость их свойств от температуры, значительный разброс характеристик, низкую лучевую стойкость и т.д. Предлагаемый нами тепловой приемник болометрического типа, чувствительный элемент которого выполнен из металла с эффектом памяти формы, способен заменить ФП в ближнем и среднем ИК-диапазоне, обладая при этом лучшими эксплуатационными характеристиками.

Принцип работы такого приемника основан на том, что поглощение чувствительным элементом потока излучения приводит к повышению его температуры на величину, пропорциональную интенсивности падающего излучения. Элемент выполнен из сплава, претерпевающего обратимое полиморфное превращение при изменении температуры в интервале температур измерения (фазовый переход). В ходе превращения доля новой фазы изменяется пропорционально изменению температуры. Процесс имеет атермическую кинетику – при прекращении изменения температуры прекращается изменение соотношения долей фаз. Указанное превращение заключается в перестройке кристаллической решетки с понижением (повышением) симметрии кристалла, что приводит к изменению электронно-фононного взаимодействия в системе и, соответственно, к изменению электрического сопротивления чувствительного элемента в целом.

В технике известны сплавы, в которых подобное изменение электрического сопротивления имеет отрицательный температурный коэффициент по абсолютному значению в несколько раз больший, чем у обычных металлов. К таким сплавам относятся, например, квазибинарные соединения TiNi – TiCu с атомным содержанием меди от 15 до 28 % [2]. Фазовые переходы в этих сплавах, которые идут вблизи комнатной температуры, сопровождаются резким изменением электрического сопротивления, при этом его температурная зависимость близка к линейной.

Приведенные сплавы отличаются высокой технологичностью, позволяющей получать тонкие пленки. Интервал температуры фазового перехода в них может быть легко смещен в ту или иную сторону по температурной шкале путем измене-

ния соотношения концентраций компонент. Такой технологический прием позволяет получить чувствительный элемент, действующий в широком диапазоне температур. Преимуществами этих сплавов также является отсутствие влияния числа рабочих циклов (измерений) на вид функции электросопротивления от температуры, что обеспечивается нулевым фазовым наклёпом у этих сплавов; число рабочих циклов практически не ограничено, что также связано с особенностями фазового наклёпа; наконец, следует отметить их высокую стойкость к агрессивным средам и механическую прочность.

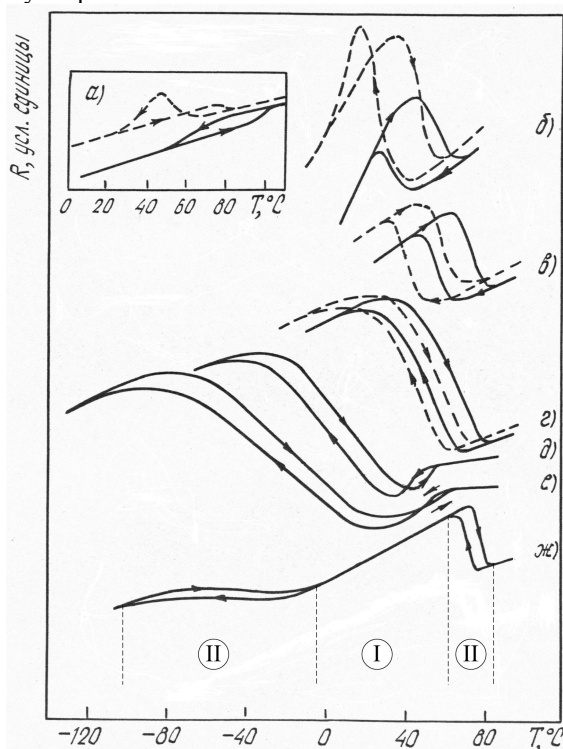


Рис. 1. Зависимости электросопротивления от температуры сплавов Ti(Ni,Cu) с разным процентным содержанием меди, где II – область фазового перехода (для ж) сплава).

На рис. 1 представлены типичные зависимости электросопротивления от температуры сплавов из никелида титана с разным процентным содержанием меди. Зависимость  $R = f(T)$  в области значений температур I имеет характер, свойственный обычным металлам и описывается соотношением:

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + \alpha_T \cdot (T - T_0)], \quad (1)$$

где  $R_0$  – сопротивление приемника при температуре  $T_0$ ;  $\alpha_T$  – температурный коэффициент сопротивления. Зависимость в области фазового пере-

хода II характерна материалу предлагаемого приемника и имеет более сложный характер обусловленный наличием петли гистерезиса. Тем не менее, если рассматривать линейный участок петли в одном из направлений (ветвь нагрева или охлаждения), то для области II также справедливо выражение (1).

Как известно, одним из параметров, определяющих чувствительность приемников болометрического типа, является температурный коэффициент электросопротивления [1]. В таблице 1 приведены справочные данные металлов, наиболее используемых в приемниках болометрического типа, таких как платина и никель.

Таблица 1. Справочные данные по металлам.

	Pt	Ni	TiNi
Температурный коэффициент сопротивления ( $10^{-3} \cdot K^{-1}$ )	3,85	6,8	1,2 (I) 5,2 (II)
Удельное электросопротивление (мкОм·м)	0,107	0,087	1,1
Удельная теплоемкость (Дж/кг·К)	134	440	~200
Плотность (г/см <sup>3</sup> )	21,5	8,9	6,5

На рис. 2 в абсолютных единицах представлены зависимости электросопротивления и деформации от температуры для сплава TiNi, взятые из [3].

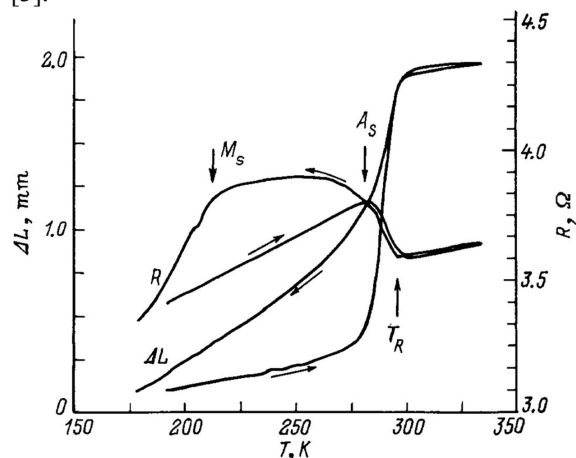


Рис. 2. Зависимости электросопротивления и деформации от температуры сплава TiNi.

В таблице 2 приведены расчетные данные для образца из платины, никеля и сплава никелида титана, представленного на рис. 2, площадью 1мм<sup>2</sup> и толщиной 1 мкм.

Таблица 2. Расчетные данные.

	Pt	Ni	TiNi
Масса образца (мкг)	21,5	8,9	6,5
Электросопротивление образца при 293 К (МОм)	107	87	1100
Энергия, затраченная на нагрев образца на 10 К (мкДж)	28,7	39,2	13
Изменение электросопротивления образца при его нагреве на 10 К (МОм)	4,12	5,92	13,2 (I) 57,2 (II)
Дискретность измерения энергии (нДж)	6,97	6,62	0,98 (I) 0,23 (II)

Результаты сравнительного расчета показывают, что чувствительность предлагаемого приемника из сплава никелида титана за счет совокупности физических свойств на порядок выше чувствительности известных приемников подобного типа и соизмерима с чувствительностью фотоприемников в области ближнего и среднего ИК-диапазона. Приемник из сплава никелида титана также может быть использован в других измерительных приборах, где изменение его температуры есть следствие пропорционального изменения искомого параметра.

#### Литература

- Ишанин Г.Г. Источники и приемники излучения. – СПб.: Политехника, 1991, 219 с.
- Ерофеев В.Я., Паскаль Ю.И. Кинетические и морфологические закономерности мартенситных превращений в сплавах Ti(NiCu). ДАН СССР. 1986, Т. 286, С. 879-882.

Беляев С.П., Волков А.Е., Коноплева Р.Ф. и др. Влияние нейтронного облучения на мартенситные превращения // Физика твердого тела. 1998. Т.40, № 9. С. 1705-1709.

## ПРИМЕНЕНИЯ ЗВУКОВЫХ КАРТ ЭВМ В КАЧЕСТВЕ АЦП/ЦАП ДЛЯ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

*Дмитриев С.Ф.\*, Ишков А.В., Лященко Д.Н.*

\*ГОУ ВПО «Алтайский государственный университет»,  
656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61

ФГОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет»,  
656049, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 98

e-mail: olg168@rambler.ru

В современном приборостроении разработчики все чаще идут по пути построения приборов как программно-аппаратных комплексов, в которых основные приборные функции выполняет специализированная компьютерная программа. При этом датчик, получающий информацию от объекта контроля подключается к ЭВМ через стандартные устройства ввода-вывода LPT и USB, COM-порты, PCI-шины и др. [1]. Так как зачастую входной сигнал датчика является аналоговым, то для его сопряжения с компьютером его объединяют с аналого-цифровым преобразователем в одном приборном блоке.

В то же время технические возможности современных звуковых карт ЭВМ, особенно портативных, позволяют использовать их как маломощные АЦП/ЦАП с возможностью широкого регулирования параметров преобразования входного и выходного сигналов.

Ранее нами была реализована схема виртуализированных приборов для измерения различных физико-химических параметров с использованием маломощных датчиков, подключаемых непосредственно к входу/выходу звуковой карты ЭВМ, работающей в полудуплексном режиме [2].

В ряде методов неразрушающего контроля необходимо одновременно получать информацию от объекта и осуществлять согласованное воздействие на него известным сигналом, для чего требуется независимый режим работы этого устройства. Не является исключением и метод вихревых токов (МВТ), с помощью которого могут быть осуществлены, например, структурные и физико-механические исследования металлов и сплавов [3].

Основными требованиями в методе являются локализация зоны контроля, отстройка от зазора, чистота подготовки поверхности. Для выполнения данных требований были созданы сверхлокальные вихрековые преобразователи (ВТП) и дефектоскопы [4], которые используются для диагностики структуры псевдосплавов применяемых, в частности, в электротехнике.

Использование же современных способов и методов обработки информации в сочетании с возможностями описанной схемы сопряжения датчика с ЭВМ в составе виртуализированного прибора позволяет существенно расширить возможности МВТ, а также позволяет увеличить массив данных для интерпретации результатов.

Не решенными остаются и ряд задач, возникающих при сопряжении ВТП и ЭВМ через АЦП/ЦАП. В частности, использование звуковой карты в качестве элемента измерительного тракта возможно, когда исследованы ее метрологические и электрические характеристики. Также должна быть решена задача совместимости произвольной АЦП/ЦАП с разработанным программным обеспечением.

С этой целью нами был разработан программно-аппаратный комплекс для исследования электропроводности неферромагнитных материалов. Комплекс состоит из трех основных частей: сверхминиатюрного вихрекового преобразователя (СМВТП); звуковой карты персонального компьютера и программного обеспечения, обеспечивающего ему основные функции измерительного устройства.

Для расчета величины электрической проводимости неразрушающим методом ВТ необходимо установить соответствие между уровнем сигнала на сигнальной катушке СМВТП и электропроводностью материала.

Одним из вариантов установления этого соответствия служит аппаратная кривая, для построения которой был использован набор контрольных образцов имеющих заранее известную электропроводность. Удельная электрическая проводимость использованных образцов была определена при помощи двойного моста Уитстона при температуре  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  с погрешностью не более 1%.

Тестирование комплекса осуществлялось по сериям измерений электропроводности эталонных материалов. В процессе измерения изменялось число замеров электропроводности для каждого образца, и рассчитывалось среднее значение электропроводности по каждой группе измерений. Основная погрешность измерения, связанная с девиацией зазора и отклонением установки ВТП от нормального положения, закономерно снижается с ростом числа замеров и увеличением времени каждого замера. Абсолютное значение среднего взвешенного основной погрешности, полученное в серии опытов, не превысило 0,8 МСм/м.

При конструировании программно-аппаратных комплексов существенной проблемой является совместимость ПО и нестандартизированных ЦАП-АЦП, которая связана с несовпадением характеристик аналоговых усилительных компонент.

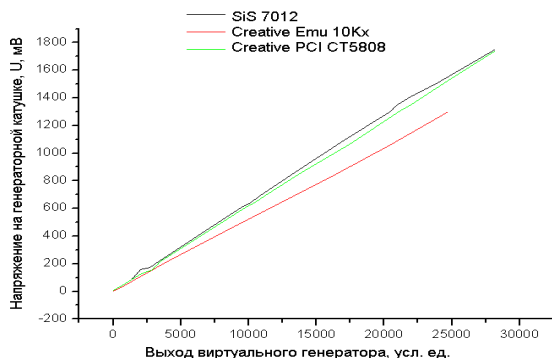


Рис. 1. Напряжение на генераторной катушке ВТП в зависимости от сигнала генератора

Так, например, на рис. 1 представлена зависимость уровня напряжения на генераторной катушке ВТП от условных единиц виртуального генератора. Аналогичные различия обнаруживаются и для зависимости между условными единицами сигнала на выходе АЦП и уровнем напряжения на сигнальной катушке (рис. 2).

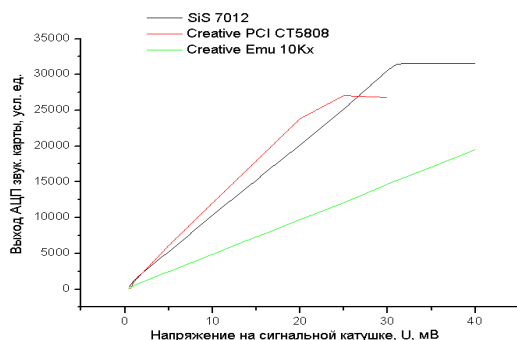


Рис. 2. Зависимость напряжения на сигнальной катушке ВТП от уровня сигнала АЦП

Для решения проблемы совместимости ПО с различными ЦАП/АЦП может быть использована эталонная звуковая карта и зависимость между уровнем напряжения на сигнальной катушке и условными единицами сигнала на выходе ее АЦП, для которой определяется коэффициент наклона  $k$ . Затем проводится аппроксимация зависимости электропроводности образцов от сигнала АЦП карты полиномом третьей степени:

$$\sigma = a(y - y_0)^3 + b(y - y_0)^2 + c(y - y_0) + d, \quad (1)$$

где  $\sigma$  - значение электропроводности объекта контроля, МСм/м;  $y$  - условные единицы сигнала на выходе АЦП звуковой карты;  $y_0$  - условные единицы шумового сигнала на выходе АЦП звуковой карты;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  - коэффициенты аппроксимации.

Для остальных звуковых карт также устанавливается соответствие между уровнем напряжения на сигнальной катушке и условными единицами

сигнала на выходе АЦП, которые затем приводят к показаниям эталона по формуле:

$$y_1 = \frac{k_1}{k_2} y_2, \quad (2)$$

где  $y_1$  - приведенное значение условных единиц эталонной карты;  $y_2$  - количество условных единиц текущей карты;  $k_1$  - коэффициент наклона для эталонной карты;  $k_2$  - коэффициент наклона для текущей карты.

Тогда, значение электрической проводимости, измеренное по уровню сигнала с любой произвольной звуковой карты, можно рассчитать по следующей модифицированной формуле:

$$\sigma = (a(y - y_0)^3 + b(y - y_0)^2 + c(y - y_0) + d) \times \frac{k_1}{k_2}, \quad (3)$$

Программное обеспечение для виртуализированного прибора написано на языке C++ под операционную систему MS Windows 95/98/2000/XP и имеет интерактивный оконный интерфейс.

В ходе выполнения основного рабочего цикла работы программы происходит постоянное считывание уровня сигнала с выхода АЦП микрофонного входа звуковой карты, пересчет полученных условных значений в значения проводимости, отнесение исследуемого образца к классу ферро- или неферромагнетика и идентификация металла, и, если уровень сигнала достоверно превышает фоновый (4 Мсм/м), результат измерения выводится на экран.

### Литература

- Ишков А.В., Дмитриев С.Ф. Современная концепция сопряжения измерительных устройств с ЭВМ. // Мат. 8-ой Междунар. конф. ИКИ-2007. – Барнаул: АлтГТУ, 2007. С.3.
- Панов С.Г., Дмитриев С.Ф., Ишков А.В. Применение сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей для неразрушающего контроля наноматериалов. // Горизонты образования. Вып.10. 2008.
- Приборы неразрушающего контроля материалов и изделий. Кн.2 / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986.
- Неразрушающий контроль металлов и изделий. / Под ред. Г.С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976.
- Денискин В.П. и др. Некоторые конструкции вихревых накладных преобразователей. // Дефектоскопия. 1975. №1. С. 56.
- Дмитриев С.Ф., Сагалаков А.М. // Тр. Второй Междунар. н.-т. конф. «Экспериментальные методы в физике структурно-неоднородных конденсированных сред. ЭМФ 2001» –Барнаул: Изд-во АГУ, 2001. С. 125.

## ПОРТАТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФ НА НАНОЭЛЕКТРОДАХ ДЛЯ СЕМЕЙНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

*Лежнина И.А., Пеньков П.Г., Старикова Н.С.*

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,

634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30

E-mail: [medpribor@introscopy.tpu.ru](mailto:medpribor@introscopy.tpu.ru)

Наиболее востребованной методикой функциональной диагностики в лечебно-профилактических учреждениях на сегодняшний день остается электрокардиография.

Сердечно-сосудистые заболевания являются основными причинами смертности населения экономически развитых стран мира, большинства стран с переходной экономикой и становятся проблемой для развивающихся стран. Ежегодно в мире от болезней сердца умирает около 17 млн. человек. В России, по данным Госкомстата, в 2007 году от ССЗ погибли 1 млн. 232 тыс. 182 человека.

Среди ССЗ лидирующее место занимают ишемическая болезнь сердца (ИБС) (49,3%).

В настоящее время исследования сердечно-сосудистой системы занимают лидирующее место, на них приходится 85% от общей структуры функциональных исследований (исследования нервной системы – 7%, функции внешнего дыхания – 6%, далее с большим отставанием следуют исследования других систем – 2%). За анализируемый период отмечен прирост исследований сердечно-сосудистой системы на 26%.

Исследования сердечно-сосудистой системы динамично растут и ежегодно увеличиваются на 2,1%.

Наиболее востребованной методикой функциональной диагностики в лечебно-профилактических учреждениях остается электрокардиография. Из всех видов электрокардиографических исследований ЭКГ – исследований на обычных электрокардиографах возросло на 27%, на электрокардиографах с компьютерной обработкой на 94,7%, число ЭКГ в дистанционно-диагностических кабинетах на 128%, более сложных ЭКГ-методик таких, как стресс-ЭКГ - на 41%, чреспищеводных электростимуляций сердца (ЧПЭС) - на 29%. Динамично развивается методика длительной регистрации: холтеровского мониторирования ЭКГ (80%) и суточного мониторирования артериального давления (202%) [1, 2].

Особо нужно отметить, что если раньше боли в сердце были уделом людей старшего поколения, то теперь ИБС не обходит стороной и молодых. Не так уж редко можно увидеть в реанимации молодых пациентов с инфарктом миокарда. На такое развитие ИБС в настоящее время оказывают роль многие факторы: экология, современный образ жизни, связанный с гиподинамией и диетой, богатой жирами, а также наследственная предрасположенность и курение.

В настоящее время одним из направлений развития электрокардиографии является регистра-

ция и анализ низкоамплитудных потенциалов, возникающих на электрокардиосигнале.

Низкоамплитудные потенциалы заключают в себе важную диагностическую информацию о состоянии сердца пациента. Тем более важно не только зафиксировать низкоамплитудные сигналы, но и измерить их параметры.

В настоящее время углубленную диагностику могут осуществлять только дорогостоящие аппараты, которые могут себе позволить не все медицинские учреждения. Диагностика на таких аппаратах не проводится на ранней стадии. В системе массового медицинского обслуживания используются электрокардиографы с техническими характеристиками, не выходящими за пределы действующих стандартов на электрокардиографы и, следовательно, не имеющие возможности ранней диагностики. Однако для качественной оценки ишемических изменений ЭКГ важна точность измерения смещения сегмента ST. Оптимально, когда она не хуже 10÷15 мкВ. Системы с точностью измерения смещения ST на уровне 40÷50 мкВ могут затруднить выявление небольшого смещения, так как диагностически значимое смещение сегмента ST составляет 100 мкВ.

Диагностика заболеваний сердца на ранней стадии в системе массового медицинского обслуживания возможна только при регистрации и анализе нановольтовых потенциалов ЭКГ. Ни один из аппаратов ЭКГ не может измерять и диагностировать биопотенциалы нановольтового уровня.

Современная электрокардиография должна обеспечивать

- доступность;
- наблюдение за здоровьем человека и общества;
- наблюдение пациента в течение всей жизни, а не только в период болезни.

Электрокардиографическая помощь должна включать профилактику и диагностику, но в последние годы она все больше становится ориентированной на синдром боли. Профилактика – первейшая обязанность самого человека, что признается во всем мире и у нас в России.

Постоянное наблюдение за сердечно-сосудистой системой возможно только в домашних условиях. Особенно это необходимо в семьях, наиболее предрасположенных к сердечно-сосудистым заболеваниям, и для пациентов, перенесших инфаркт миокарда.

Проблема регистрации низкоамплитудных потенциалов заключается в том, что на обычной электрокардиограмме они теряются на фоне шума. Сложность анализа всегда создают артефакты,



«наводки», электродные помехи при естественных движениях пациента. Проблемы возникают из-за недостаточного качества электродов, а именно высоких постоянных контактных и поляризационных потенциалов, высокого сопротивления электродов и перехода «кожа-электрод». По этой причине возникают следующие явления: "насыщение" усилителей, дрейф изолинии, сетевые помехи.

В настоящее время достигнут определенный предел диагностических возможностей методов анализа. Суть известных способов автоматической синдромной диагностики сводится к анализу изменений контура ЭКС, выявлению на ЭКС характерных точек, измерению интервально-амплитудных параметров и отношений между выявленными точками. Затем ЭКС по ряду обучающих признаков относят к одному из известных классов ЭКС [1].

Главная задача электрокардиографической диагностики ишемии миокарда и других заболеваний сердца – не пропустить патологическое состояние сердечно-сосудистой системы. Очевидно, что для решения данной задачи необходимо повысить качество съема биоэлектрических потенциалов т.е. снизить уровни измеряемых сигналов [2, 3, 4].

Современные нанотехнологии и наноматериалы открыли новые перспективы для создания нового поколения медицинских электродов - нанозлектродов, имеющих на порядок более высокую стабильность электродного потенциала, стабильные контактные и поляризационные потенциалы, более низкое напряжение шума и сопротивление.

Более высокие метрологические характеристики нанозлектродов открывают перспективы для создания нового вида медицинской электрокардиографической аппаратуры для семейного применения, работающей в расширенном частотном диапазоне, начиная от постоянного тока, и имеющую повышенную разрешающую способность, позволяющую исследовать изменения биоэлектрической активности органов, тканей и систем человека в нановольтовом и микровольтовом диапазонах, а следовательно появляется возможность более ранней диагностики сердечно-сосудистых заболеваний в том числе и ишемии миокарда. На данный момент углубленная, детальная диагностика сердечно-сосудистых заболеваний возможна только в специализированных лечебных учреждениях (НИИ кардиологии) и требует помимо электрокардиографии дополнительных, более трудоемких и более затратных по времени методов исследования.

Качество электродиагностической аппаратуры зависит от качества применяемых электродов для съема биоэлектрической активности различных органов и тканей человека.

Благодаря использованию нанозлектродов в электрокардиографах для семейного применения возможно расширить частотный диапазон от 0 Гц до 10000 Гц и увеличить разрешающую способность по напряжению с целью регистрации элементов электрокардиосигнала нановольтового и микровольтового уровня.

Тем самым повысить диагностическую значимость ЭКГ-метода за счет качественного съема биопотенциалов нанозлектродными.

Данные преимущества позволяют:

- усилить конкурентные позиции отечественных производителей на рынке электрокардиографов;

- повысить качество электрокардиографического исследования благодаря ранней диагностике сердечно-сосудистых патологий;

- сократить потери работоспособного населения и увеличить продолжительность жизни населения России благодаря ранней диагностики сердечно-сосудистых патологий.

Аппарат ЭКГ для семейного применения позволит осуществлять постоянное наблюдения за состоянием сердечно-сосудистой системы человека в домашних условиях с целью раннего выявления отклонений в состоянии сердечно-сосудистой системы путем создания электрокардиографов на нанозлектродах индивидуального применения для исследования сердца в статике и в динамике с формированием индивидуальной базы данных, которые в перспективе найдут широкое применение.

#### Литература

1. Особенности развития службы функциональной диагностики в Российской Федерации. Сайт РАСФД. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rasfd.com/index.php?categoryID=9> (дата обращения: 21.02.2011).

2. Общая врачебная практика (семейная медицина): перспективы развития. Сайт медицинского института усовершенствования врачей. [Электронный ресурс]. URL: [http://giduv.com/journal/2004/2/obschaja\\_vrachebnaja\\_praktika](http://giduv.com/journal/2004/2/obschaja_vrachebnaja_praktika) (дата обращения: 21.02.2011).

3. Рябыкина Г.В. Ишемии миокарда методом Холтеровского мониторирования // Вестник Аритмологии. ЭКГ. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.incart.ru/article\\_print.jsp?id=897](http://www.incart.ru/article_print.jsp?id=897) (дата обращения: 21.08.2010).

4. P.I. Danilyuk. Электрокардиография E.C.G. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://db.datex-oda.com/evadb/fi3037.nsf/WebMaterialDate/1E1EDCF9F5E3354AC22575DA0027B41D/\\$File/Daniljuk\\_ECG.pdf](http://db.datex-oda.com/evadb/fi3037.nsf/WebMaterialDate/1E1EDCF9F5E3354AC22575DA0027B41D/$File/Daniljuk_ECG.pdf) (дата обращения: 11.02.2010).

## ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ЭЛЕКТРОГРАФИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

*Авдеева Д.К., Мальй М.В., Фролов М.В.*

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30

E-mail: [medpribor@introscope.tpu.ru](mailto:medpribor@introscope.tpu.ru)

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований метрологических характеристик нанoeлектродов. Нанoeлектроды были изготовлены с помощью усовершенствованной нанотехнологии, которая является «ноу-хау».

Была поставлена задача повышения стабильности электродного потенциала при воздействии постоянным током и уменьшения степени поляризации и сопротивления электродов с целью повышения разрешающей способности средств измерения биопотенциалов человека и уменьшения артефактов при съеме биопотенциалов.

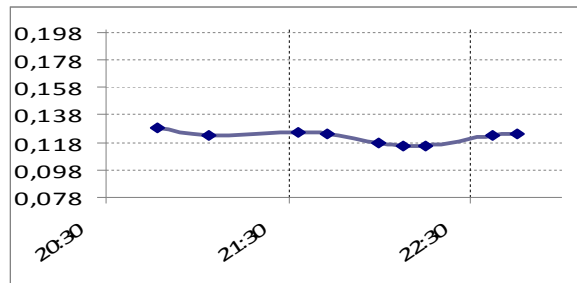
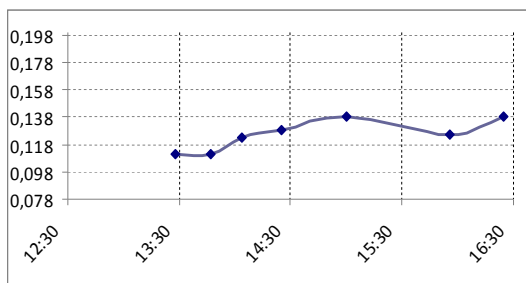
Исследования проводились на электродной ячейке ЭЯ.

Определение дрейфа разности электродных потенциалов на постоянном токе проводили с помощью автоматизированной установки для проверки медицинских электродов автоматизированной УПЭ-2 (Сертификат об утверждении типа средства измерений № 33700, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под № 39325-08).

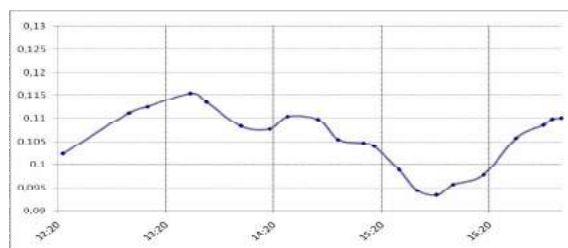
На рисунке 1 а, б, в представлены зависимости изменения дрейфа разности электродного потенциала, полученного на ячейке ЭЯ.

На рисунках также представлены значения математического ожидания  $M$ , среднеквадратического отклонения  $\sigma$ , максимального отклонения от среднего в сторону больших значений  $+\Delta X_{\max}$  и максимального отклонения от среднего в сторону меньших значений  $-\Delta X_{\max}$ .

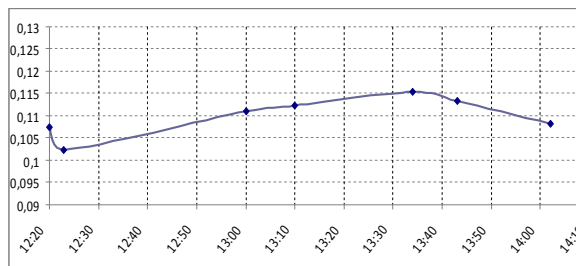
Максимальное отклонение в сторону больших значений равно  $+0,0136$  мВ; максимальное отклонение в сторону меньших значений равно  $(-0,0140)$  мВ; максимальное значение среднеквадратического отклонения равно  $0,0112$  мВ.



$M = 0,1253$  мВ;  $\sigma = 0,0112$  мВ;  
 $+\Delta X_{\max} = +0,0136$  мВ;  $-\Delta X_{\max} = -0,0140$  мВ  
а) 1 сутки



$M = 0,1219$  мВ;  $\sigma = 0,0045$  мВ;  
 $+\Delta X_{\max} = +0,0032$  мВ;  $-\Delta X_{\max} = -0,0098$  мВ  
б) 2 сутки



$M = 0,1056$  мВ;  $\sigma = 0,0064$  мВ;  
 $+\Delta X_{\max} = +0,0098$  мВ;  $-\Delta X_{\max} = -0,0122$  мВ

в) 3 сутки

Рис. 1 а, б, в. Электродный потенциал во времени электродной ячейки ЭЯ<sub>1</sub>

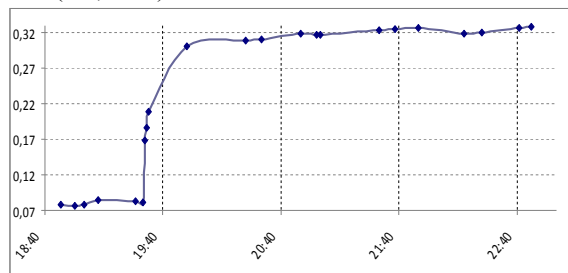
Известно из требований к медицинской электрографической аппаратуре [1-3], что допустимая величина постоянного тока между двумя потенциальными электродами, приложенными к телу человека, равна  $0,1$  мкА.

Были проведены исследования изменения разности электродных потенциалов во времени при протекании постоянного тока  $0,1$  мкА через электродную ячейку. Полученные зависимости для ЭЯ представлены на рисунке 2 а, б.

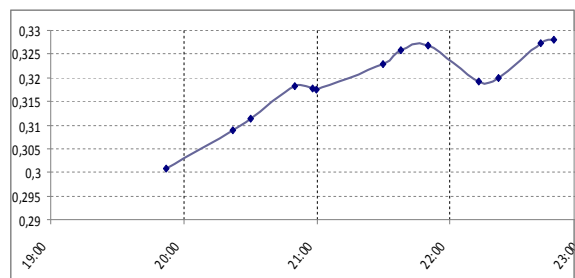
Дрейф электродного потенциала ЭЯ равен  $0,005$  мВ/с; изменение потенциала –  $0,25$  мВ;



среднее значение равно 0,3188 мВ; среднеквадратическое отклонение – 0,0080 мВ; максимальное отклонение в сторону положительных значений равно 0,0092 мВ, в сторону отрицательных значений (– 0,0018) мВ.



а)



$$M = 0,3188 \text{ мВ}; \quad \sigma = 0,0080 \text{ мВ};$$

$$+\Delta X_{\max} = +0,0093 \text{ мВ}; \quad -\Delta X_{\max} = -0,0180 \text{ мВ}$$

б)

Рис. 2 а, б. Дрейф разности электродного потенциала ЭЯ<sub>1</sub> во времени при токе 0,1 мкА

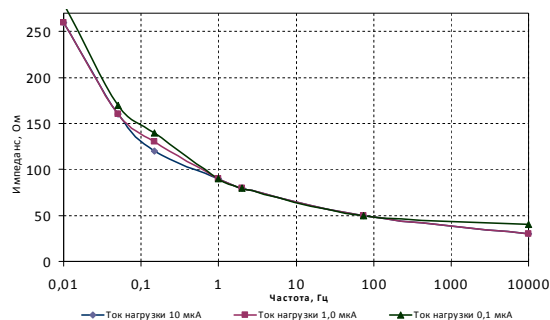
При исследовании дрейфа электродного потенциала нанозлектродов, выполненных по новой технологии, получены следующие результаты:

1 Нанозлектроды имеют высокую стабильность электродного потенциала во времени при постоянном протекании через ячейку тока 0,1 мкА. Дрейф электродного потенциала составляет значение (0,005±0,01) мкВ/с.

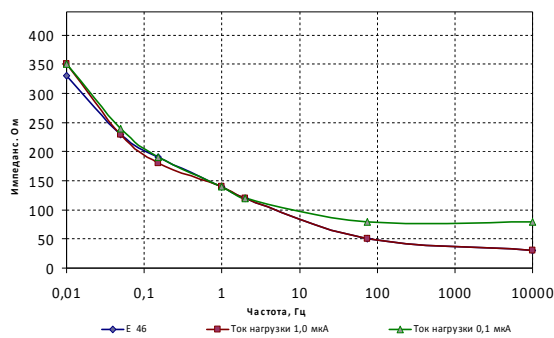
2 Напряжение поляризации электродов при воздействии постоянным током 0,1 мкА равно (0,2±0,3) мВ и практически не меняется во времени при длительном воздействии током.

Полное сопротивление электродных ячеек ЭЯ<sub>1</sub> и ЭЯ<sub>2</sub> проводилось на установке УПЭ-2.

Измерения проводились на частотах измерительного тока 0,01; 0,05; 0,15; 1; 2; 75; 10000 Гц. Результаты исследований приведены на рисунке 3 а, б.



а) ЭЯ<sub>1</sub>



б) ЭЯ<sub>2</sub>

Рис. 3 а, б. Зависимость полного сопротивления электродных ячеек от частоты при разных токах нагрузки

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Сопротивление нанозлектродов, выполненных по новой технологии, уменьшилось в 2-3 раза в зависимости от частоты и величины тока.

2. Значительно уменьшился разброс значений сопротивления электродной ячейки в зависимости от величины тока при частотах, меньших 1 Гц.

Применение разработанных нанозлектродов в медицинской электрографической аппаратуре позволило создать нановольтовую шкалу измерений.

#### Литература

1 ГОСТ 19687-89 . Приборы для измерения биоэлектрических потенциалов сердца.

2 ГОСТ Р 50267.0-92 (МЭК 601-1-88). Изделия медицинские электрические. Часть 1. Общие требования безопасности.

3 ГОСТ Р МЭК 60601-1-1-2007. Изделия медицинские электрические. Часть 1-1. Общие требования безопасности. Требования безопасности к медицинским электрическим системам.

## РАЗРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ НАНОЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ СЪЕМА БИОПЕНЦИАЛОВ ЧЕЛОВЕКА

*Авдеева Д.К., Лежнина И.А., Мальный М.В., Фролов М.Д., Южаков М.М.*  
Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: medpribor@introscopy.tpu.ru

В ОСП «НИИ интроскопии» ГОУ ВПО ТПУ разработаны на основе пористой керамики совместно с институтом химии твердого тела и механохимии (ИХТТМ) СО АН РФ и кафедрой технологии силикатов ГОУ ВПО ТПУ медицинские нанозлектроды для съема поверхностных биопотенциалов человека.

В медицинской практике съем поверхностных биопотенциалов широко применяется для функциональной диагностики различных органов и тканей человека, однако в диагностической аппаратуре до настоящего времени наиболее широко применяются металлические электроды, которые позволяют снимать биопотенциалы в ограниченном частотном диапазоне.

Постоянные и медленноменяющиеся биопотенциалы в настоящее время диагностическая аппаратура не измеряет и по этой причине отсутствует в практическом здравоохранении диагностика по значениям постоянных и медленноменяющихся биопотенциалов.

Кроме того, известно из [1,2], что фильтры, ограничивающие электрокардиосигнал в определенном частотном диапазоне, привносят амплитудные и фазовые искажения.

Качество измерений постоянных и медленноменяющихся биопотенциалов человека зависит от стабильности электродного потенциала на постоянном токе, поляризационных и контактных потенциалов медицинских электродов.

Основными метрологическими параметрами электродов являются: дрейф разности электродных потенциалов на постоянном токе, напряжение поляризации электродов, полное сопротивление электродов.

Исследования проводились на электродной ячейке ЭЯ – «электрод-электролит-электрод».

Определение дрейфа разности электродных потенциалов на постоянном токе проводили с помощью автоматизированной установки для проверки медицинских электродов автоматизированной УПЭ-2 (Сертификат об утверждении типа средства измерений № 33700, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под № 39325-08).

На рисунке представлены зависимости изменения дрейфа разности электродного потенциала во времени. На графике представлены значения математического ожидания  $M$ , среднеквадратического отклонения  $\sigma$ , максимального отклонения от среднего в сторону больших значений  $+\Delta X_{max}$  и максимального отклонения от среднего в сторону меньших значений  $-\Delta X_{max}$ .

Максимальное отклонение в сторону больших значений равно  $+0,0032$  мВ; максимальное отклонение в сторону меньших значений равно  $(-0,0098)$  мВ; среднеквадратическое отклонение равно  $0,0045$  мВ.

Дрейф при токе  $\leq 1$  нА равен  $(1-3)$  нВ/с.

Электродный потенциал во времени электродной ячейки ЭЯ.

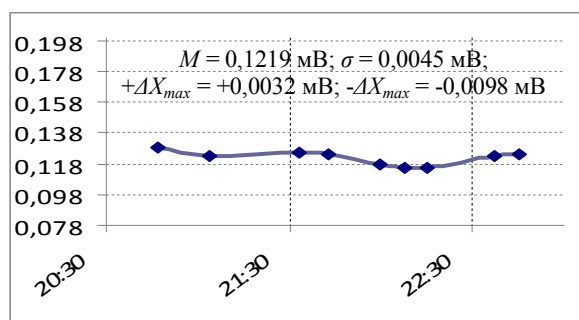


Рис.1 Электродный потенциал

Известно из требований к медицинской электрографической аппаратуре [3], что допустимая величина постоянного тока между двумя потенциальными электродами, приложенными к телу человека, равна  $0,1$  мкА.

Были проведены исследования изменения разности электродных потенциалов во времени при протекании постоянного тока  $0,1$  мкА через электродную ячейку.

При токе  $0,1$  мкА дрейф электродного потенциала равен  $0,005$  мкВ/с; напряжение поляризации –  $0,25$  мВ; среднее значение равно  $0,3188$  мВ; среднеквадратическое отклонение –  $0,0080$  мВ; максимальное отклонение в сторону положительных значений равно  $0,0092$  мВ, в сторону отрицательных значений  $(-0,0018)$  мВ.

Полное сопротивление электродных ячеек ЭЯ<sub>1</sub> и ЭЯ<sub>2</sub> проводилось на установке УПЭ-2.

Измерения проводилось на частотах измерительного тока  $0,01$ ;  $0,05$ ;  $0,15$ ;  $1$ ;  $2$ ;  $75$ ;  $10000$  Гц.

На основании проведенных метрологических исследований нанозлектродов можно сделать следующие выводы:

1. Нанозлектроды имеют высокую стабильность электродного потенциала во времени при токе  $\leq 1$  нА и при протекании через ячейку постоянного тока  $0,1$  мкА.

Дрейф электродного потенциала при токе  $\leq 1$  нА – не более  $0,001$  мкВ/с.

Дрейф электродного потенциала при токе  $0,1$  мкА составляет значение  $(0,005 \div 0,01)$  мкВ/с.

2. Напряжение поляризации электродов при воздействии постоянным током  $0,1$  мкА равно

3.  $(0,2 \pm 0,3)$  мВ и практически не меняется при длительном воздействии током.

4. Напряжение поляризации электродов при токе от 0,1 мкА до 10 мкА изменяется от 0,2 мВ до 6,4 мВ.

5. Сопротивление наноэлектродов составляет десятки и сотни Ом в зависимости от частоты и практически не зависит от величины тока при частотах, меньших 1Гц.

На базе наноэлектродов создан электрокардиограф для длительного мониторинга сердца по Холтеру. Медицинские испытания электрокардиографа показали высокое качество съема

электрокардиограммы без применения фильтров (ФВЧ и сетевого).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульгин В.И., Токарев А.В. Метод регистрации и анализа электрокардиограммы плода в ходе беременности//Радиоэлектронные и компьютерные системы.2008..№3.с.66-73.

2. Латфуллин И.А., Тептин Г.М., Контуров С.В. Сравнительный анализ погрешностей в аналоговой и компьютерной электрокардиографии//Вестник аритмологии.1999..№13.с.54-58.

3. ГОСТ 19687-89 . Приборы для измерения биоэлектрических потенциалов сердца.

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКОГО И ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

*Рыбалка С.А., Грехов И.С., Малый М.В., Фролов М.Д.*

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30

Е-mail: [medpribor@introscopy.tpu.ru](mailto:medpribor@introscopy.tpu.ru)

Описывается программа обработки результатов регистрации психофизического состояния студентов посредством аппаратно-программного комплекса с 31-им каналом. Рассмотрены основные элементы программы и приемы работы с ней

В рамках выполнения проекта Рособразования по проекту № 2.2.3.3/3111 «Разработка средств диагностики и экспресс-методов, основанных на применении медицинских нанозлектродов, для оценки физического и психо-эмоционального состояния здоровья обучающихся» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» разработан аппаратно-программный комплекс (АПК) на нанозлектродах для оценки физического и психо-эмоционального состояния обучающихся.

В своем составе АПК имеет 31 канал:

- 12 электрокардиографических каналов;
- 21 электроэнцефалографический канал;
- 2 электроокулографических канала;
- 1 электромиографический канал;
- 1 для исследования кожно-гальванической реакции (КГР).

Аппаратура работает в полосе от 0 Гц до 10000 Гц и предназначена для определения ранних признаков нарушений физического и психо-эмоционального состояния у студентов. Каналы могут использоваться частично, для регистрации отдельных видов сигналов, а при необходимости может использоваться весь имеющийся набор каналов.

В процессе развития программной части комплекса была разработана программа обработки сигналов (электрокардиограмма, электроэнцефалограмма, электромиограмма, электроокулограмма и кожно-гальваническая реакция) *StudentHealth* («Здоровье студентов»). Программа состоит из трех независимых частей:

- Чтение и просмотр сигналов;
- Энергия по интервалам;
- Просмотр длинных записей.

Программа имеет главное окно со списком программ (окон), осуществляющих решение различных крупных задач. Это окно имеет вид, как показано на рис. 1.

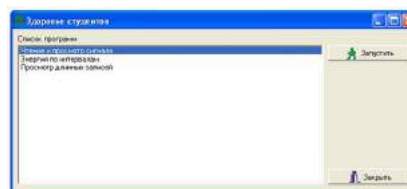


Рис. 1. Главное окно программы StudentHealth

Программа «Чтение и просмотр сигналов» предназначена для чтения сигналов. Программа осуществляет чтение и обработку сигналов достаточно короткой длины (не более 30 мин). Она содержит несколько страниц для организации последовательной обработки и исследования сигнала:

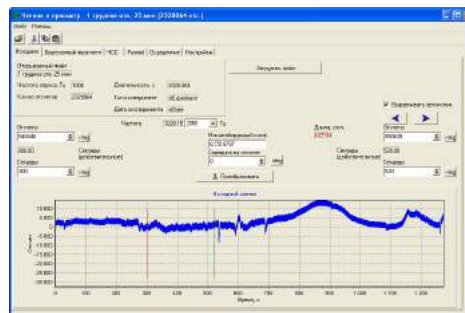
- Исходное;
- Вырезанный фрагмент;
- ЧСС (частота сердечных сокращений);
- Ручной;
- Осреднение;
- Настройки.

Эта программа имеет вид, как показано на рис.

2.

Рис. 2. Окно программы «Чтение и просмотр сигналов». Страница «Исходное»

Программа содержит типовые элементы для интерфейса программ, как-то основное меню программы и панель инструментов, куда вынесены наиболее часто используемые команды, а также несколько страниц с элементами отображения



данных и управления. Каждая страница предназначена для решения конкретного этапа в процессе обработки сигнала.

Страница «Исходное» предназначена для выбора требуемого файла данных и его чтения. Пользователь, используя типовое окно открытия файла,

может указать программе необходимый файл. При этом программа отображает имя выбранного файла, количество отсчетов в этом файле и длительность этого сигнала по времени. После дополнительной проверки правильности выбранного файла выполняется загрузка указанного файла и производится отображение данных в исходных отсчетах (в том виде, как они записаны).

После загрузки и отображения всей длительности данных из файла пользователю предоставляется возможность просмотреть в увеличенном виде любой фрагмент сигнала.

Для детального исследования загруженных данных интерфейс программы предоставляет возможность пользователю выделить требуемый интервал с точностью до секунды или даже с точностью до отдельного отсчета. Помимо этого, для выделенного фрагмента пользователь может указать постоянную величину, которую необходимо вычесть из значений отсчетов данного фрагмента (вычесть тренд). А также пользователь может задать коэффициент масштабирования, для приведения имеющихся данных в отсчетах к размерности реальных данных.

По кнопке <Преобразовать> программа выделяет указанный фрагмент, вычитает тренд и масштабирует каждый отсчет, отображает полученный сигнал на странице 'Вырезанный фрагмент' и автоматически переходит на указанную страницу.

Страница 'Вырезанный фрагмент' имеет вид, как на рис. 3. Эта страница содержит окно для отображения выделенного фрагмента сигнала в реальном масштабе, окно для отображения АЧХ выделенного фрагмента, а также кнопки для выполнения дискретного преобразования Фурье для этого фрагмента сигнала и АЧХ пользователь может выполнять масштабирование и просматривать сигнал детально [2].

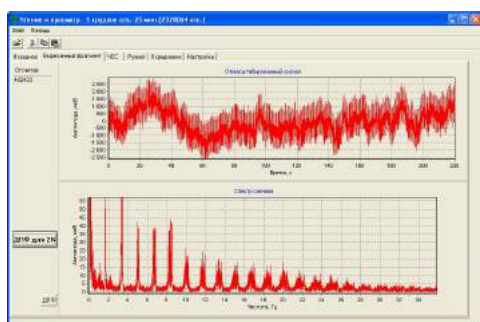


Рис. 3. Страница 'Вырезанный фрагмент' программы

Для выполнения процедуры ДПФ была разработана специальная подпрограмма. Классическая процедура выполнения ДПФ работает очень медленно, а процедура БПФ требует, чтобы массив имел исключительно длительности  $n = 2^N$ . Разработанная процедура позволяет выполнять ДПФ над массивами данных длины  $n = 2N$ . То есть может быть рассчитан для любого массива четной

длины. Но эффективность алгоритма возрастает, если длина массива может быть выражена числом  $n = k \cdot a$ , при этом  $a = 2^A$ , и  $A$  достаточно велико. Для контроля работы процедуры на коротких последовательностях используется классическая подпрограмма ДПФ [1].

Страница 'ЧСС' предназначена для вычисления частоты сердечных сокращений на выделенном фрагменте сигнала. Результаты вычислений сердечных сокращений могут отображаться в виде графика частоты (пульса, ударов в минуту), или в виде длительности между ударами (в секундах). Страница содержит окна для отображения исходного сигнала в реальном масштабе и отображения построенного графика ЧСС. Помимо этого страница содержит окна настройки процесса выделения реперных точек ( $R$  отсчетов) на текущем фрагменте кардиосигнала, и кнопки для инициализации процесса. Вид страницы 'ЧСС' приведен на рис. 4.

Разработанный алгоритм является адаптивным. Перед стартом программы пользователь указывает пробный интервал, соответствующий единственному сокращению сердца, в начале фрагмента. В ходе работы алгоритм определяет текущую длину интервала между сердечными сокращениями и увеличивает или сокращает длину тестового интервала для поиска очередного пика ( $R$  отсчета) в кардиосигнале.

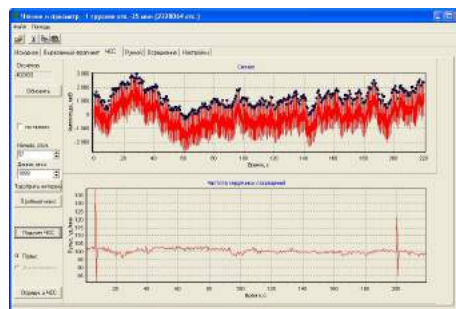


Рис. 4. Страница 'ЧСС' программы

К сожалению, форма исходных кардиосигналов, не прошедших предварительной обработки, например фильтрования паразитных составляющих, имеет сложную форму. К тому же при наличии тех или иных патологий форма сигнала искажается (что в дальнейшем и позволяет выявлять патологию по его форме). Все это приводит к ошибкам в результатах работы этой процедуры.

Для повышения устойчивости работы алгоритма выделения реперной точки был разработан алгоритм с предварительной обработкой сигнала. На странице 'ЧСС' можно инициировать процедуру подсчета ЧСС с предварительным осреднением сигнала. Для просмотра промежуточных результатов работы алгоритма с осреднением можно обратиться к странице 'Осреднение'. Вид этой страницы приведен на рис. 5.



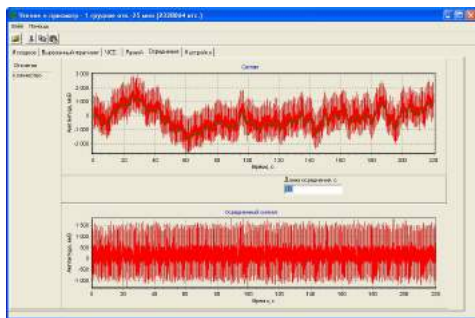


Рис. 5. Страница 'Осреднение' программы

На странице 'Осреднение' можно указать длину интервала осреднения, а после выполнения процесса осреднения и вычисления ЧСС в деталях просмотреть, какая линия осреднения была сформирована процедурой и как стал выглядеть сигнал после вычитания этой средней линии. Полученные реперные точки и график ЧСС отображается на странице 'ЧСС'.

Страница 'Ручной' позволяет производить исследование индивидуально для зарегистрированных сигналов. На этой странице пользователь может расставить маркеры на важные реперные точки  $P$ ,  $Q$ ,  $R$ ,  $S$ ,  $T$  и др. и выполнить расчет их параметров, в частности, расстояние между этими точками и разность значений в этих точках.

Страница 'Настройки' позволяет выполнять настройки параметров при проведении процедуры ЧСС и печати.

Программа 'Просмотр длинных записей' предназначена для чтения зарегистрированных сигналов по частям. Программа предназначена для чтения и обработки достаточно коротких фрагментов из длинного файла, но не более 30 мин. Она содержит несколько страниц для организации последовательной обработки и исследования сигнала:

- Исходное;
- Вырезанный фрагмент;
- Настройки.

На странице 'Исходное' пользователь может указать длину реализации, которую необходимо считывать, а также указать, с каким 'захлестом' считывать следующую/предыдущую порцию данных. То есть при чтении и визуализации второго фрагмента данных, считывание производится не строго со следующего отсчета, а так, чтобы малый конечный участок первой порции повторно визуализировался в окне отображения сигнала как начальные отсчеты. Аналогично чтение выполняется и при просмотре сигнала в обратном порядке. То есть при переходе к предыдущему фрагменту, конечные отсчеты являются повторным отображением начальных отсчетов ранее показанного фрагмента.

Аналогично программе 'Чтение и просмотр сигналов' по каждой порции прочитанного сигнала пользователь может провести анализ, в частности, посмотреть спектр.

Программа 'Энергия по интервалам' предназначена для чтения сигнала полученного посредством портативного устройства регистрации кардиосигнала. Программа предназначена для чтения и исследования энергетического спектра достаточно коротких фрагментов кардиосигнала (не более 30 мин). Она содержит несколько страниц:

- Исходное;
- Вырезанный фрагмент;
- Энергия по интервалам (Энерг. по интерв.);
- Настройки.

Страница 'Энерг. по интерв.' предназначена для получения распределения энергии по интервалам в частотной области. На этой странице пользователь может задать интервал частот, который необходимо исследовать. Также пользователь может указать, на какое количество подинтервалов необходимо разбить весь интервал. После подсчета энергии на нижнем графике отображается энергия сигнала на каждом из подинтервалов.

Измерения и запись показаний больного, например, кардиограммы, может продолжаться длительное время вплоть до суток. Файлы, хранящие такие данные, могут быть очень большими и не помещаться в оперативной памяти целиком. Поэтому необходимо уметь читать и анализировать данные из таких файлов по частям.

Программа 'Энергия по интервалам' позволяет выполнять фильтрацию по результатам вычисления энергии по интервалам. После построения и визуализации графика распределения энергии можно провести оценку распределения энергии по частотам и выполнить фильтрацию исходного сигнала на отдельных интервалах. Более того фильтрацию можно провести на группе соседних интервалов, а также по группе групп интервалов. То есть пользователь может указать базовый интервал (или группу), а так же шаг повторения и количество повторов. Так например, очень часто сигнал содержит мощную составляющую, вызванную техногенной помехой 50 Гц и кратные ей 150 Гц, 250 Гц и т.д. Тогда пользователь может сразу указать, что требуется отфильтровать сигнал на трех интервалах с шагом в 100 Гц, начиная с частоты 50 Гц.

Список литературы

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2003, 608 с.
2. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. Пер. с англ. – М.: Мир, 2001. – 604 с.

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ

*Лежнина И.А., Моженина Е.Е.*

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: inna84@sibmail.com

Применение компьютерных технологий для анализа (расшифровки) электрокардиограмм имеет почти полувековую историю. Первые коммерческие системы для автоматической расшифровки 12 общепринятых отведений электрокардиограммы появились в 50-х годах прошлого века. С этих пор автоматизация стандартного ЭКГ исследования стала наиболее массовой областью применения компьютерных технологий в медицине, что в немалой степени определяется астрономическим числом электрокардиограмм, ежедневно регистрируемых во всем мире [1].

Анализ сигналов не всегда является простой задачей для врача или специалиста в области биологической науки. Клинически важная информация в сигнале часто замаскирована шумами и наводками. Кроме того, как правило, параметры сигналов не могут быть непосредственно восприняты визуальной и звуковой системами человека - наблюдателя. Некоторые многократно повторяющиеся или требующие непрерывного внимания задачи, такие как текущий мониторинг контроль ЭКГ тяжелых кардиологических больных с нарушениями сердечного ритма, могут оказаться скучными и утомительными для человека-наблюдателя. Более того, в сигналах такого типа наблюдается изменчивость от одного пациента к другому. Кроме того, вариабельность, порождаемая субъективностью анализа различных врачей или аналитиков, делает надёжную и состоятельную оценку и понимание наблюдаемых феноменов затруднительной или даже невозможной задачей. Эти факторы определяют потребность не только в более совершенной аппаратуре, но также и в разработке методов для объективного анализа сигналов с использованием алгоритмов обработки, реализованных с помощью электронной аппаратуры или компьютеров [2].

Основные исследования при установлении диагноза больному по ЭКГ сводятся к измерению характерных временных интервалов, определению изолинии и измерению амплитуды зубцов ЭКГ.

Сердечный цикл ЭКГ обычно представляется в виде трех комплексов:

P-комплекс соответствует деполяризации предсердий, QRS- деполяризации желудочков, T- их реполяризации. Каждый комплекс состоит из нескольких разнонаправленных пиков (зубцов).

Наиболее трудоемкой задачей является распознавание характерных элементов ЭКГ и измерение параметров. Характерные элементы ЭКГ, которые необходимо распознать – это комплексы, сегменты (расстояние между зубцами) и интервалы. К параметрам ЭКГ, подлежащим измерению,

относятся высота зубцов и длительность комплексов, а также величина сегментов и интервалов. Таким образом, необходимо выполнять два типа измерений: временные и амплитудные.

Наиболее типичный метод распознавания элементов ЭКГ состоит из трех этапов [3]:

1. Распознавание пиков, т.е. выявление истинных пиков ЭКГ (не артефактов). Выявление пиков осуществляется в два этапа. На первом выявляются все пики – как истинные, так и связанные с шумами (ложные). На втором этапе выявляются ложные пики и исключаются из числа всех пиков, выявленных на предыдущей стадии.

2. Разграничение пиков, т.е. нахождение границ между истинными пиками. Один из методов разграничения пиков основан на критерии максимальной кривизны. Согласно этому критерию, пограничные точки пика – это точки максимальной кривизны.

3. Распознавание характерных элементов ЭКГ. Наиболее трудоемкой задачей является выявление комплексов. Другие элементы ЭКГ (сегменты между зубцами, интервалы сердечного цикла) определить после этого не составляет труда.

Результаты выявления элементов ЭКГ и измерения их параметров используются для интерпретации с целью постановки правильного диагноза. В настоящее время известны две основные категории алгоритмов, применяемых в различных системах автоматической диагностики. К первой категории относятся алгоритмы, моделирующие логику врача-диагноста.

Алгоритмы второй категории, как правило, основаны на методах многомерного статистического анализа и теории вероятностей. При этом отказываются не только от медицинской логики, но и от принятых в медицине обозначений элементов электрокардиограммы и способов измерения.

Названные категории алгоритмов имеют свои достоинства и недостатки. Безусловное достоинство медицинских алгоритмов - в возможности их быстрой реализации. Это определяется тем, что они концентрируют опыт диагностики, накопленный в медицине, и не требуют предварительных обучающих выборок. Предел диагностических возможностей таких алгоритмов ограничивается современным уровнем развития медицины, а качество конкретных алгоритмов - компетентностью лиц, их составляющих. Главным недостатком медицинских алгоритмов является то, что они ограничиваются лишь формализацией диагностической логики врача. Основное преимущество

компьютера перед человеком, неизмеримо большие вычислительные возможности, которые используются при этом лишь в самой малой мере. Поэтому при применении медицинских алгоритмов остается неиспользованной важная информация, например, о взаимных фазовых соотношениях электрокардиографических отведений, которую человек из электрокардиограммы извлечь не может.

Достоинством немедицинских диагностических алгоритмов является то, что они могут использовать любые параметры описания электрокардиограммы. Благодаря этому им оказываются доступны резервы информации, которые в клинической практике остаются неиспользованными. Недостатком этих алгоритмов является неудобность их обучения. Это представляет существенные трудности, так как связано с подбором хорошо исследованных больных с заболеваниями, различать которые должен научиться автомат. Тем не менее, алгоритмы второй категории считаются более перспективными, так как доступная им новая информация даст возможность сделать диагностику более эффективной.

В последнее время ведутся активные работы, как в России, так и за рубежом, по разработке более точных и быстрых алгоритмов классификации электрокардиограмм. Большая часть работ направлена на использование нейронных сетей. В них с помощью обучения нейронной сети соответствующими выборками (иногда с предварительной обработкой) добиваются устойчивого распознавания типов ЭКГ и выявления нарушений. Широко используется спектральный анализ электрокардиограмм с последующим табличным преобразованием для нахождения QRS-комплексов. Также другие работы используют частотно-временной анализ для выявления QRS-комплексов, а также дополнительной информации об относительном смещении QRS-комплексов в отведениях. В ряде работ используется модель Маркова для сегментации электрокардиограмм. Иногда делаются попытки построения алгоритмов, реализующих искусственный интеллект, для задач распознавания ЭКГ-аритмий [4].

Ошибки при автоматическом измерении сдвигов ST неизбежны. Они бывают нескольких родов.

1. Ошибки связанные с плохим качеством записи.

Эти ошибки происходят как при автоматическом анализе компьютером, так и при визуальном анализе ЭКГ врачом.

2. Ошибки компьютера, связанные с методикой анализа сегмента ST.

При изменении формы желудочкового комплекса скачкообразно меняется точка отсчета начала ST. Неустойчивое определение точки j при

меняющейся форме ST чаще всего бывает связано с изменением ЧСС.

3. Ошибка, связанная с привязкой точки j к вершине зубца R.

При динамическом изменении формы желудочкового комплекса, например, из комплекса с высоким зубцом R в комплекс с малым r или QS, нахождение точки j становится невозможным, так как ее привязка осуществляется по вершине максимально положительного или по вершине максимально отрицательного зубца желудочкового комплекса.

4. Ошибки измерения изолинии

За изолинию принято брать отрезок T-P. При тахикардии зубец T часто «наезжает» на зубец P, точка отсчета, оказывается на зубце P, либо эта точка наезжает на последующий комплекс QRS на волну Q или R, что делает невозможным правильно сориентироваться относительно уровня отсчета начальной изоэлектрической точки.

Сложность анализа всегда создают артефакты, «наводка» и «дрейф» изолинии при естественных движениях пациента. При этом снижение качества записи выявляется при наибольшей физической активности больного, т.е. как раз в то время, когда наиболее вероятна регистрация ишемических эпизодов.

Таким образом, в заключении можно отметить, что проблема разработки алгоритмов распознавания элементов классификации электрокардиограмм по прежнему актуальна в связи с необходимостью постановки точного и быстрого диагноза. Следовательно, необходима разработка и проектирование электрокардиографов с повышенной разрешающей способностью.

#### Литература

1. Обзор рынка электрокардиографов в России по состоянию на 2007г. SYNOPSIS-маркетинг для медицины. -М., 2007. [Электронный ресурс]. [URL: http://marketing.rbc.ru/rev\\_short/31555053.shtml](http://marketing.rbc.ru/rev_short/31555053.shtml) (дата обращения: 14.03.2010)
2. Шкарин В.В. Прогресс и проблемы современного этапа компьютерного анализа электрокардиограмм// «КАРДИОЛОГИЯ». [Электронный ресурс]. [URL: http://www.diamant.spb.ru](http://www.diamant.spb.ru) (дата обращения: 14.03.2010).
3. Исаков Р.В., Сушкова Л.Т., Лукьянова Ю.А. Обработка электрокардиосигналов с использованием нейронных сетей. информационный портал по вопросам биомедицинской инженерии. [Электронный ресурс]. [URL: http://ilab.xmedtest.net/?q=node/40](http://ilab.xmedtest.net/?q=node/40) (дата обращения: 18.07.2010).
4. Орлов Ю.Н. Методы и технические средства для электрокардиографии: Учеб. Пособие.— М: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997. —16 с.



## МОДЕЛЬ РАБОТЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С СИСТЕМОЙ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ

*Китаева М.В., Юрченко А.В., Охорзина А.В., Скороходов А.В.*

Научный руководитель: Юрченко А.В., д.т.н.

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,

634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30

E-mail: [Kitaevam@tpu.ru](mailto:Kitaevam@tpu.ru)

Актуальность представленной тематики обусловлена высокими темпами развития солнечной энергетики и расширением географии использования фотоэлектрических модулей (ФМ).

В Томской области имеются довольно широкие возможности применения солнечных установок для индивидуальных потребителей, особенно в сельской местности. Расширение масштабов применения солнечных энергетических установок (СЭУ) не только даст значительную экономию энергоресурсов и повышение уровня жизни, но и позволит смягчить экологическую ситуацию.

Результаты климатических испытаний солнечной батареи (ФМ) в Томске, проведенные с 1996г. по 1997г. [2], показали надежность и эффективность их использования в условиях Томской области. За исследуемый период на квадратный метр земной поверхности в районе Томска пришлось в среднем 4,5 кВт·ч солнечного излучения в день или 1643 кВт·ч/м<sup>2</sup> за год.

Одной из основных проблем использования ФМ является высокая стоимость производимой электроэнергии. Наиболее эффективным способом снижения ее стоимости является применение систем ориентирования на Солнце.

На основе 12летнего анализа работы ФМ в Сибири и Дальнего Востока проведены расчеты приходящей солнечной радиации и модель работы ФМ с применением различных способов слежения. На их основе определена эффективность применения систем слежения для солнечных энергоустановок для Томска и других городов России. Для этого сначала определили количество солнечной радиации, поступающей в течении дня.

Поток прямой солнечной радиации  $S_{rp}$  на поверхность, расположенную под углом  $\theta$  к этому потоку равен:

$$S_{rp} = S_{r_{\max}} \cdot K_{am} \cdot \cos \beta$$

$S_{r_{\max}}$  - солнечная константа-количество тепла, которое поступает от Солнца на Землю через космос. Эта величина равна 1325Вт/м<sup>2</sup>. При расчетах нужно учитывать, что 30-35% этой энергии отбивается назад в космос. Возьмем  $S_r=925\text{Вт/м}^2$ .

Кат - коэффициент поправки на воздушную массу, которую необходимо пройти лучу.

$\beta$  - приведенный угол падения солнечных лучей на поверхность инсоляции

$$\cos \beta = \sinh_c \cos \alpha + \cosh_c \sin \alpha$$

$\alpha$  - угол наклона плоскости ФМ к горизонту

$h_c$  - угол, который определяет высоту Солнца над горизонтом в данный момент времени.

Расчеты показали, что применение однокоординатного слежения позволит увеличить эффективность отбора мощности на 30%, а двухкоординатного на 40% для Западной Сибири России. Построена модель работы энергосистемы с использованием системы ориентирования в Томске в течение года. Результаты эффективности применения системы ориентирования приведены на рисунке 1.

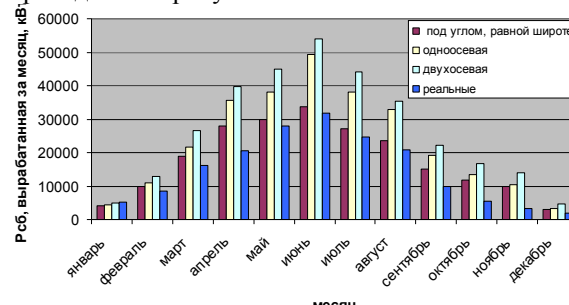


Рисунок 1. Эффективность применения систем слежения в Томске.

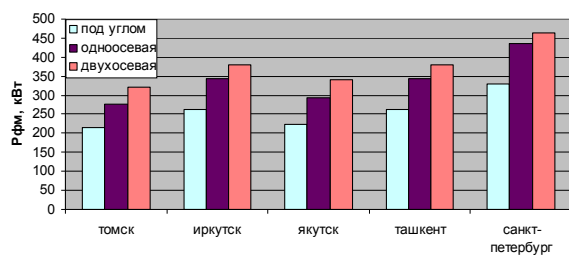


Рисунок 2. Эффективность применения систем слежения в разных городах

На основе проведенного анализа датчиков систем ориентирования, разработан и апробирован макет датчика, в котором температурное влияние и влияние фонового излучения минимальны.

На сегодняшний день разработаны принципиальная схема блока контроллера, его печатная плата с возможностью питания от ФМ, создан алгоритм работы программы МК.

Работоспособность системы слежения подтверждена практически: создан экспериментальный макет системы (рисунок 3).

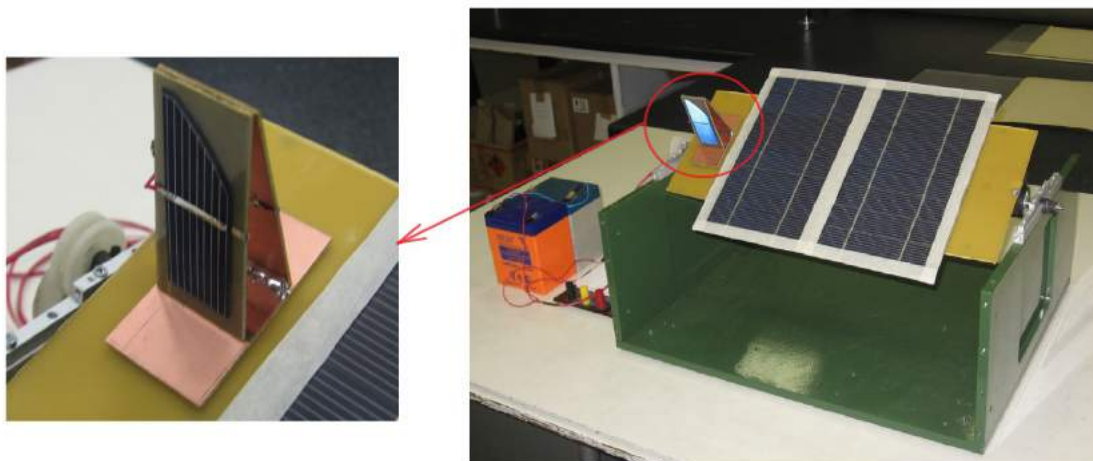


Рисунок 3. Макет разработанной системы слежения за Солнцем

Были проведены натурные испытания одноосевой системы и двухосевой. Для последней слежение по одной оси (эклиптике) было автоматическое, а по второй (склонение солнца) угол выставлялся вручную каждый час. Результаты работы сравнены с ФМ, установленной стационарно. Графики приведены на рисунках 4 и 5. Применение одноосной системы увеличили сбор мощности на 23%, а двухосной на 32%, относительно установленной под углом стационарно.

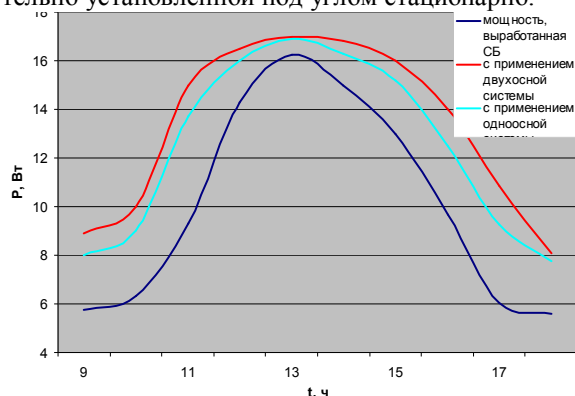


Рисунок 4. Результаты работы систем слежения

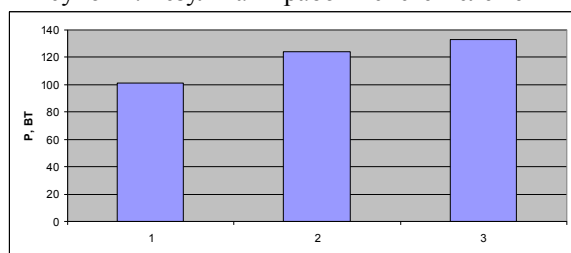


Рисунок 5. Суммарная мощность за день, собранная без системы слежения, с одноосной и двухосной.

### Выводы по работе.

1. Проведены расчеты эффективности применения системы слежения для солнечной энергоустановки для городов России, показавшие, что применение одноосной системы позволит увеличить отбор мощности на 30%, а двухосной – на 40% для Томской области.
2. Разработан фотоэлектрический датчик на основе кремниевых фотоэлектрических элементов, позволяющий исключить влияние фонового излучения и обеспечить запуск системы утром.
3. Создан экспериментальный образец разработанной системы, доказавший работоспособность разработанной системы;
4. Проведены натурные испытания разработанной системы слежения, показавшие, что применения одноосной системы позволят увеличить отбор мощности на 23%, а двухосной на 32%.

### Список литературы

1. Юрченко А.В., Саврасов Ф.В., Юрченко В.И. Реальная стоимость энергии - от ресурсов до потребителя //Известия Томского политехнического университета, 2009 - т. 314, - № 3. - с. 43-46
2. Юрченко А.В., Волгин А.В., Козлов А.В. Статическая модель кремниевых солнечных батарей, работающих под воздействием природных и аппаратных факторов //Известия Томского политехнического университета, 2009 - т. 314, - № 4. - с. 142-148.

## ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ИЗМЕРЕНИЯ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

Шкляр Е.И., Миляев Д.В.

Научный руководитель: Миляев Д.В., доцент  
 Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
 634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
 E-mail: [destroy@mail2000.ru](mailto:destroy@mail2000.ru)

В мире медицины существует огромное количество различных приборов и средств измерения для выяснения болезней сердца и сердечнососудистых заболеваний. Одной из самых острых проблем, стоящей перед врачами, является выбор универсального точного устройства, которое верно, а самое главное быстро выявит болезнь пациента на ранних стадиях заболевания. Традиционно принятые при обследовании пациентов разовые измерения артериального давления (АД) не всегда отражают истинные его величины, не дают представления о суточной динамике, поэтому затрудняется диагностика артериальной гипертензии, подбор антигипертензивных препаратов, оценка их эффективности (особенно при однократном применении) и адекватность лечения.

У довольно значительного числа больных при визите к врачу, а зачастую и в клинической практике, при однократных измерениях обнаруживаются высокие цифры АД, иногда на 20-40 мм рт.ст. выше, чем при измерении дома. Иногда это ошибочно трактуется как гипертензия, но чаще - как "эффект белого халата". Амбулаторное суточное мониторирование АД (СМАД) в условиях обычной жизнедеятельности человека помогает исключить этот эффект, улучшить качество диагностики и правильно определить необходимость и тактику лечения. На данный момент все центральные больницы и частные клиники используют приборы, основанные на манжетном методе, что не очень удобно пациенту, манжета постоянно надувается и стягивает руку, частое применение таких приборов приводит к онемению капиллярных сосудов, поэтому учеными предлагаются новые методы измерения АД без использования манжеты.

Тонометр на основе пьезоэлектрического преобразователя сможет решить сложившуюся ситуацию в медицине. Пьезоэлектрический преобразователь основан на прямом пьезоэффекте. Пьезоэффект — возникновение электрического поля от механической деформации на поверхности некоторых кристаллических материалов. Пьезоэлектрический эффект (сокращенно пьезоэффект) наблюдается в анизотропных диэлектриках, преимущественно в кристаллах некоторых веществ, обладающих определенной, достаточно низкой симметрией. Пьезоэффектом могут обладать кристаллы, не имеющие центра симметрии, а имеющие так называемые полярные направления (оси).

Суть метода заключается в измерение напряжения, которое возникает в преобразователе после

прохождения пульсовой волны, определенной силы. Зависимость напряжения от давления человека состоит в коэффициенте, который необходимо вычислить математическим способом.

Рассмотрим зависимость напряжения от перемещения преобразователя:

$$E = K \cdot \Delta x, \text{ где}$$

$E$  – напряжения на выходе преобразователя

$K$  – общий коэффициент преобразования

$\Delta x$  - перемещение преобразователя

Закон Гука:

$$F = k \cdot \Delta x$$

$$\Delta x = \frac{F}{k}$$

Связь силы и давления:

$$F = S \cdot P, \text{ где}$$

$S$  – площадь соприкосновения головки преобразователя с телом человека

$P$  – давление

Вычисление системы уравнений:

$$\begin{cases} F = k \cdot \Delta x \\ F = S \cdot P \end{cases} \Leftrightarrow S \cdot P = k \cdot \Delta x$$

$$P = \frac{k}{S} \cdot \Delta x$$

,где  $K = \frac{k}{S}$  - общий коэффициент преобразования.

### Конструкция первичного преобразователя:

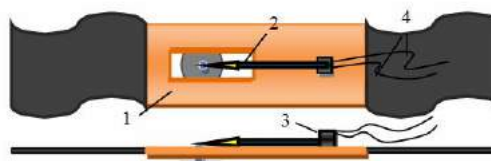


Рисунок 1

1 – пластина; 2 – преобразователь; 3 – крепление; 4 – выводы.

### Структурная схема экспериментального макета:

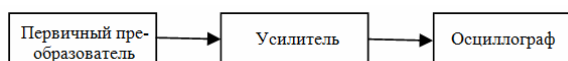


Рисунок 2

### Функциональная схема экспериментального макета:

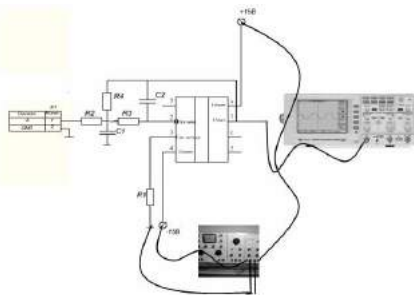


Рисунок 3

С помощью данного экспериментального макета неоднократно проводились испытания первичного преобразователя на определения необходимых параметров, таких как АЧХ, ФЧХ, сигнал/шум и стабильность работы в комплексе с другим оборудованием. В ходе эксперимента получили информацию о рабочей частоте и о возможности применения пьезоэлектрического преобразователя в целях измерения артериального давления. На рисунке 4 представлен график эксперимента.

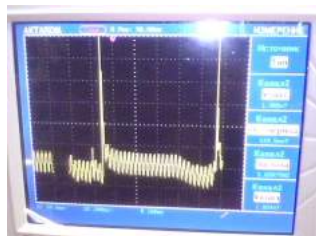


Рисунок 4

Эксперименты подтвердили то предположение, что на представление информации влияют другие приборы, участвующие в опытах. Чтобы устранить эту неточность включим в эксперимент еще одно связующее звено - фильтр низких частот второго порядка (ФНЧ) на 30Гц.

Расчитав и подобрав необходимые элементы для ФНЧ, проведем его испытания, построив АЧХ:

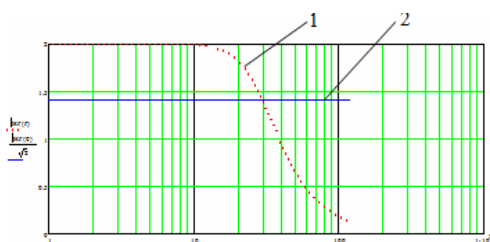


Рисунок 5

где 1- АЧХ ФНЧ

$$2- \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot U$$

$$f_{cp} = 20 \text{ Гц}$$

С применением ФНЧ стало возможным подавлять высокую частоту, которая скрывала несущую информацию о работе пьезоэлектрического преобразователя, поэтому стало доступным исследование наиболее специфических возможностей звукоснимателя (первичного преобразователя).

Труднее всего оценивается степень мешающего воздействия нелинейных искажений. По своему происхождению эти искажения можно разделить на две группы. К одной из них относятся искажения, возникающие из-за нелинейности преобразования. Эти искажения вызывают амплитудную модуляцию, поэтому относительно колебаний с основной частотой как на несущей возникают частоты боковых полос (комбинационные звуки). Они представляют собой относительно небольшую помеху, потому что ее значение не зависит от частоты и у современных головок звукоснимателей пренебрежимо мало.

Ко второй группе относятся искажения огибающей, возникающие вследствие геометрических различий между резцом рекордера при записи и иглой звукоснимателя (пьезоэлектрического преобразователя) при воспроизведении. Кроме гармонических составляющих, они вызывают фазовую модуляцию. Эти искажения увеличиваются пропорционально частоте, поэтому их мешающее действие чрезвычайно велико и они считаются определяющими искажениями головки звукоснимателя. Все эти мешающие факторы определяют достоверность работы преобразователя и надежность получаемой информации об артериальном давлении.

Одним из самых главных параметров, на которые следует обращать внимание, является прижимная сила звукоснимателя, которая не должна превышать 30 мН. Заданные в паспорте звукоснимателя минимальное и максимальное значения прижимной силы нельзя уменьшать или превышать. По возможности целесообразно установить рекомендуемое значение, так как прижимная сила влияет на вертикальный угол воспроизведения. Только при заданной изготовителем прижимной силе он будет равен 15°. Для звукоснимателей, имеющих укороченный иглодержатель, более благоприятным является больший вертикальный угол. По итогам экспериментов вертикальный угол воспроизведения у данного преобразователя составляет 25°.

Проведя ряд экспериментов пьезоэлектрического преобразователя, можно сделать вывод, что звукосниматели способны фиксировать артериальное давление, т.к. могут работать на низких частотах и имеют необходимую АЧХ для измерения систолического и диастолического давления, поэтому могут применяться в цифровых манометрах, работающих в режиме реального времени, фиксируя до 100000 измерений в день.

#### Список литературы:

1. Селиванов Е. П., Блинов А. В. Измерительная техника. – 1995, с.64.
2. Жуковский В. Д. Медицинские электронные системы. М.: Медицина. 1976, с. 312.
3. Блинов А. В., Селиванов Е. П. // Измерительная техника. 1995.



## ОПТИМИЗАЦИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ

*Охорзина А. В., Китаева М. В., Суматохина К. В., Юрченко А. В.*

Научный руководитель Юрченко А. В, д.т.н, профессор  
 Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
 634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
 E-mail: [ameba\\_89@mail.ru](mailto:ameba_89@mail.ru)

В современном мире уделяется большое внимание использованию возобновляемых источников энергии. Одним из таких источников является солнечная энергия, которая характеризуется максимальной простотой использования, наибольшими ресурсами, экологической чистотой и повсеместным распространением.

Основным недостатком солнечной энергетики является высокая стоимость энергетических систем на его основе[1].

Снижение стоимости производства электроэнергии такими системами возможно за счет снижения стоимости фотоэлектрических моделей (ФМ) или повышения КПД.

Достаточно простым способом удешевления солнечных систем является повышение ее КПД с помощью системы слежения за солнцем. Такая система позволяет значительно увеличить эффективность и обеспечивает более равномерное генерирование электричества с восхода до захода солнца.

Для повышения КПД солнечных систем был разработан фотоэлектрический датчик (ФЭД), который использует принцип активных систем слежения за солнцем[2].



Рис 1. Макет фотоэлектрического датчика наведения на Солнце.

В качестве фоточувствительных элементов выбран кремниевый фотоэлектрический преобразователь (ФЭП), это обусловлено сферой использования данного датчика – слежение за Солнцем для кремниевых ФМ, поэтому датчик получил название фотоэлектрический датчик (ФЭД)

В основе датчика: два лицевых элемента для определения положения Солнца, третий тыловой элемент (С) – для исключения влияния рассеянного излучения. Элементы А и В установлены на

разные стороны перегородки, что позволяет компенсировать влияние разности температур. Также перегородка служит токопроводящим элементом.

Для анализа чувствительности ФЭД были построены диаграммы направленности (рис 2) для ФМ и для двух ФЭП (элементы А и В ФЭД), наглядно демонстрирующие, что для получения максимального тока короткого замыкания, а, следовательно, и мощности ФМ, необходимо расположить датчик таким образом, чтобы сигналы с элементов А и В были равны и минимальны. Также видно, что наибольшее изменение тока элементов датчика лежит в диапазоне изменения угла падения солнечных лучей к нормали плоскости ФМ от 0° до 30°, т.е. на в этом периоде чувствительность датчика максимальна. Следовательно, этот период и будет порогом срабатывания датчика.

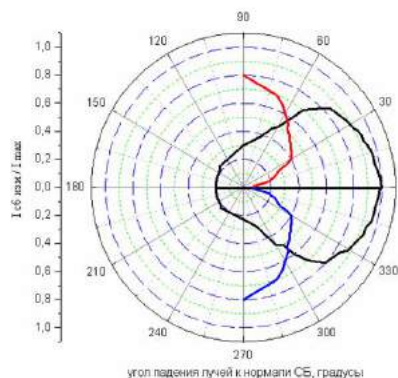


Рис 2. Диаграммы направленности для ФМ и датчиков А, В.

Структурная схема системы ориентирования на Солнце представлена на рис.3



Рис 3. Структурная схема системы ориентирования на Солнце

В данной системе сигналы поступающие от элементов А и В уменьшаются на уровень сигнала с элемента С в устройстве сравнения и выработки управляющего сигнала, результаты сравниваются и вырабатывается управляющий сигнал для двигателя (положительный или отрицательный) для наведения ФМ.

На базе солнечного энергетического комплекса мощностью 240 Вт, размещенного на крыше 10 корпуса ТПУ, был апробирован макетный образец системы слежения за Солнцем на основе фотоэлектрического датчика.

На основе данных полученных в ходе макетного эксперимента были построены диаграммы направленности элементов А и В при различных углах между А и В. Для повышения чувствительности провели оптимизацию углах между элементами А и В датчика.

Для этого провели измерение сигнала с датчика при различных фиксированных углах между А и В в течение дня. Измерения проводились в ясную погоду.

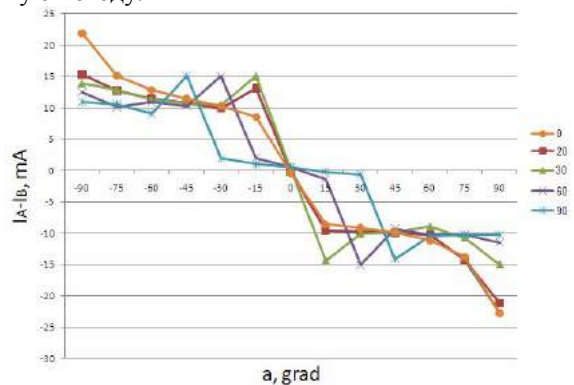


Рис 4. Зависимость разностного сигнала с элементов А и В при фиксированном угле между ними в течение дня.

При анализе полученных результатов было учтено, что максимальный сбор мощности лежит в диапазоне изменения угла падения солнечных лучей к нормали плоскости ФМ от  $0^\circ$  до  $30^\circ$ , таким образом оптимальный угол между элементами А и В необходимо выбирать ориентируясь на макси-

мальную чувствительность в этом диапазоне. Поэтому оптимизацию датчика по чувствительности производили на отклонении солнечных лучей от нормали равном  $15^\circ$ , так как при меньших углах сбор мощности практически не изменяется.

По графику на рис. 5 видно, что наибольшая чувствительность датчика при угле между А и В равном  $20^\circ$ .

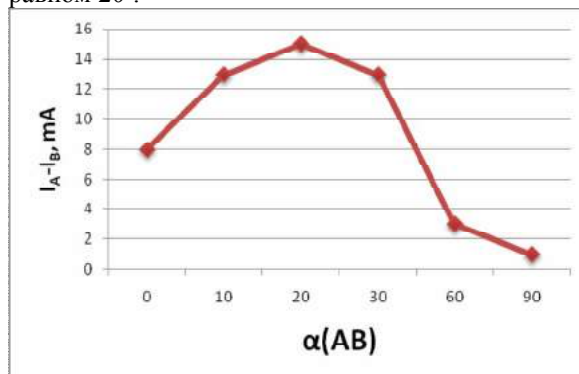


Рис 5. Зависимость разностного сигнала между датчиками А и В от угла между ними.

Выводы:

1. Была разработана конструкция и создан макетный образец ФЭД.
2. Была проведена оптимизация ФЭД по чувствительности для энергетического комплекса мощностью 240 Вт.

#### Список литературы:

1. Юрченко А.В., Саврасов Ф.В., Юрченко В.И. Реальная стоимость энергии - от ресурсов до потребителя //Известия Томского политехнического университета, 2009 - т. 314, - № 3. - с. 43-46
2. Юрченко А.В., Волгин А.В., Козлов А.В. Статическая модель кремниевых солнечных батарей, работающих под воздействием природных и аппаратных факторов //Известия Томского политехнического университета, 2009 - т. 314, - № 4. - с. 142-148

## ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННОГО РЫНКА АНАЛИЗАТОРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

*Мирзаханов Р.Р.*

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: Sornyak1988@mail.ru

Развитию электроэнергетики России сегодня придается государственное значение. Важной составной частью развития электроэнергетики являются энергосберегающие технологии, в том числе уменьшение потерь электроэнергии при передаче, уменьшение потерь при эксплуатации электроустановок, уменьшение аварийности и сбоев автоматики и другие мероприятия.

Согласно новым требованиям ГОСТ 1310997 (введен в действие с 1999 года) регламентируются параметры электроэнергии при заключении договора между производителем электроэнергии и потребителем. Основные параметры качества электроэнергии: отклонения и колебания напряжения, несинусоидальность напряжения, несимметрия трехфазной системы, отклонения частоты, провал напряжения, кратковременная и длительная дозы фликера.

Ненормативные отклонения и колебания частоты сети и напряжения могут привести к сбоям в работе автоматики, оборудования, увеличению потерь в сетях, преждевременному износу оборудования, браку в производстве, профессиональным заболеваниям и повышенной утомляемости работников предприятий.

Ведущие компании, давно и профессионально проектирующие и выпускающие электроизмерительную аппаратуру, уже освоили производство анализаторов и регистраторов параметров качества электроэнергии. На основе требований ГОСТа по параметрам качества электроэнергии и типам измерителей — регистраторов, была составлена Таблица № 1.

Дополнительные параметры, не предусмотренные ГОСТом, приведены в Таблице № 2: масса, габариты прибора, питание, возможность передачи данных в компьютер и автономной работы и их ориентировочная стоимость.

Анализ представленных параметров и возможностей приборов предлагается провести по следующим критериям:

**1. Широта спектра измерений параметров качества электроэнергии.** Это возможность ох-

ватить максимальный спектр параметров качества. В Таблице № 1, что все параметры качества электроэнергии охватывают, например, прибор «РесурсUF2». Однако потребителю данной продукции нужно понимать, что за универсальность приходится платить увеличением массы прибора, его габаритов, цены и отсутствием автономного питания (Таблица № 2).

**2. Возможность работать в автономном режиме** регистратора параметров и событий, а также передавать информацию на компьютер имеют практически все представленные здесь приборы.

Наличие или отсутствие автономного питания прибора и программное обеспечение производителя. Все приборы, которые питаются от измеряемой сети (от сети), в случае сильного провала либо отключения напряжения неизбежно теряют информацию, и некоторое время не могут производить измерения.

**3. Внешний вид, удобство в эксплуатации, цена, масса, габариты.** Из Таблицы №2 видно, что приборы можно подразделить на две группы — стационарные и универсальные. Стационарные приборы имеют сетевое питание, значительную массу и габариты, необходимость специальной подготовки персонала к эксплуатации данного прибора («Ресурс», «ЭРИС»). Универсальные приборы («REN700 SONEL») имеют автономное питание, просты и удобны в эксплуатации, не требуют специальной подготовки персонала. Масса, габариты и цена, соответственно, также невелики.

Большинство приборов из Таблицы № 1 измеряют и регистрируют отклонения напряжения, частоту, отклонение частоты. Потребитель имеет возможность выбора необходимого ему прибора, учитывая данные, приведенные в Таблице № 2. Если же речь идет об измерении дозы фликера, то среди всех исследуемых приборов только два — «REN700» и «РесурсUF2».

Таблица 1

Тип прибора	Ресурс-UF	Ресурс-UF2	REN-700	ЭРИС-КЭ-01	ПАРМА РК 6.05М	ПКК-57	АКЭ-823	МЭТ-5080
Параметр								
Отклонение напряжения $\Delta U_u$ (%)	+	+	+	+	+	+	+	+
Колебание напряжения $\Delta U_t$ (%)	-	+	+	+	+	+	+	+
Кратковременная доза фликера $P_{st}$	-	+	+	-	-	-	+	-
Длительная доза фликера $P_{lt}$	-	+	+	-	-	-	+	-
Коэфф. искажения синусоидальности напряжения $K_u$ (n) (%)	+	+	-	+	+	+	-	+
Коэфф. n-ой гармонической составляющей напряжения $K_u$ (n) (%)	-	+	-	+	+	+	-	+
Коэфф. несимметрии напряжения по обратной последовательности $K_{2u}$ (%)	+	+	-	+	+	+	+	+
Коэфф. несимметрии напряжения по нулевой последовательности $K_{0u}$ (%)	+	+	-	+	+	+	+	+
Отклонение частоты $\Delta f$ (Гц)	+	+	+	+	+	+	+	+
Длительность провала напряжения $\Delta t_n$ (С)	+	+	+	+	+	+	+	+
Импульсное напряжение $U_{имп}$ (кВ)	+	+	-	-	-	-	+	+
Глубина провала напряжения $U_p$ (В)	+	+	+	-	+	-	+	+
Длительность временного перенапряжения $\Delta t_{пер}$ (с)	+	+	-	+	+	+	+	+

Таблица 2

Тип прибора	Ресурс-UF	Ресурс-UF2	REN-700	ЭРИС-КЭ-01	ПАРМА РК 6.05М	ПКК-57	АКЭ-823	МЭТ-5080
Параметр								
Питание	Сеть 220 В, 20 ВА, 50 Гц	Сеть 220 В, 20 ВА, 50 Гц	2 элемента (1,5В)	Измеряемая сеть	Переменный ток напряжением 154-330 В, 45-52 Гц.	1,5 В × 6 (тип АА)	Сеть 220 В 5 ВА, 50Гц	1,5 В × 6 (тип АА)
Автономная регистрация (суток)	+	+	Не менее семи	+	+	+	семь	семь
Передача данных на компьютер	+	+	+	+	+	+	+	+
Масса (кг)	3	3	0,4	1,5	1,7	1,7	1	1,7
Ориентировочная цена, тыс. руб. (вкл. НДС)	86,4	126,8	32	140	60	146	250	72

Большинство приборов из Таблицы № 1 измеряют и регистрируют отклонения напряжения, частоту, отклонение частоты. Потребитель имеет возможность выбора необходимого ему прибора, учитывая данные, приведенные в Таблице № 2. Если же речь идет об измерении дозы фликера, то среди всех исследуемых приборов только два — «REN700» и «РесурсUF2».

Из рассмотренных приборов наиболее оптимальным выбором является Анализатор **Парма РК 6.05М**. Наибольшее количество измеряемых параметров, низкая цена и легкие габариты дают ощутимые плюсы при выборе анализатора качества электроэнергии.

#### Список литературы и источников технической информации:

1. Статья «Общий метод расчета доз фликера напряжения» Э.Г. Куренный, Е.Н. Дмитриева, Н.В. Цыганкова, Л.В. Черникова. Донецкий государственный технический университет.
2. «Опыт контроля качества электрической энергии», В.Н. Белоусов, В.И. Энговатов, В.Н. Никифорова. Госэнергонадзор, ООО «Научный центр ЛИНВИТ».
3. «Надежное электроснабжение: практические аспекты качества и надежности» В.А. Шихин.
4. Официальные сайты компаний производителей приборов



# КОНТРОЛЬ СООСНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Якимов Е.В., Гольдштейн А.Е., Алимов Д.В., Вахрушев Д.В.

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,

634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30

E-mail: [shishkovka@mail.ru](mailto:shishkovka@mail.ru)

## Измерение несоосности

Качество и эффективность буровых работ, проводимых в различных производственных сферах, в большой мере зависят от качества используемого бурового оборудования и в том числе бурильных труб. Важное место в обширной номенклатуре бурильных труб занимают трубы бурильные стальные с приваренными замками (универсальные ТБСУ, облегченные ТБСО, тяжелой серии ТБСТ и другие). Конструктивно такие трубы состоят из трех элементов: тела трубы и двух замков – муфты и ниппеля, приваренных к телу трубы методом сварки трением.

Важной характеристикой сварных соединений бурильных труб в значительной мере определяющей трудоемкость и точность бурения, срок службы бурового оборудования является соосность приваренных замков и тела трубы. Различают параллельное и угловое отклонение от соосности (рис. 1). Согласно [1] параллельное отклонение от соосности не должно превышать 0,3 мм, а угловое отклонение – 0,1 мм на 100 мм.

В соответствии с [1] контроль соосности заключается в измерении при вращении трубы двумя индикаторами часового типа радиальных биений замковой части трубы относительно оси тела бурильной трубы в двух сечениях, первое из которых расположено вблизи сварного соединения, а второе – вблизи торца замковой части трубы. Параллельное  $a_1$ , мм и угловое  $a_2$ , мм/100мм отклонения от соосности определяются по формулам:

$$a_1 = \frac{\delta_1}{2}; \quad a_2 = \frac{(\delta_2 - \delta_1) \cdot 100}{2A}, \quad (1)$$

где  $\delta_1$  – биение в сечении 1, мм;  $\delta_2$  – биение в сечении 2, мм;  $A$  – расстояние между сечениями, мм.

Измеренные значения отклонений от соосности  $a_1$  и  $a_2$  сравниваются с их предельно допустимыми значениями.

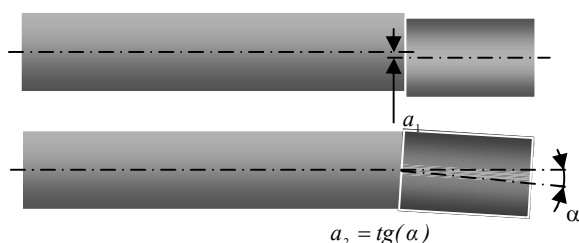


Рис. 1. Отклонение от соосности приваренных замков и тела трубы:  $a_1$  – параллельное отклонение от соосности,  $a_2$  – угловое отклонение от соосности

## Система контроля соосности с индикаторами часового типа

В известных реализациях описанного метода контроля как измерительные, так и вычислительные операции, а также протоколирование результатов контроля осуществляются непосредственно самим контролером-оператором, что определяет высокий уровень влияния субъективного фактора на результаты контроля, его трудоемкость и низкую производительность. В целях устранения указанных недостатков на кафедре информационно-измерительной техники Томского политехнического университета разработана система контроля соосности СКС 10.02 [2], являющаяся рабочим средством контроля соосности приваренных замков бурильных труб в процессе их производства в соответствии с [1], а также в процессе их эксплуатации. В производственных условиях система контроля устанавливается на линии изготовления бурильных труб на участках сварки трением, температурного отпуска сварного соединения, технического контроля готовой продукции.

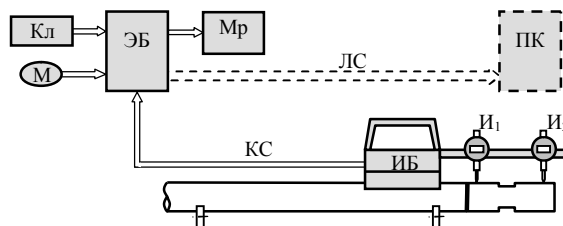


Рис. 2. Структурная схема системы контроля соосности СКС 10.02: ИБ – измерительный блок; И<sub>1</sub>, И<sub>2</sub> – индикаторы часового типа; ЭБ – электронный блок; Кл – клавиатура; М – мышь; Мр – монитор; КС – кабель связи; ЛС – локальная сеть; ПК – персональный компьютер диспетчера

Основными функциями системы контроля являются:

- измерение значений параллельного и углового отклонений от соосности сварного соединения;
- сравнение измеренных значений отклонений с предельно допустимыми;
- индикация результатов измерения и контроля;
- хранение результатов контроля и их передача на рабочее место диспетчера через информационную сеть цеха.

На индикаторную панель системы выводится следующая информация:

- номера контролируемой трубы и ее сварного соединения;
- порядковый номер измерения отклонений от соосности для данного сварного соединения (при многократных измерениях);
- дата и время измерения;
- наружный диаметр трубы, мм;

- значение базового расстояния, используемого при измерении угловой несоосности, мм
- предельно допустимое значение параллельного отклонения от соосности, мм;
- предельно допустимое значение углового отклонения от соосности, мм/100 мм;
- результат измерения значения параллельного отклонения от соосности сварного соединения, мм;
- результат измерения значения углового отклонения от соосности сварного соединения, мм/100 мм;
- результат контроля (годен/брак);
- преобразованные в аналоговую форму показания индикатора угловых отклонений от соосности (для определения азимута оси максимальных радиальных биений).

Все результаты контроля передаются через информационную сеть цеха на персональный компьютер рабочего места диспетчера, а, кроме того, результаты контроля сохраняются в памяти электронного блока.

Структурная схема системы контроля приведена на рис. 2. Система контроля содержит два основных блока: измерительный блок (ИБ) и электронный блок (ЭБ) с подключенными к нему периферийными устройствами – монитором (Мр), клавиатурой (Кл) и мышью (М). Измерительный и электронный блоки соединены между собой кабелем связи (КС).

Измерение отклонений от соосности осуществляется следующим образом. Цикл измерения запускается автоматически при установке измерительного блока на контролируемую бурильную трубу в месте стыка тела трубы и ее замковой части. В процессе измерения осуществляется вращение трубы на ножевых вращающихся опорах. Измерительный блок при вращении трубы удерживается на месте, но остается в постоянном контакте с поверхностью тела трубы через опорные подшипники и с поверхностью замковой части трубы через измерительные стержни двух индикаторов часового типа  $I_1$  и  $I_2$ . Показание (выходной сигнал) индикатора  $x$  определяется в этом случае суммой начального показания  $x_0$  (до начала вращения трубы) и приращения  $\Delta x$ , обусловленного перемещением измерительного стержня индикатора вследствие возможной несоосности замковой части трубы относительно оси тела трубы:

$$x_1 = x_{01} + \Delta x_1; \quad x_2 = x_{02} + \Delta x_2, \quad (2)$$

где  $x_1$  и  $x_2$ ,  $x_{01}$  и  $x_{02}$ ,  $\Delta x_1$  и  $\Delta x_2$  – текущие, начальные показания и приращения показаний соответственно первого и второго индикаторов.

Для обеспечения максимальной достоверности результатов контроля сечение трубы, в котором производятся измерения первым индикатором, должно быть максимально приближено к плоскости сварного шва, а сечение трубы, в котором

производятся измерения вторым индикатором, максимально приближено к торцу замковой части трубы.

Выходные сигналы индикаторов  $x_1$  и  $x_2$  преобразуются контроллером измерительного блока в форму, пригодную для передачи по интерфейсу RS-232, и передаются через кабель связи КС на вход электронного блока ЭБ.

В электронном блоке, основой которого является персональный компьютер с периферийными устройствами, осуществляется запись массивов значений сигналов  $x_1$  и  $x_2$ , соответствующих различным углам поворота контролируемой трубы в диапазоне от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , и определение минимальных  $x_{1\min}$  и  $x_{2\min}$  и максимальных  $x_{1\max}$  и  $x_{2\max}$  значений сигналов из этих массивов.

Значения радиальных биений в первом и втором сечениях замковой части трубы  $\delta_1$  и  $\delta_2$  определяются следующим образом:

$$\delta_1 = x_{1\max} - x_{1\min}; \quad \delta_2 = x_{2\max} - x_{2\min} \quad (3)$$

Далее производится вычисление значений параллельного  $a_1$  и углового  $a_2$ , отклонений от соосности по формулам (1) и сравнение полученных значений с предельно допустимыми.

В процессе контроля вычисляются значения приращения показаний первого и второго индикаторов  $\Delta x_1$  и  $\Delta x_2$ , которые в реальном времени отображаются в аналоговой форме на индикаторной панели системы.

Результаты контроля заносятся в электронный протокол контроля, выводятся на индикаторную панель, а также передаются по локальной сети ЛС на персональный компьютер диспетчера.

Основными элементами конструкции измерительного блока (рис. 3) являются основание, устанавливаемое при проведении контроля на тело трубы, штанга с закрепленными на ней цифровыми индикаторами часового типа и корпус, в котором размещена плата микроконтроллера, осуществляющего преобразование выходных сигналов индикаторов для передачи по интерфейсу RS-232 в электронный блок. Для облегчения движения основания по телу трубы используются шарикоподшипники.

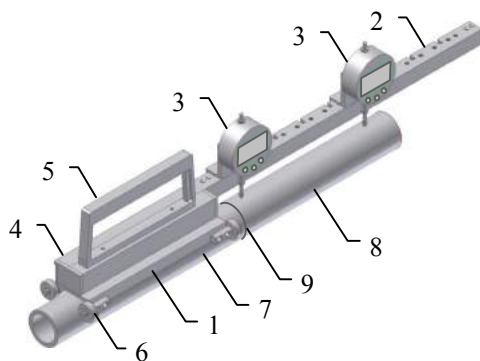


Рис. 3. Конструкция измерительного блока: 1 – основание; 2 – штанга; 3 – индикаторы; 4 – корпус; 5 – ручка; 6 – подшипники; 7 – тело трубы; 8 – приваренный замок; 9 – сварной шов

Для обработки сигналов измерительной информации, ее хранения и визуализации, осуществляемых в электронном блоке, разработана специальная программа. На рис. 4 показана лицевая панель программы с пользовательским интерфейсом оператора.



Рис. 4. Интерфейс оператора системы контроля соосности

Ниже приводятся основные технические характеристики системы контроля SKS 10.02

- наружный диаметр свариваемых заготовок – от 43 мм до 108 мм
- диапазон измеряемых значений параллельного отклонения от соосности – 0...2 мм;
- диапазон измеряемых значений углового отклонения от соосности – 0...10 мм/м;
- максимальная база измерения углового отклонения от соосности – 350 мм;
- допустимая погрешность измерения параллельного отклонения от соосности  $\pm 0.05$  мм;
- допустимая погрешность измерения углового отклонения от соосности  $\pm 0.25$  мм/м

В 2009 году разработанная система контроля соосности SKS 10.02 была установлена в трубном цехе ОАО «Завод бурового оборудования» (г. Оренбург).

Двухлетний период успешной эксплуатации системы контроля подтвердил ее высокие технические характеристики, однако выявил и необходимость дальнейшей модернизации системы с целью повышения надежности и удобства проведения операций контроля.

Основными направлениями модернизации системы контроля являлись замена кабеля связи измерительного и электронного блоков системы контроля на беспроводный интерфейс (радиоканал), а также замена контактных преобразователей биений трубы (цифровых индикаторов часового типа) на бесконтактные магнитные взаимоиндуктивные измерительные преобразователи.

#### Система контроля соосности с беспроводным интерфейсом

Организация подключения измерительного блока к электронному блоку через беспроводный интерфейс (Bluetooth, радиоканал и др.), отсутствие соединительного кабеля, повышает удобство эксплуатации системы на рабочем месте и надежность системы.

Выбор технологии беспроводной связи был сделан в пользу спецификации BlueTooth. Использование BlueTooth позволяет избавиться от разработки устройства сопряжения на стороне ПК, т.к. в настоящее время такое устройство можно приобрести, оно достаточно распространено и дешево. Так же готовые модули беспроводной связи BlueTooth имеют аппаратную реализацию защиты от помех, малое потребление, большой набор программных средств и документации для разработки программного обеспечения, как на ПК, так и на стороне связываемого с ним устройства.

В качестве BlueTooth модуля был выбран модуль WT12, который имеет встроенный контроллер, позволяющий произвести настройку модуля один раз и пользоваться им в запрограммированном «Профиле» (режиме). В системе контроля модуль BlueTooth программируется для использования его в режиме Serial Port Profile (SPP) – эмулирует последовательный порт, предоставляя возможность замены стандартного RS-232 беспроводным соединением. Радиус действия используемого модуля составляет 15–20 м.

#### Система контроля соосности с бесконтактными преобразователями

Существенным направлением модернизации является отказ от контактных методов контроля (с использованием цифровых индикаторов часового типа) в пользу бесконтактных методов. В этом случае повышается надежность системы, поскольку отсутствует контакт измерительного штока индикатора и трубы, а также становится шире диапазон рабочих температур.

В качестве бесконтактных преобразователей биений трубы в электрический сигнал были выбраны взаимоиндуктивные измерительные преобразователи. На рис. 5 схематично показана конст-

рукция используемого взаимдуктивного преобразователя.

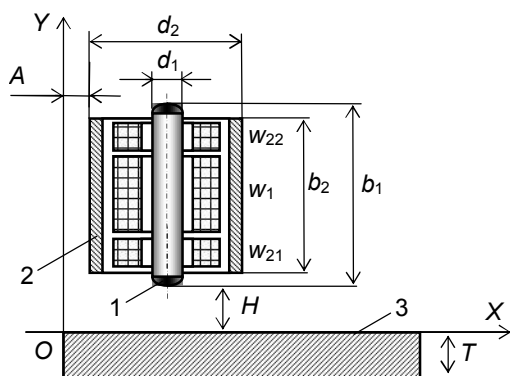


Рис. 5. Конструкция взаимдуктивного преобразователя

Составными элементами взаимдуктивного преобразователя являются обмотка возбуждения  $w_1$ , измерительная обмотка с двумя встречно включенными секциями  $w_{21}$  и  $w_{22}$ , а также ферромагнитный сердечник 1 и ферромагнитный цилиндрический экран 2, образующие магнитную цепь преобразователя. Практически неиспользуемый в аналогичных по назначению и конструкции преобразователях магнитных толщиномеров цилиндрический экран необходим в данном случае для исключения влияния находящихся в окружении преобразователя металлических деталей (например, элементов крепления).

В отсутствие вблизи преобразователя ферромагнитных объектов выходное напряжение измерительной обмотки равно нулю, что обусловлено равенством по модулю потокоцепления магнитного поля обмотки возбуждения и встречно включенных секций измерительной обмотки.

При наличии вблизи торцевой части преобразователя ферромагнитного объекта 3 происходит перераспределение магнитных потоков через секции измерительной обмотки, что приводит к появлению напряжения разбаланса (вносимого напряжения)  $U_2$  измерительной обмотки. Это напряжение функционально связано с расстоянием  $H$  до поверхности объекта нелинейной функцией преобразования  $U_2(H)$ . Степень нелинейности функции преобразования определяется конструктивными параметрами преобразователя.

Другим фактором, влияющим на значение напряжения  $U_2$ , является расстояние  $A$  до края ферромагнитного объекта (рис. 5). Существенное влияние данного фактора при использовании предлагаемого преобразователя для контроля состояния обусловлено конструктивными особенностями замковой части бурильной трубы, заключающимися в относительно малом расстоянии от торца замка до прорезей под ключ и, следовательно, в необходимости проведения контроля в условиях потенциально возможного проявления краевого эффекта.

В соответствии с вышесказанным, основными критериями при выборе конструктивных параметров взаимдуктивного преобразователя – длины и диаметра сердечника  $b_1$  и  $d_1$ , длины и диаметра экрана  $b_2$  и  $d_2$ , диаметра среднего витка обмоток  $d_0$ , являлись степень нелинейности функции преобразования  $U_2(H)$  и степень влияния на результат преобразования расстояния преобразователя до края объекта.

Для анализа влияния на функцию преобразования основных факторов был использован пакет моделирования COMSOL Multiphysics, позволяющий решать задачи, в том числе, из области электромагнетизма путем численного решения уравнений в частных производных методом конечных элементов. Построенная трехмерная модель преобразователя позволила осуществить анализ влияния на его функцию преобразования, как основных конструктивных параметров, так и оценить влияние на результаты преобразования краевого эффекта.

В качестве примера на рис. 6 показана рассчитанная с помощью COMSOL топография магнитного поля преобразователя при взаимодействии с плоским объектом при удалении от края объекта и вблизи края.

На рис. 6 приведены результаты моделирования влияния на функцию преобразования цилиндрического экрана. Здесь представлены зависимости вносимого объектом относительного изменения выходного напряжения  $\Delta U_2^*$  (нормированного по значению начального напряжения одной секции измерительной обмотки) от расстояния  $H$  до поверхности объекта при отсутствии экрана (кривая 1) и при наличии экрана (кривая 2). Для второго случая построена также экспериментальная зависимость (кривая 3). Анализ этих результатов показывает, что наличие экрана приводит к некоторому увеличению степени нелинейности функции преобразования, но это увеличение может быть минимизировано уменьшением длины экрана по сравнению с длиной сердечника на (15÷20)%.

Результаты математического и физического моделирования отличаются незначительно. Некоторое их расхождение обусловлено недостаточно качественной стабилизацией при эксперименте тока возбуждения.

На рис. 7 приведены результаты моделирования краевого эффекта. Здесь представлены зависимости относительного вносимого напряжения  $\Delta U_2^*$  от расстояния  $A$  до поверхности объекта при отсутствии экрана (кривая 1) и при наличии экрана (кривая 2). Анализ этих результатов показывает, что для используемой конструкции преобразователя краевой эффект проявляется незначительно даже при установке преобразователя на самый край объекта. Влияние экрана на характер зависимости  $\Delta U_2^*$  незначительно.

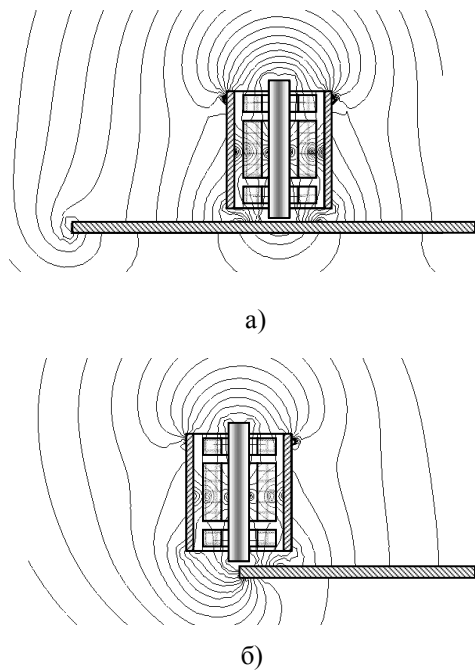


Рис. 6. Линии одинаковой индукции магнитного поля взаимноиндуктивного преобразователя при взаимодействии с плоским объектом при удалении от края объекта (а) и вблизи края (б)

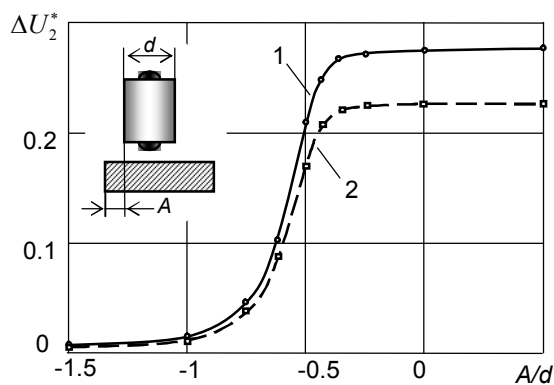


Рис. 7. Зависимость относительного вносимого напряжения преобразователя от расстояния до края объекта

Анализ других полученных математическим моделированием результатов показал, что оптимальные соотношения конструктивных параметров преобразователя следующие:

$$\begin{aligned} b_1 &= (1,5 \div 2,5)d_0; & d_1 &= (0,3 \div 0,4)d_0; \\ b_2 &= (0,75 \div 0,85)b_1; & d_2 &= (1,8 \div 2)d_0. \end{aligned} \quad (4)$$

#### Заключение

В настоящий момент на кафедре информационно-измерительной техники Томского политехнического университета получены положительные результаты по всем перечисленным направлениям модернизации, и могут быть предложены различные варианты систем контроля соосности приваренных замков буровых труб:

- система контроля соосности на основе цифровых индикаторов часового типа с кабелем связи (СКС 10.02);
- система контроля соосности на основе цифровых индикаторов часового типа с беспроводным интерфейсом;
- бесконтактная система контроля соосности с кабелем связи;
- бесконтактная система контроля соосности с беспроводным интерфейсом.

Имеющиеся технические решения могут быть использованы для измерения отклонения от прямолинейности трубы, поскольку при этом используется такой же принцип измерения биения тела трубы относительно мерной базы.

#### Литература

1. ГОСТ Р 51245-99 "Трубы буровые стальные универсальные. Общие технические условия"
2. Гольдштейн А.Е., Якимов Е.В. Измерение отклонения от соосности сварных соединений буровых труб. // Ползуновский вестник, 2010, № 2, с. 65-69

## СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ С БЕСПРОВОДНЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ

*Вахрушев Д.В., Якимов Е.В., Алимов Д.В.*

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: [vdv.18@mail.ru](mailto:vdv.18@mail.ru)

### Введение

Ведущее место в обширной номенклатуре бурильных труб занимают трубы стальные с приваренными замками. Конструктивно такие трубы состоят из трех элементов: тела трубы и двух замков – муфты и ниппеля, приваренных к телу трубы методом сварки трением. Важной характеристикой сварных соединений бурильных труб, в значительной мере определяющей трудоемкость и точность бурения, срок службы бурового оборудования является соосность приваренных замков и тела трубы.

В соответствии с [1] контроль соосности заключается в измерении при вращении трубы радиальных биений замковой части трубы относительно оси тела бурильной трубы в двух сечениях, первое из которых расположено вблизи сварного соединения, а второе – вблизи торца замковой части трубы. Параллельное  $a_1$ , мм и угловое  $a_2$ , мм/100мм отклонения от соосности определяются по формулам:

$$a_1 = \frac{\delta_1}{2}, \quad a_2 = \frac{\delta_2 - \delta_1}{2 \cdot L} \cdot 100 \quad (1)$$

где 1 – биение в сечении 1, мм; 2 – биение в сечении 2, мм; L – расстояние между сечениями, мм.

В целях автоматизации процесса контроля соосности сварных соединений бурильных труб на кафедре информационно-измерительной техники ТПУ разработана система контроля соосности СКС 10.02 [2]. В производственных условиях система контроля устанавливается на линии изготовления бурильных труб на участках сварки трением, температурного отпуска сварного соединения, технического контроля готовой продукции.

Основными функциями системы контроля являются измерение значений параллельного и углового отклонений от соосности сварного соединения, сравнение их с предельно допустимыми, а также индикация, хранение и передача в информационную сеть результатов измерения и контроля.

Двухлетний период успешной эксплуатации системы контроля в трубном цехе ОАО «Завод бурового оборудования» (г. Оренбург) подтвердил ее высокие технические характеристики, однако выявил и необходимость дальнейшей модернизации системы с целью повышения надежности и удобства проведения операций контроля.

Одним из основных направлений модернизации системы явилась замена кабеля связи измерительного и электронного блоков

системы контроля на беспроводный интерфейс (радиоканал).

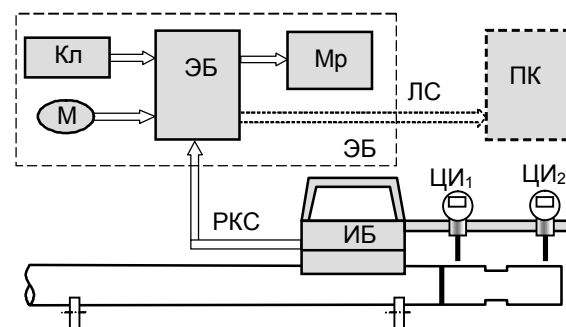
### Устройство и работа системы

На рисунке 1 приведена структурная схема модернизированной системы контроля соосности СКС-04. Система контроля содержит два основных блока: измерительный блок (ИБ) с установленными на нем цифровыми индикаторами часового типа для измерения расстояния до поверхности трубы (ЦИ<sub>1</sub> и ЦИ<sub>2</sub>) и электронный блок (ЭБ) с подключенными к нему периферийными устройствами – монитором (Мр), клавиатурой (Кл) и мышью (М). Измерительный и электронный блоки соединены между собой радиоканалом связи (РКС).

Измерение отклонений от соосности осуществляется следующим образом. Измерительный блок устанавливается на контролируемую бурильную трубу в месте стыка тела трубы и ее замковой части. В процессе измерения осуществляется вращение трубы на ножевых вращающихся опорах. Измерительный блок при вращении трубы удерживается на месте, но остается в постоянном контакте с поверхностью тела трубы через опорные подшипники.

Выходной сигнал от индикаторов определяется в этом случае суммой начального показания  $x_0$ , которое определяется начальным расстоянием (зазором) между преобразователем и поверхностью трубы до начала вращения трубы и приращения  $\Delta x$ , обусловленного изменением расстояния между преобразователем и поверхностью трубы вследствие возможной несоосности замковой части трубы относительно оси тела трубы.

Рис.1. Структурная схема системы контроля



соосности СКС-04.

Выходные сигналы первого и второго индикаторов  $x_1$  и  $x_2$  преобразуются контроллером измерительного блока в форму, пригодную для передачи



по радиоканалу связи (РКС) на вход электронного блока ЭБ.

В электронном блоке, основой которого является персональный компьютер (ПК) с периферийными устройствами, осуществляется запись массивов значений сигналов  $x_1$  и  $x_2$ , соответствующих различным углам поворота контролируемой трубы в диапазоне от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , и определение минимальных  $x_{1\min}$  и  $x_{2\min}$  и максимальных  $x_{1\max}$  и  $x_{2\max}$  значений сигналов из этих массивов.

Значения радиальных биений в первом и втором сечениях замковой части трубы  $\delta_1$  и  $\delta_2$  определяются следующим образом:

$$\delta_1 = x_{1\max} - x_{1\min}, \quad \delta_2 = x_{2\max} - x_{2\min} \quad (2)$$

Далее производится вычисление значений параллельного  $a_1$  и углового  $a_2$ , отклонений от соосности по формулам (1) и сравнение полученных значений с предельно допустимыми.

Результаты контроля заносятся в электронный протокол контроля, выводятся на индикаторную панель, а также передаются по локальной сети ЛС на персональный компьютер диспетчера.

#### Разработка интерфейсов

В [3] был модернизирован интерфейс связи с ПК индикаторов часового типа на контроллере ATmega8 с возможностью доработки и замены кабельного интерфейса на беспроводный. Данный интерфейс значительно упрощает и удешевляет конструкцию системы, а так же добавляет возможность добавить не только радиоканал типа Bluetooth, но также ZigBee и другие радиопередатчики.

Как было отмечено ранее, одним из направлений модернизации системы контроля являлась замена проводной связи измерительного и электронного блоков беспроводной. Выбор модуля для беспроводной связи был сделан в пользу спецификации Bluetooth. Использование Bluetooth позволяет избавиться от разработки устройства сопряжения на стороне ПК, т.к. в настоящее время такое устройство достаточно распространено и применяется во многих устройствах где требуется связь с ПК. Так же готовые модули беспроводной связи Bluetooth имеют аппаратную реализацию защиты от помех, малое потребление, большой набор программных средств и документации для разработки программного обеспечения, как на ПК, так и на стороне устройства.

Структурная схема устройства модернизированной системы беспроводной передачи показана на рисунке 2. Цифровые индикаторы ИЦ<sub>1</sub> и ИЦ<sub>2</sub> передают данные на контроллер [3], затем контроллер отправляет их по UART интерфейсу в Bluetooth модуль, который в свою очередь отправляет данные по радиоканалу на компьютер. В компьютере найденное Bluetooth устройство оп-

ределяется как виртуальный COM порт, к которому LabView получает доступ для управления устройством.

В качестве Bluetooth модуля был выбран модуль который имеет интерфейс UART для связи и программирования, он управляется AT командами, имеет встроенный контроллер, позволяющий произвести настройку модуля для использования без дополнительной программной инициализации. В системе контроля модуль Bluetooth программируется для использования его в режиме SerialPortProfile (SPP) — эмулирует последовательный порт, предоставляя возможность замены стандартного RS-232 беспроводным соединением. Радиус действия используемого модуля составляет 15–20 м при мощности передатчика 2,5 мВт, при использовании его в системе, энергии 2-ух аккумуляторных батарей типа АА хватает до 12 часов непрерывной работы.

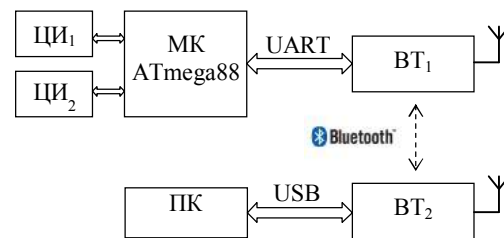


Рис.2. Структурная схема беспроводного интерфейса в системы контроля соосности. ЦИ<sub>1</sub>, ЦИ<sub>2</sub> – цифровые индикаторы часового типа; BT<sub>1</sub> – Bluetooth на стороне прибора; BT<sub>2</sub> – интерфейсы Bluetooth; ПК – персональный компьютер.

Использование результатов описанных в работе позволило существенно повысить эксплуатационные характеристики системы контроля соосности. Для исключения проводного соединения был использован Bluetooth модуль, обеспечивающий беспроводное соединение на расстоянии более 10 м.

#### Литература

- ГОСТ Р 51245-99 «Трубы бурильные стальные универсальные. Общие технические условия».
- Гольдштейн А.Е., Якимов Е.В. Измерение отклонения от соосности сварных соединений бурильных труб. // – Ползуновский вестник, 2010, № 2, с. 65-69.
- Вахрушев Д.В., Якимов Е.В. Организация интерфейса с ПК в системе контроля соосности сварных соединений бурильных труб //Современные техника и технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 3-х томах - Томск, ТПУ, 12-16 апреля 2010. - Томск: Изд. ТПУ, 2010. - с. 177-178 (63146418)

**СЕКЦИЯ 2**  
**ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ**  
**ИЗМЕРЕНИЙ И ИНФОРМАЦИОННЫХ**  
**ТЕХНОЛОГИЙ**



## ДЕФЕКТЫ В ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ОБНАРУЖИВАЕМЫЕ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ МЕТОДЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

*Бурица Л.Б., Редько В.В.*

Научный руководитель: Редько В.В., к. т. н., доцент каф. ИИТ ТПУ  
Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: Lubai@tpu.ru

Понятие «дефект» в любом виде неразрушающего контроля является основополагающим. Наиболее общее определение термина «дефект» – несоответствие продукции установленным требованиям. Применительно к области электроискрового неразрушающего контроля в кабельной отрасли термин «дефект» до сих пор определен неоднозначно. В соответствии с нормативными документами [1, 2] дефект (стандартное повреждение кабельного изделия) при электроискровом испытании определяется по току короткого замыкания при определенных условиях испытания. Однако нет никаких исследований, подтверждающих требования, установленные нормативными документами. Сами требования обоснованы многолетним опытом применения электроискровых дефектоскопов в кабельной промышленности.

На заводах кабельной промышленности имеется несколько типов дефектности (брака) изоляции и оболочки кабельных изделий (КИ), контролируемых непосредственно в технологическом процессе. Основные из них:

1. Сдир изоляции;
2. Шероховатость и растрескивание изоляции;
3. Местные разрывы и шишки по изоляции;
4. Эксцентричность изоляции;
5. Недовулканизация резиновой изоляции;
6. Занижение или завышение диаметра изоляции;
7. Залипание изоляционного материала на жилах КИ;
8. Пористая изоляция;
9. Неравномерность изоляционного материала, наплывы по изоляции;
10. Включение посторонних частиц, пузырей воздуха.

Все вышеописанные дефекты изоляции КИ являются следствием несоблюдения технологии изготовления. Обобщая все случаи брака в изоляции КИ можно выделить основные причины его возникновения [3].

Во-первых, на производительность экструзионного агрегата и качество выпускаемой кабельной продукции существенное влияние оказывает формирующий инструмент (дорн, матрица), в котором происходит непосредственное формирование расплава полимера в цилиндрический слой изоляции или оболочки. Кроме того, большое значение имеют такие технологические параметры, как геометрические размеры червяка и цилиндра, частота вращения червяка, температурный режим в

цилиндре и головке, скорость прохождения заготовки через головку экструдера.

От взаимного расположения дорна и матрицы зависит плотность наложения изоляции на токопроводящую жилу или, как обычно говорят, степень обжатия.

Высокая степень обжатия применяется обычно при изготовлении кабельных изделий высокого напряжения, для которых недопустимо наличие воздушных включений у поверхности жилы. При наложении изоляции кабелей и проводов, работающих при низком напряжении, когда наличие воздушных включений не опасно, так как мала напряженность электрического поля в изоляции, возможно расположение формирующего инструмента по схеме, обеспечивающей изолирование с малым обжатием. Свободное наложение оболочек используется для обеспечения целостности их при изгибах кабеля. Иначе, при «жестком» сцеплении оболочки с внутривлезающими элементами кабеля (при наложении оболочки с обжатием) возможны ее деформации и разрывы. Несоблюдение расположений формирующих инструментов при экструзии может вызывать различные нарушения целостности изоляции.

Во-вторых, важным фактором при наложении изоляции остается точное соблюдение температурных режимов, обеспечение высокой стабильности температуры и давления. Стабильность температуры расплава, как и его давления, зависит не только от температуры цилиндра, но и от профиля распределения температуры по зонам экструдера, конструкции червяка, его охлаждения и т.д.

При наложении покрытий из полиэтилена и поливинилхлоридного пластика важным фактором температурного режима является подогрев токопроводящей жилы или заготовки кабеля перед входом в головку экструдера до температуры 90...150 °С. Если жила не подогрета до нужной температуры, то вокруг нее может образоваться невспененный монокристаллический слой; и наоборот, если жила имеет слишком высокую температуру, то могут образоваться крупные ячейки, и кабельное изделие не будет отвечать заданным техническим требованиям.

При перемещении резиновой смеси в цилиндре экструдера необходимо принять меры для исключения задержки потока смеси и ее местных перегревов. В противном случае может начаться преждевременная вулканизация, исключающая получение качественной продукции.

В-третьих, на заключительных этапах производства КИ важно его охлаждение с помощью охлаждающей ванны. При резком охлаждении полимерных покрытий могут происходить изменения структуры и некоторых физических свойств материала. Так как в этом случае релаксационные процессы не успевают завершиться и образуется неравновесная структура материала, и которой преобладает аморфная фаза. Плотность такой структуры ниже, чем у неравновесной, возникающей при медленном охлаждении кабельного изделия. В результате внутренние напряжения, связанные с разбуханием и ориентацией расплава, замораживаются. В процессе эксплуатации (особенно при повышенных температурах) структура будет стремиться прийти в равновесное состояние, что приведет к перераспределению напряжений и ее усадке, которые могут вызвать появление трещин при тепловом старении и снижение морозостойкости. Причем трещины как раз и появляются в местах концентрации механических напряжений.

Следствием быстрого охлаждения является также образование внутренних пустот в покрытиях.

Большинство кабельных изделий при возникновении дефектов в изоляции или оболочке подвергаются ремонту в соответствии с нормативными документами (техническими условиями или ГОСТами на эти КИ). В следствие того, что обычные полуфабрикаты типа изолированная жила, входящие в состав более сложных кабелей, в случае обнаружения брака проще отремонтировать, вырезав дефектный участок, действия, описанные ниже, применяются в основном для ремонта оболочек кабелей.

Ремонту подвергаются участки оболочек кабеля, имеющие: утонение, единичные мелкие инородные включения, утолщения (шишки) по оболочке, отверстия в оболочке, размером не более 10x10 мм (в том числе трещины и разрывы по оболочке).

Такие дефекты, как утонение изоляции, устраняются с помощью наложения заготовки в виде ленты, вырезанной из оболочки готового кабеля той же марки пластика, и приваривания этой заготовки с помощью сварочного пистолета. После всей операции участок выравнивается специальным ножом и шлифовальной шкуркой. Максимальный диаметр кабеля в месте ремонта не должен превышать фактический диаметр кабеля более чем на 15%.

Места в изоляции с инородными включениями и отверстиями удаляются ножом, зачищаются и ремонтируются в помощью сварочного пистолета методом, описанным выше. Шишки и наплывы по изоляции срезаются ножом и зачищаются.

Контроль качества починки осуществляется путем изгиба кабеля вокруг цилиндра, диаметр которого равен 10 Дн (Дн – максимальный наружный диаметр). Количество починки в строительной длине не должно превышать 5, иначе она отбраковывается полностью.

На рисунке 1 показан принимаемый на данный момент как идеальный для рассмотрения образец дефекта, который должен обнаруживаться с помощью электроискрового дефектоскопа [4] – так называемый «точечный дефект».

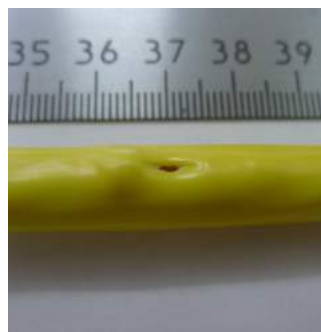


Рис. 1 «Точечный дефект» в поливинилхлоридной изоляции КИ.

Если соотнести основное понятие дефекта и понятие «точечного дефекта» можно сказать, что дефектом в случае изоляции кабельного изделия можно считать не только «открытые» дефекты, но любое несоответствие изоляции КИ требованиям к ее электрической прочности и емкости в отношении на единицу длины изделия.

Таким образом, важной задачей для улучшения условий электроискрового метода контроля остается определение понятия «дефект». Разрешение этой задачи позволит однозначно определить требования, предъявляемые к дефектоскопам.

#### Список литературы:

1. ГОСТ 2990-78. Кабели, провода и шнуры. Методы испытания напряжением.
2. ВНИИКП. Проект стандарта на электроискровой метод испытания изоляции кабельных изделий. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.vniikp.ru/patent\\_page\\_phtml?item\\_id=2235](http://www.vniikp.ru/patent_page_phtml?item_id=2235) свободный. – Загл. с экрана.
3. Основы кабельной техники: учебник для ВУЗов/ Леонов В.М., Пешков И.Б., Рязанов И.Б., Холодный С.Д.; под ред. Пешкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006.
4. ООО «НПО «Редвилл» (РФ). Сайт компании. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.redwill.ru](http://www.redwill.ru) свободный. – Загл. с экрана.

## ТЕХНОЛОГИЯ PLC И ЕЕ ПЕРСПЕКТИВЫ В РАЗВИТИИ АСКУЭ

*Николенко К. В., Юрченко А. В.*

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30

E-mail: [rubos\\_saboteur@mail.ru](mailto:rubos_saboteur@mail.ru)

О технологии PLC (PowerLineCommunication) или «Связь по электросети» так или иначе слышали многие, однако о реальных возможностях технологии осведомлено лишь небольшое количество специалистов. Отчасти это связано с информационной политикой производителей и невнятным маркетингом, который не учитывал российские реалии, отчасти виноваты болезни роста, поскольку первая и вторая версия стандарта работали не так хорошо, как хотелось бы. В этом обзоре представлен свежий взгляд на возможности этой интересной технологии, которая базируется на стандарте, одобренном UPA в 2006 году. Этот стандарт обеспечивает физическую скорость передачи данных до 200 Мбит/сек в режиме полудуплекс, что соответствует максимальной скорости передачи реальных данных 80 мбит/сек в полнодуплексном режиме. Максимальная скорость ниже пропускной способности FastEthernet из-за издержек на служебный трафик и избыточность данных для протокола коррекции ошибок.

На отечественном рынке технология PLC известна прежде всего решениями типа «Домашняя сеть по электропроводке» которые представлены такими брендами как Zyxel, Dlink, Qlan. А также компанией «Инкотекс» представлены системы сбора передачи данных в рамках АСКУЭ.

### Суть технологии.

Основой технологии Powerline является использование частотного разделения сигнала, при котором высокоскоростной поток данных разбивается на несколько относительно низкоскоростных потоков, каждый из которых передается на отдельной поднесущей частоте с последующим их объединением в один сигнал (рис.1).

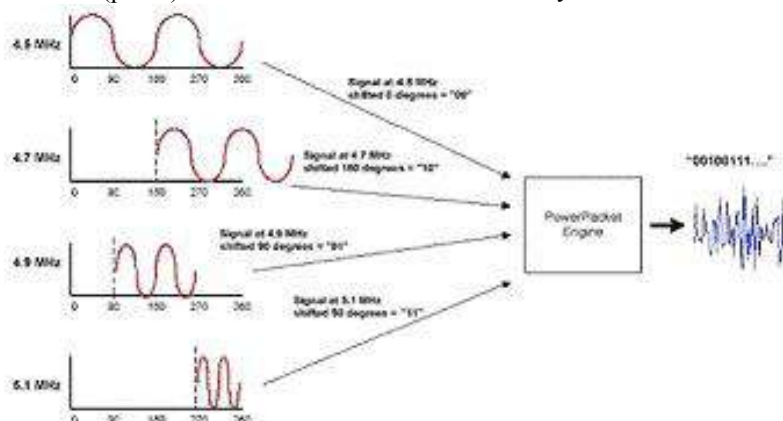


Рисунок 2. Относительная квадратурная фазовая манипуляция (DQPSK)

Реально в технологии Powerline используются 84 поднесущие частоты в диапазоне 4-21 МГц. Теоретическая скорость передачи данных при использовании параллельных потоков с одновременным фазовым модулированием сигналов составляет более 100 Мб/с.

При использовании обычного частотного мультиплексирования (FDM - Frequency-Division Multiplexing) защитные интервалы (GuardBand) между поднесущими, необходимые для предотвращения взаимного влияния сигналов, довольно велики, поэтому доступный спектр используется не очень эффективно.

В случае же ортогонального частотно-разделенного мультиплексирования (OFDM), центры поднесущих частот размещены так, что пик каждого последующего сигнала совпадает с нулевым значением предыдущих (рис.1). Такое размещение позволяет более эффективно использовать доступную полосу частот.

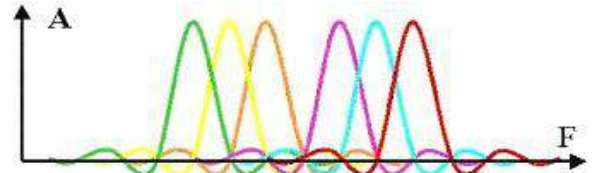


Рисунок 1. Ортогональное частотно-разделенное мультиплексирование (OFDM)

Перед тем как отдельные поднесущие частоты будут объединены в один сигнал, они претерпевают фазовую модуляцию, каждая -- своей последовательностью бит.

После этого все они проходят через PowerPacketengine и собираются в единый информационный пакет, который еще называют OFDM-symbol. На рисунке 2 приведен пример относительной квадратурной фазовой манипуляции (DQPSK - Differential Quadrature Phase Shift Keying) на каждой из 4-х поднесущих частот в диапазоне 4-5 МГц.

### Существующие решения на основе PLC

«Меркурий-ЭНЕРГОУЧЁТ» - это современная АИИС ориентированная на применение в жилом и мелкомоторных секторах, коттеджных и дачных посёлках, а так же для учёта на вводах трансформаторных подстанций 6(10)/0,4 кВ. Отличительной особенностью нашей системы от множества других является то, что контроль за потреблением электроэнергии осуществляется по силовой распределительной сети 0,4 кВ. В отличие от АИИС КУЭ, построенных на базе счётчиков с традиционными проводными цифровыми интерфейсами RS-485 или подобными, отсутствие объединяющего интерфейсного кабеля значительно удешев-

ляет стоимость монтажных работ и последующую эксплуатацию системы, при этом увеличивается надёжность функционирования и вандалоустойчивость. Совокупная стоимость системы практически определяется суммарной стоимостью электросчётчиков. Технические решения применённые при разработке коммуникационного оборудования являются уникальными среди подобных устройств и защищены двумя патентами РФ.

Кроме того в Европе и Америке, а с недавнего времени и в России, широко применяются малые сети на основе PLC технологий. Пример малой сети:

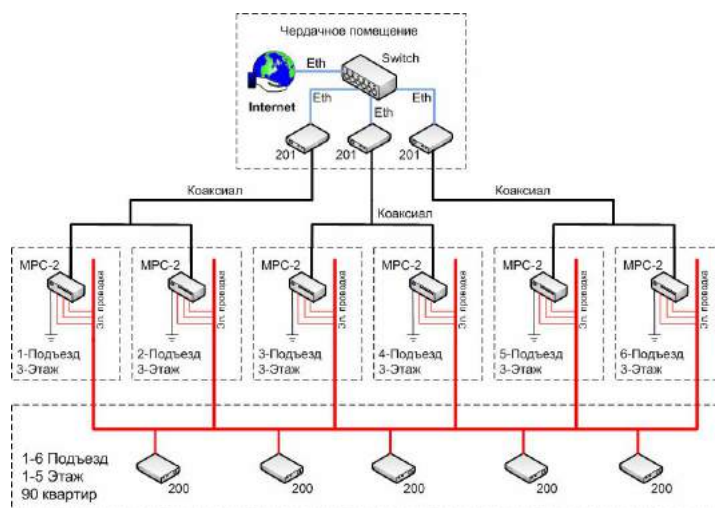


Рисунок 3. Малая сеть многоквартирного дома.

Учитывая тенденции развития отраслей IT и электроэнергетики, взаимную интеграцию, можно предполагать, что следующим этапом развития АСКУЭ может стать комбинированная или гибридная сеть передачи данных. Такая сеть способна не только собирать данные с точек учета, но и предоставлять доступ в информационное поле абонентам. В связи с этим развитие технологий широкополосного доступа посредством PLC является перспективным направлением.

На сегодняшний день отрасль активно развивается. И в феврале 2011 года был принят новый стандарт IEEE 1901. Международная некоммерческая техническая профессиональная ассоциация Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. (IEEE) предварительно утвердила стандарт 1901, который в перспективе позволит передавать данные по электросети на скорости до 500 Мбит/с.

Спецификации нового стандарта подразумевают скорость передачи данных на физическом уровне (в реальных условиях) до 500 Мбит/с. Предварительно финальные спецификации стандарта были утверждены уже в 11-го февраля 2011 г.

Начало развитию услуг доступа в Интернет было положено в 2004 г. В июле 2004 г. IEEE объявил о создании группы разработки нового стандарта, проект носил наименование IEEE P1675,

Standard for Broadband over Power Line Hardware. Его разработка и ратификация были завершены в сентябре 2008 г. Помимо IEEE P1675 существуют еще три проекта в этой же предметной области: IEEE P1775, инициированный 12 мая 2005 г. с целью регламентирования PLC-оборудования, требований по электромагнитной совместимости, методов тестирования и измерения; IEEE P1901, Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications, обеспечивающий описание физического уровня и уровня доступа к среде для всех классов BPL-устройств (ратифицирован в сентябре 2010 г.); IEEE BPL Study Group, Standardization of Broadband over Power Line Technologies, обеспечивающий создание новых групп, связанных с BPL.

Кроме того в России уже прошли сертификацию и поступили в розничную продажу маршрутизаторы и преобразователи фирмы ZyXEL. Но тут стоит отметить, что Powerline-оборудование ZyXEL применяется не для подключения услуг Интернета, а для удобной разводки уже имеющегося интернет-подключения по квартире (в разные комнаты), без прокладки дополнительных коммуникаций (не нужно прокладывать Ethernet-кабель), используя имеющуюся в помещении электропроводку.

На данном этапе развития технология PLC может потеснить на рынке предоставления широко-

Секция 2. Применения современных средств измерений и информационных технологий.

кополосного доступа такие традиционные технологии как Ethernet и даже WiFi. В связи с принятием нового стандарта IEEE 1901 отрасль начинает следующий виток развития, а уже имеющиеся технологии могут позволить электро-компаниям

совмещать предоставление услуг по энергообеспечению с предоставлением услуг в сфере коммуникаций. А это не только интернет, но и телефония, телевиденье (более того HDTV).[2]

**Таблица 1. Сравнительный анализ технологий обмена информацией в АСКУЭ**

Технология	Состав	Посредник	Возможность вмешательства	Достоинства	Недостатки
Ручной контроль	S	Человек	+	Нет	Большая вероятность ошибки, преднамеренного Внесения неверных показаний, Большой штат сотрудников
RS232/485	S-K-L-C	-	-	Простота реализации в небольших и не распределенных сетях	Наличие дополнительных линий связи
GSM	S-K-L-C	Сотовый оператор	-	Простота реализации для 1-ой точки контроля	Необходима организация счетчиков в малую сеть, установка УСПД и лишь затем передача данных
PLC	S-K-C	-	-	Использование готовых линий связи	Плохое качество линий (относится в меньшей степени к новостройкам)
Radio/GTC	S-K-L-C	Сертификация частот/ Телефонная компания	-	Нет необходимости в линиях связи	Необходимо резервирование частот
LAN	S-K	Интернет провайдер	-	Минимальный набор оборудования (количественно сравним с PLC)	Необходимо наличие интернет провайдера, что увеличивает расходы

S– наличие в системе счетчика;

K- наличие в системе концентратора (УСПД);

L- наличие в системе дополнительных линий связи;

C- наличие в системе средства связи в диспетчерском пункте и/или ЦДП.

В рамках НИР в лабораторных условиях была построена АСКУЭ на этапе т.н. «последней мили» с применением оборудования компании «Инкотекс». Согласно проведенным исследованиям затухание PLC гораздо меньше ожидаемого. Получение PLC пакетов в рамках одной ТП составило 100%. Т.о. технология PLC как нельзя лучше подходит для локальных сетей сбора-передачи данных. Основным питающим элементом сети являются солнечные батареи, установленные на крыше 10-го корпуса ТПУ. Как известно, солнечные батареи генерируют постоянный ток, а для питания большинства приборов необходим переменный ток. Поэтому ток поступающий от солнечных батарей преобразовывается в переменный при помощи инвертера AC-DC. Далее, с целью упрощения расчетов с электро-компанией, необ-

ходимо точно знать количество (кВт/ч) произведенной энергии, и количество потребленной от городской сети. Для этого в системе присутствуют 2 счетчика, а именно «Меркурий 203 2Т» на входе после инвертера, и «Меркурий 201» на входе от городской сети 220В. Кроме того, в системе присутствует блок аккумуляторных батарей, которые заряжаются от солнечных в ясную погоду, и разряжаются, отдавая энергию в сеть, в сильно пасмурную погоду или ночью. Таким образом система учитывает не только мгновенно потребляемую энергию (как от сети, так и от PV элементов), но и энергию потребляемую после накопления. Генерирующая сеть питает оборудование в лаборатории. На данный момент это компьютеры и оргтехника.



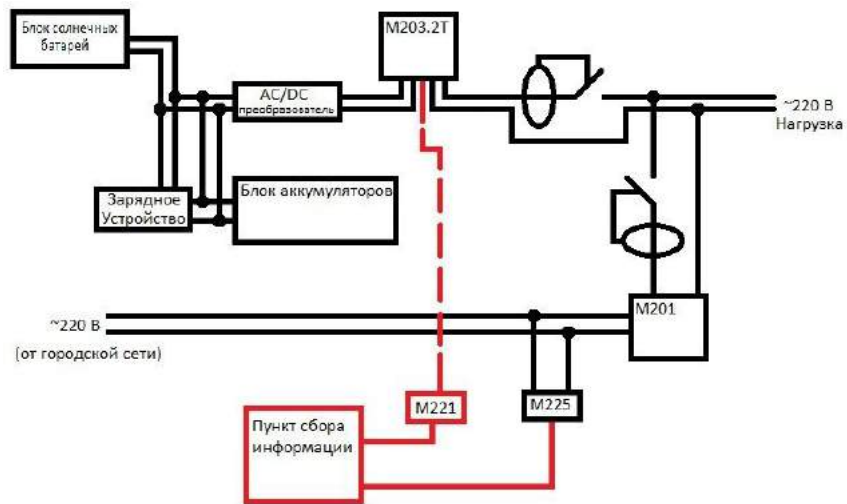


Рисунок 6. схема АСКУЭ генерирующей сети.

Помимо этого в рамках НИР были проведены исследования влияния на сигнал PLC различных факторов. Как например медная или алюминиевая

проводка используется в ТП. В 10-ом корпусе ТПУ присутствуют оба типа проводки. Ниже приведены осциллограммы сигналов:

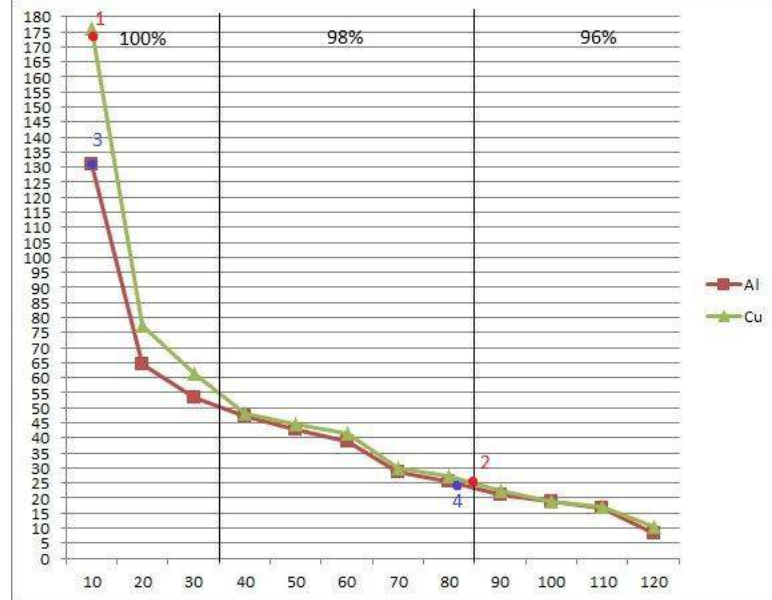
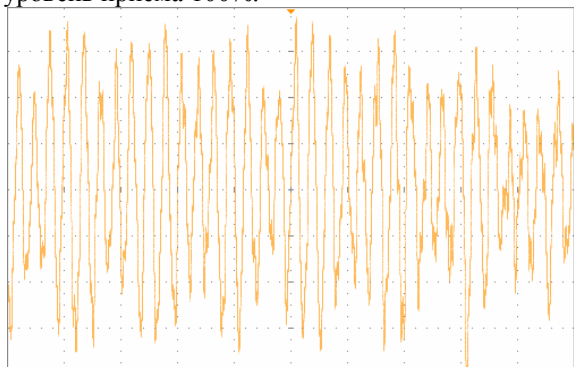


Рисунок 7. Амплитуды PLC, уровень приема.

Более подробно рассмотрим падение амплитуд в точках 1-2 для медной проводки и 3-4 для алюминиевой.

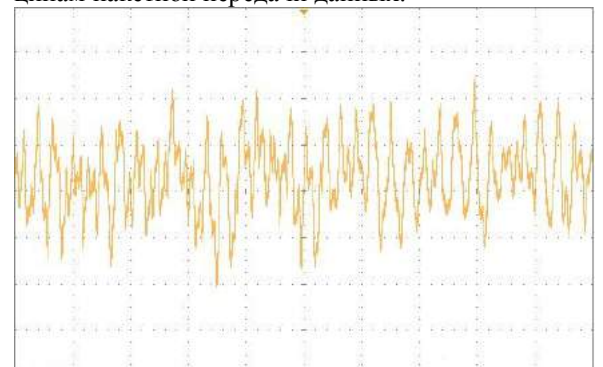
В точке 1 амплитуда сигнала равна 176 мВ, уровень приема 100%.



A:	RMS	176mV	176mV (Max)	52.0mV (Min)
B:	Frequency	34.68kHz	41.80kHz (Max)	17.73kHz (Min)
C:	Top-Base	775mV	781mV (Max)	75.0mV (Min)
D:	Duty Cycle	49.9%	88.7% (Max)	15.8% (Min)

Рисунок 8. Осциллограмма в точке 1

В точке 2 мы же видим падение амплитуды до 27,1 мВ, хотя уровень приема сигнала по прежнему уверенны, и составляет 98%, благодаря принципам пакетной передачи данных.



A:	RMS	27.1mV	27.1mV (Max)	27.1mV (Min)
B:	Frequency	36.47kHz	36.47kHz (Max)	36.47kHz (Min)
C:	Top-Base	53.1mV	53.1mV (Max)	53.1mV (Min)
D:	Duty Cycle	67.4%	67.4% (Max)	67.4% (Min)

Рисунок 9. Осциллограмма в точке 2

В алюминиевой проводке уровень сигнала, при прочих равных условиях, слабее. Как видно в точке 3 (находящейся на таком же расстоянии от передатчика, что и точка 1) амплитуда сигнала меньше, чем в точке 1. Амплитуда сигнала – 131 мВ, уровень приема 100%.

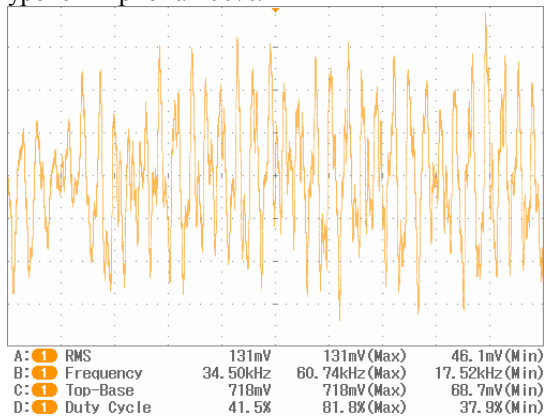


Рисунок 10. Осциллограмма в точке 3

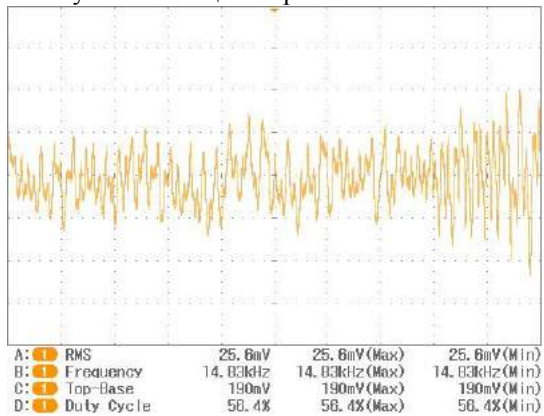


Рисунок 11. Осциллограмма в точке 4

Падение же уровня происходит по тому же закону, что и в медной проводке. И в точке 4 амплитуда сигнала – 25,6 мВ, уровень приема 98%.

Затухание высокочастотных сигналов алюминии выше, чем в меди, т.к. удельное сопротивление: Al – 0,028 Ом\*мм<sup>2</sup>/м, в то время как Cu – 0,0175 Ом\*мм<sup>2</sup>/м.

Согласно полученных данных и проведенных тестов можно сделать вывод, что применять PLC для какой-либо связи (в рамках технологического процесса, АСКУЭ, широкополосного доступа в сеть интернет и/или предприятия) лучше при наличии медной проводки в здании. PLC является в достаточной мере помехозащищенным типом связи, в рамках исследований сбоев были крайне редким явлением. PLC отлично подходит для связи в генерирующих сетях, т.к. в таких сетях, как правило, нет сдвига частоты переменного тока, что всегда присутствует в городских сетях, ввиду неравномерного вращения турбины. Сравнительный анализ позволяет с уверенностью утверждать, что PLC – наименее затратная технология в обслуживании. Безусловно присутствуют значительные затраты на развертывание, но за счет отсутствия как посредников, так и дополнительных линий связи, стоимость обслуживания ниже других технологий.

#### Список литературы

1. Николенко К. В., Юрченко А. В. Передача данных по рlc-сети. возможности и перспективы// Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений. Сборник трудов II Международной научно-практической конференции молодых ученых. 23 - 25 ноября 2010 г. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – с. 445-447
2. Николенко К. В., Юрченко А.В., Волгин А.В. Технология PLC и ее перспективы на российском рынке широкополосного абонентского доступа // Информационно-измерительная техника и технологии: сборник материалов I Научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры «Информационно-измерительная техника» Национального исследовательского Томского политехнического университета/ под ред. А.В. Юрченко; - Томск, НИ ТПУ, 25-26 февраля 2010. - Томск: Изд. ТПУ, 2010. - С. 74-75



## "УМНЫЙ ДОМ" И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ

*Григорьев М. Г., Вавилова Г.В.*

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30

E-mail: [Mishatpu@sibmail.com](mailto:Mishatpu@sibmail.com)

Ну вот и наступило время, описанное в произведениях фантастов, еще недавно казавшееся нам недостижимым: дом стал "умным", управляет сам собой и если хозяева забудут о каких-то хозяйственных надобностях, то такой дом - никогда. Красивый, уютный, удобный и, главное, умный дом - теперь это не самые смелые фантазии, а реальность и жить в таком доме одно удовольствие.

Что же может такой дом. Начнем с самого простого - контроля над освещением. С помощью системы управления становится возможным контролировать - включать, выключать, регулировать яркость - каждый источник света во всех помещениях, независимо от того, где располагается светильник и какого он типа. Т.е. можно не вставать с кровати, чтобы выключить свет, возвращаясь в темноте от выключателя к постели. Из своей спальни можно выключить свет в детской или во всем доме. Или оставить ночное приглушенное освещение в коридорах. С помощью такой системы можно управлять освещением практически из любого места, даже находясь далеко от дома. Если поставить датчик движения - свет включится как только приоткроется одна из дверей в комнаты или на лестничную площадку. Свет может включаться и выключаться в заранее заданное время. А в коттедже с помощью установленных на улице датчиков, обнаруживших перемещающийся объект, включается наружное освещение и передается сигнал об обнаружении объекта.

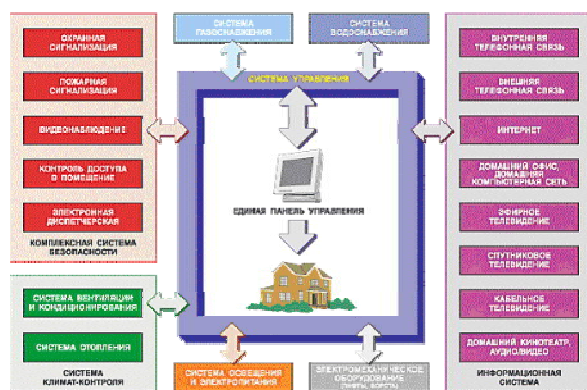


Рис. 1. Единая система управления.

Умный дом может имитировать присутствие хозяев. Установленная программа будет включать свет в разных помещениях, а с наступлением ночи, она будет свет выключать, оставляя дежурное освещение. Утром, пока темно, свет включится снова и у стороннего наблюдателя возникнет полная уверенность, что в доме живут люди.

Помимо освещения, умный дом может поддерживать и "климатические" параметры на заданном уровне: температуру, влажность, приток свежего воздуха. При этом в зависимости от уличной температуры и ваших желаний будут выбраны системой и включены на необходимую мощность радиаторы, тепловые полы, кондиционеры и другие приборы. Дом позаботится и о комфортном сне: к ночи температура понизится. Программирование тепловых процессов в доме существенно снижает расходы на отопление, а комплексное управление исключает работу нескольких обогревательных приборов одновременно.

Система климат-контроля может сообщить хозяину об осадках, силе ветра, температуре на улице и в помещении, а потом и выполнить приказы: открыть или закрыть окна, проветрить. Система управляет климатом в доме и автоматически, например, закроет окна, если начнется дождь, в жаркую погоду включит кондиционеры, опустит жалюзи.

Для систем управления домом можно писать своеобразные сценарии. В загородном доме будут автоматически проводиться нагрев и осушение крыш, транспортных въездов от льда и снега. По сигналу с мобильного телефона или по интернет, к приезду в коттедж хозяина наполнится бассейн, прогреется сауна. А если придут гости, дом обеспечит дополнительное кондиционирование и проветривание. Очень важным моментом для загородного дома является "правильный" полив комнатных растений или газона. Полив осуществится с учетом влажности грунта и требований различных растений. Поставив датчики в зимнем саду, можно быть спокойным - дом будет контролировать влажность, освещенность и температурный режим по зонам сада, чтобы все растения в нем замечательно выглядели. Аквариумные рыбки тоже будут комфортно себя чувствовать под прищотом дома. Вовремя будет подан корм, включится подача кислорода и свет.

Правильная и надежная работа охранных систем - одно из необходимых и важных условий современной жизни. За их работой тоже проследит дом и вовремя отправит на пульт наблюдения сигнал о пожарной опасности. А при вторжении в дом, система отправит сигнал не только на пульт охранных структур, но и на телефон хозяина. Отправка голосового сообщения на указанный хозяином телефон произойдет и в случае протечки воды, утечки газа или, например, задымления. Если номер занят или не отвечает, система наби-

рает следующий заданный номер. При вторжении может автоматически включиться видеозапись.

Охранная система при поступлении сигнала о приходе хозяев может включить освещение и приборы на кухне, кондиционеры и музыкальный центр. Возможна определенная реакция на приход детей, например, воспроизводиться аудио-видеопослание от родителей, а при приходе обслуживающего персонала - указаний хозяев.

Отличительной особенностью системы безопасности умного дома от обычных охранных является выбор самой системой различных вариантов реагирования на аварийную ситуацию. Например, перекрыть нужные трубопроводы при утечке газа или воды, либо позвонить в обслуживающую организацию. Система может отключить аварийные участки электрических цепей при угрозе возгорания. Таким образом, состояние всех коммуникаций находится под постоянным контролем, и при возникновении любых неисправностей будут безотлагательно приняты соответствующие меры и послано сообщение хозяевам. А если дома один остается ребенок, можно заблокировать включение опасных для него электроприборов. Многообразие функций контроля и управления домашним хозяйством, поражают воображение, управлять такой системой, оказывается, не так уж сложно.

Есть несколько способов управления. Самый простой - с помощью кнопочной панели, где каждая кнопка соответствует какому-либо прибору, группе приборов или означает последовательность необходимых действий. Для наглядности кнопочная панель может иметь небольшой дисплей, на котором отражается информация о состоянии системы.

Самые престижные и удобные модели управления с сенсорным экраном. Такой пульт представляет собой небольшой монитор с изображением кнопок, названиями команд, поясняющими картинками. Эти модели могут также демонстрировать изображения с видеокамер.



Рис.2. Сенсорная панель.

Очень удобным является управление домом через интернет. При этом можно узнать о состоянии дома, о присутствии в нем людей, о погоде и т.д. Естественно, эта информация будет доступна только хозяевам дома.

Автоматизировать свой дом очень престижно, т.к. сейчас это одно из передовых достижений в технике. Но самое главное - то, что основной целью такой автоматизации является комфорт, ведь запомнить и осуществить кучу мелких и не очень домашних дел - от поддержания влажности и температуры до кормления рыбок и полива зимнего сада - на это требуется не только время, но и постоянное внимание хозяев, не говоря уже о системе безопасности, без которой современная жизнь просто невысказима. Поэтому система умного дома - это самая комфортная система управления домом и офисом на сегодняшний день.

Список используемой литературы:

1. <http://www.skachatreferat.ru/referaty/Умный-Дом-Реферат/16229.html>
2. <http://www.skachatreferat.ru/referaty/Умный-Дом/15419.html>
3. <http://mosgenproekt.ru/>

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ СО СТРУКТУРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Долгих В.Ю., Кононов Ю.М.*

Научный руководитель: Винокуров Б.Б., к.т.н., доцент  
Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: [Miracle777@sibmail.com](mailto:Miracle777@sibmail.com)

Все изменения в структуре материала в процессе его изготовления, обработки, зарождения и развития повреждений отражаются в соответствующих изменениях магнитных и электрофизических параметров. Появление этих изменений объясняется разворотом и перемещением доменов и междоменных границ, составляющих в совокупности доменную структуру материала. В основу методов магнитной структуроскопии положена корреляция между некоторыми магнитными и физико-механическими свойствами материалов, когда они одновременно зависят от одних и тех же факторов: химического состава, режима термообработки, напряженного состояния, накопления усталостных повреждений и др. Одной из разновидностей магнитной структуроскопии является коэрцитиметрия. В последние годы она стала широко применяться для контроля напряженного состояния металлоконструкций опасных производственных объектов различного назначения, что является весьма актуальным для технической диагностики.

Также, наиболее широко в структуроскопии используется зависимость между твердостью углеродистых и низколегированных сталей и их коэрцитивной силой [1].

Твёрдостью материала называют способность оказывать сопротивление механическому проникновению в его поверхностный слой другого твёрдого тела. Для определения твёрдости в поверхность материала с определённой силой вдавливаются тело (индентор), выполненное в виде стального шарика, алмазного конуса, пирамиды или иглы. По размерам получаемого на поверхности отпечатка судят о твёрдости материала. В зависимости от способа измерения твёрдости материала, количественно её характеризуют числом твёрдости по Бринеллю (НВ), Роквеллу (HRC) или Виккерсу (HV).

Однако применение данных методов имеет ряд существенных недостатков. Отпечаток после вдавливания индентора характеризует свойства только незначительного приповерхностного участка рабочего слоя изделия. После измерения твердости остается отпечаток, который необходимо в последующем удалить механической обработкой. Также такой вид контроля является длительным процессом измерения.

Использование неразрушающих магнитных методов контроля, в частности коэрцитивной силы ( $H_c$ ), лишено подобных недостатков. Это объясня-

ется, прежде всего, относительной простотой ее измерения, наличием корреляционных связей с большим числом структурных параметров, независимостью ее от геометрии образцов.

Коэрцитивная сила - одна из характеристик явления гистерезиса в ферромагнитных материалах, показывающая в какой степени затруднены в них процессы намагничивания (перемагничивания).

Коэрцитивная сила представляет собой напряженность магнитного поля  $H_c$ , необходимую для уменьшения остаточной намагниченности (индукции) ферромагнетика до нуля. При этом поле  $H_c$  обратно по направлению полю, создавшему эту остаточную намагниченность (индукцию). Коэрцитивная сила определяется точкой пересечения нисходящей ветви петли гистерезиса (предельной или частной) с осью напряженностей.

Приборы, служащие для измерения коэрцитивной силы называются *коэрцитиметрами*. В этих приборах используемый образец намагничивают до значения индукции  $B_m$  (для предельных циклов  $B_m = B_s$ ), а затем измеряют значение обратного магнитного поля, под действием которого остаточная намагниченность (индукция) доводится до нуля [2].

В настоящее время из-за существенного влияния изменяющихся факторов нет общей теории магнитной структуроскопии, поэтому в каждом конкретном случае приходится экспериментально находить взаимосвязь между магнитными и другими свойствами материала. Это относится и к оценке твердости по коэрцитивной силе.

Из всего вышесказанного считается актуальным обосновать возможность оценки твердости изделий, например из стали 30ХГСА с использованием в качестве информативного параметра коэрцитивной силы.

### **Материал и методика эксперимента**

В качестве образцов для исследования использовалась группа из 16 трубок из стали 30ХГСА длиной  $L=0,213$  м, наружным диаметром  $D = 0,141$  м и толщиной стенки  $h=0,0075$  м.

В качестве средства измерения коэрцитивной силы имеющихся образцов был использован коэрцитиметр импульсный микропроцессорный КИМ-2М (в дальнейшем коэрцитиметр) изготовителя ООО "НВП "КРОПУС", который обеспечивает возможность установки режима намагничивания, напряженности поля и количества импульсов намагничивания. Также, при неизменных условиях намагничивания позволяет производить кон-

троль не только по коэрцитивной силе, но и по остаточной индукции, остаточной намагниченности изделия и релаксационной коэрцитивной силе.

Эксперимент осуществлялся следующим образом: измерения производились в трех точках - с каждого края и посередине образца, после чего находилось среднее по трем показаниям значение коэрцитивной силы. Это было сделано для более точного определения коэрцитивной силы по всей геометрии образца. Рис.1 иллюстрирует корреляционную связь коэрцитивной силы и твердости с использованием линейной аппроксимации, где также количественно выражена величина достоверности аппроксимации ( $R^2$ ).

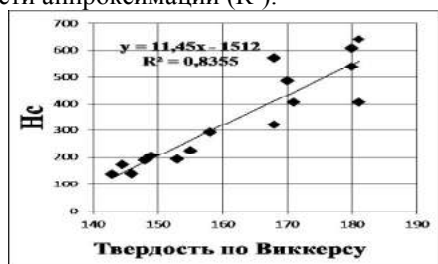


Рис.1. Корреляционная связь коэрцитивной силы и твердости

В ходе эксперимента были также задействованы дополнительные функции коэрцитиметра, а именно подключение прибора непосредственно к компьютеру и установление программного обеспечения (ПО), что обеспечило возможность сохранения результатов экспериментов и возможность построения графических зависимостей с выбором характера аппроксимации. На рис.2 приведена аппроксимированная кривая, построенная с помощью программного обеспечения коэрцитиметра.

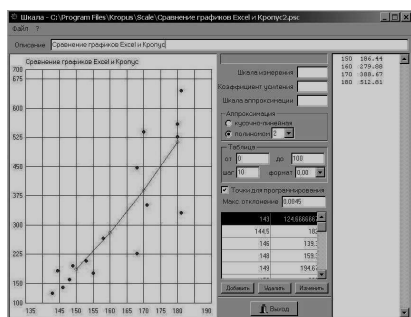


Рис. 2 Аппроксимированная кривая посредством ПО

### Результаты исследований и их обсуждение.

Из представленных рисунков, очевидно, что корреляционная связь между двумя исследуемыми

параметрами присутствует, что подтверждает возможность оценки твердости изделий из стали, с использованием в качестве информативного параметра коэрцитивной силы.

Однако повысить эффективность и достоверность контроля твердости по коэрцитивной силе возможно также за счёт применения сложных режимов намагничивания, в частности, с помощью двухчастотного метода, вследствие его высокой чувствительности к различного рода структуромеханическим свойствам [3]. Интересен тот факт, что двухчастотный метод подобен методу шумов Баркгаузена по наличию информативных параметров в виде высокочастотной части спектра сигнала индукционного преобразователя.

По данным исследований многих стран, метод эффекта Баркгаузена также можно успешно использовать для экспрессной оценки величины и знака механических напряжений, определения размера зерна, контроля твердости, наводороженности и усталостной поврежденности [4].

На основании проведенных исследований и анализа литературы считается актуальным дальнейшее исследование вопроса о повышении эффективности контроля структуромеханических параметров ферромагнитных материалов с помощью двухчастотного метода.

### Список литературы:

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В. В. Клюева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 2003. — 656 с.
2. Винокуров Б. Б. Измерение параметров магнитных полей и характеристик ферромагнитных материалов: учебное пособие / Б. Б. Винокуров; Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во ТПУ, 1998. — 123 с.
3. Ширинян О.Г. Магнитный контроль физико-механических свойств ферромагнитных материалов в сложных режимах намагничивания. Дис. канд. техн. наук.- Томск, 1984, -211 с.
4. Гришаков С.В. Оценка напряжений и повреждений в ферромагнитных материалах методом магнитных шумов / С. В. Гришаков, А. И. Ковалев; Академия наук Украинской ССР (АН УССР), Институт проблем прочности (ИПП). — Киев: Наукова думка, 1991. — 168 с.: ил. — Библиогр.: с. 158-164.

## МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗОРА

*Исакова Ю.И., Вахрушев Д.В., Холодная Г.Е.*

Научный руководитель: *д.ф.-м.н.*, А.И. Пушкарев

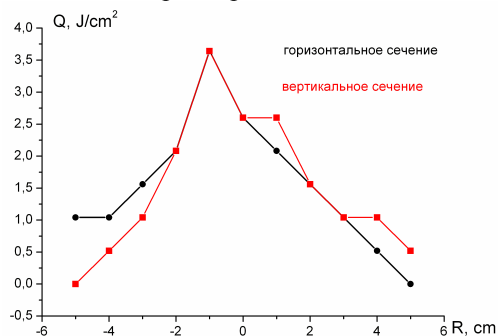
Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30

E-mail: [principessa-88@mail.ru](mailto:principessa-88@mail.ru)

### Введение

Мощные ионные пучки (МИП) с энергией от 50 keV до 10MeV, плотностью тока от 1 kA до 10MA и длительностью импульса от 10 нс до 1000 нс широко применяются для обработки поверхностей материалов. Радиационно-пучковое модифицирование позволяет получать в поверхностных слоях материалов составы и структуры, недоступные ни одному из традиционных металлургических способов [1]. В результате улучшаются свойства материалов: твердость, прочность, износостойкость; повышаются эксплуатационные характеристики изделий из них.

Для контроля и оптимизации режима обработки необходимо контролировать плотность энергии ионного пучка и однородность пучка по сечению. Распределение энергии пучка в поперечном сечении обычно измеряют секционированным калориметром [2]. Пространственное разрешение такого калориметра составляет 1-2 см. Для обеспечения пространственного разрешения 1-2 мм при площади МИП более 20 см<sup>2</sup> требуется сложная конструкция калориметра и процесс измерения занимает много времени. На рис. 1 показано распределение плотности энергии МИП, формируемого ускорителем ТЕМП-2, измеренное секционированным калориметром.



**Рис. 1.** Распределение энергии МИП в фокусе диода

Этот метод не позволяет оперативно контролировать режим работы генератора МИП в течение обработки деталей.

Цель работы – разработка метода оперативного контроля распределения плотности энергии по сечению ионного пучка.

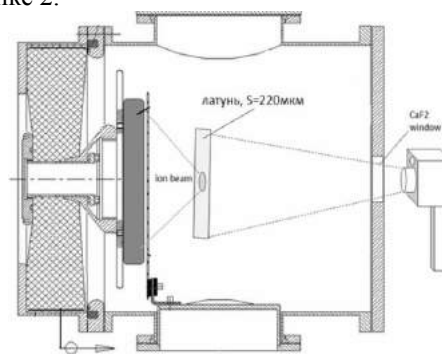
### 1. Экспериментальная установка

Исследования проводились на ионном ускорителе ТЕМП-4М [3] с параметрами: плотность ионного тока на мишени 30-300 А/см<sup>2</sup> (для различных конструкций диодов), энергия ионов 250-300 кэВ, состав пучка: ионы углерода и протоны. Для генерации ионного пучка в ускорителе ТЕМП-4М ис-

пользуется диод с магнитной самоизоляцией электронов. Исследования проводились с диодом размером 4см × 20 см. Потенциальный электрод изготовлен из графита, заземленный электрод – из нержавеющей стали с прорезями шириной 4 мм для транспортировки ионного пучка.

### 2. Методика измерения распределения плотности энергии МИП на мишени

Диагностика параметров МИП проводилась по тепловому отпечатку на мишени с использованием тепловизора [4]. Для регистрации температурного поля применялся телевизор Fluke TiR10 (спектральный диапазон 7-14 мкм). В качестве мишени использовалась латунная пластинка толщиной 80 - 220 мкм. Тепловой отпечаток пучка регистрировали через выходное окно из фторида кальция (CaF<sub>2</sub>), расположенное на фланце диодной камеры. Схема эксперимента приведена на рисунке 2.

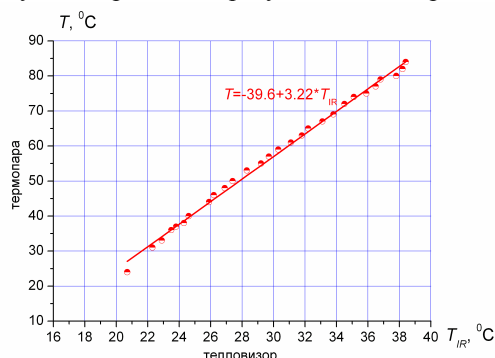


**Рис. 2** Схема измерения распределения плотности энергии МИП

Латунь имеет достаточно низкий коэффициент излучения  $\epsilon = 0,03$ , поэтому с помощью тепловизора невозможно точно измерить температуру латунной пластинки. Для увеличения коэффициента излучения латуни задняя (от ионного пучка) сторона мишени покрывалась черной матовой краской ( $\epsilon_{\text{матл}} = 0,90$ ). Фторид кальция имеет неоднородное пропускание в разных диапазонах длин волн инфракрасного излучения, в результате чего ИК поток, проходя через CaF<sub>2</sub> окно, ослабевает и тепловизор регистрирует заниженные значения температуры на мишени. Поэтому была выполнена калибровка показаний тепловизора. Для установления зависимости затухания теплового потока при прохождении через CaF<sub>2</sub> окно использовалась латунная ванночка, в которую наливалась теплая вода. Температура воды в диапазоне от 70 C<sup>0</sup> до 18 C<sup>0</sup> измерялась тепловизором без CaF<sub>2</sub> окна и с ним. Дополнительно показания тепловизора температуры воды в ванне сверялись



с показаниями ртутного термометра и термопары. На рисунке 3 приведены результаты калибровки.



**Рис. 3** Градуировочный график для окна из  $\text{CaF}_2$

Градуировочную кривую аппроксимировали линейной функцией, коэффициенты рассчитывали методом наименьших квадратов. Погрешность аппроксимации не превышала 5%. Эту линейную функцию использовали в дальнейшем для расчета плотности энергии МИП. Количество энергии  $Q$ , выделяемое в мишени при облучении, равно:

$$Q = c_v \cdot m \cdot \Delta T = c_v \cdot S \cdot d \cdot \rho \cdot \Delta T, \text{ Дж}$$

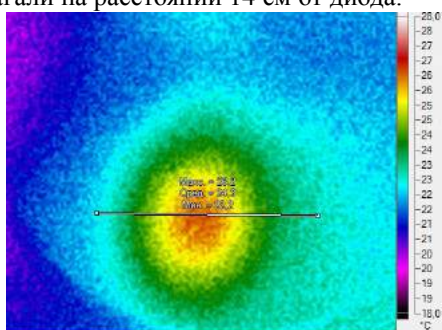
где  $c_v$  - удельная теплоемкость латуни,  $S$  - площадь мишени,  $d$  - толщина мишени,  $\rho$  - плотность латуни,  $\Delta T$  - нагрев мишени.

Плотность энергии пучка  $J$  может быть определена по формуле:

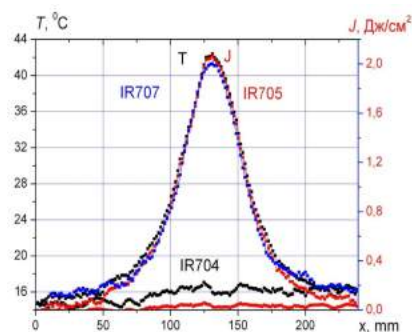
$$J(x, y) = \frac{Q}{S} = c_v \cdot d \cdot \rho \cdot \Delta T, \text{ Дж/см}^2$$

### 3. Исследование распределения плотности энергии МИП по сечению

На Рис. 4 приведены характерные тепловые отпечатки МИП, генерируемого диодом фокусирующей геометрии. Величина анод-катодного зазора 8 мм, латунную мишень толщиной 220 мкм располагали на расстоянии 14 см от диода.



**Рис. 4.** Тепловой отпечаток МИП на выходе фокусирующего полоскового диода. Расстояние диод-мишень 14 см



**Рис. 5.** Распределение температуры и плотности энергии МИП по сечению

По данным распределения теплового поля на мишени, с учетом коэффициента пропускания окна (см. рис. 3), было рассчитано распределение температуры и плотности энергии МИП по сечению (рис.5).

Разработанный метод тепловизионной диагностики является более информативным по сравнению с методом измерения калориметром (рис.1) и позволяет получать распределение плотности энергии пучка на мишени с пространственным разрешением 1 мм.

### Заключение

Диагностика МИП по тепловому отпечатку - это эффективный метод для быстрой оценки распределения плотности энергии пучка. Он обеспечивает измерение профиля пучка после одного импульса. Порог температурной чувствительности тепловизора Fluke TiR составляет  $0.1^\circ\text{C}$ , что позволяет измерять плотность энергии пучка в диапазоне  $0.05\text{--}5 \text{ Дж/см}^2$ . Время измерения не превышает 0.1 с, поэтому тепловизионную диагностику можно использовать при автоматизации обработки деталей с контролем параметров облучения на каждом импульсе.

### Список литературы:

1. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные ионные пучки.- М.: Энергоатомиздат, 1984.-152 с.
2. Москалев В.А., Сергеев Г.И. Измерение параметров пучков заряженных частиц. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
3. G.E. Remnev, I.F. Isakov, A.I. Pushkarev, et al., Surface and Coatings Technol., 114, 206 (1999)
4. H.A. Davis et al. J. Appl. Phys., Vol. 82, No. 7, 3223 (1997)

## СИСТЕМА УЧЕТА РАСХОДА ВОДЫ

*Кадалова Е.В.*

Научный руководитель: Степанов А.Б, ст. преподаватель  
Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: pomidorka\_1@sibmail.com

Ни для кого не секрет, что на планете Земля содержится около 1500 млн. км<sup>3</sup>, причем всего 3% составляет пресная вода из них 2% сосредоточено во льдах полярной зоны, т.е. в ледниках, и, следовательно, 1% находится в свободном распоряжении. На сегодняшний день все чаще встречаются системы и технологии направленные на сбережение затрат ресурсов и в рациональном использовании их. Одним из необходимых ресурсов является вода.

Несмотря на простоту воды ее нельзя заменить другим продуктом и, соответственно, стоит вопрос о ее сохранении и сбережении. Для этого есть простой способ – установить счетчики расхода воды в квартиры домов и отслеживать учет используемой воды.

В системах учета получили распространение три способа снятия показаний о расходе воды в отдельной квартире:

- 1) Автоматический дистанционный;
- 2) Портативное устройство съема информации;
- 3) Ручной.

Из представленных способов в настоящее время наиболее оптимальным считается способ с автоматической дистанционной передачей.

Рассмотрим принцип организации передачи данных о расходе воды между потребителем и диспетчерским пунктом. Установленные в каждой квартире счетчики воды (на холодную и горячую воду) собирают данные о расходе и передают их на контроллер, установленный в этой квартире. Далее информация передается на общедомовой контроллер, его задача принять данные со всех квартир и отправить их в диспетчерский пункт, где полученные данные систематизируются и обрабатываются с помощью специального программного обеспечения. Назначение данного программного обеспечения состоит в обработке информации о текущем расходе воды и ведение архива для каждого потребителя. В дальнейшем потребителю приходит квитанция о потреблении воды.

У этого способа есть ряд достоинств, таких как циклический опрос счетчиков; выдача данных и обмен информацией между потребителем и диспетчером; учет времени работы прибора в часах (дата и время); оперативное отключение/подключение или ограничение водопотребления диспетчером и защита от несанкционированного водопотребления.

Система диспетчеризации бывает двух видов: локальная и удаленная. Заметим, что локальная

диспетчеризация, когда диспетчер находится в непосредственной близости от объекта, уже не удовлетворяет современным требованиям. Поэтому для передачи данных расхода воды применяется удаленная диспетчеризация, так как она может осуществлять передачу параметров от одной или нескольких автоматизированных систем с территориально удаленных объектов на центральную станцию диспетчеризации, с помощью различных каналов передачи данных.

Таким образом, уже персональные компьютеры автоматизированных рабочих мест диспетчеров объединяются в локальную сеть следующего уровня, которая в свою очередь может быть физически организована на базе телефонных каналов, оптоволоконного кабеля, радио или сотовой связи по протоколам Internet, Intranet и т.д.

Передачу данных можно осуществлять с помощью кабеля или беспроводным способом.

Беспроводные технологии стали наиболее динамичной областью в сфере связи и организации сети. Быстрое распространение мобильных телефонов, различных спутниковых служб, и беспроводного интернета приводит к значительным уменьшениям в характере коммуникаций и сетей.

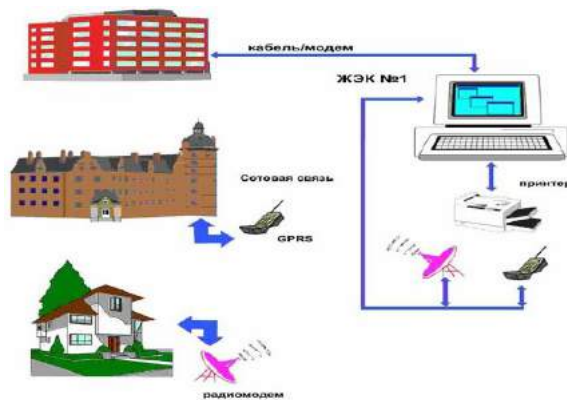


Рис. 1. Организация обмена данными между домами и диспетчером

На рис. 1 показаны различные варианты объединения домов в локальную сеть диспетчеризации. Информация, полученная каждым ЖЭКом, отправляется на следующий уровень – диспетчеру района. Общедомовые контроллеры могут передавать информацию по кабелю, по телефонным проводам (модему), по сотовому каналу (GPRS, SMS сообщения), по радиоканалу через радиомодем.

Распространенными видами осуществления передачи данных к диспетчеру являются:



1) Объект, узел сбора информации, GPRS модем, Internet, устройство подключения к сети Internet, диспетчер;

2) Объект, узел сбора информации, радио модем, радиоканал, радио модем, диспетчер;

3) Объект, узел сбора информации, GSM модем, sms – сообщения, сеть GSM, sms – сообщения, GSM модем, диспетчер;

4) Объект, контроллер, GSM модем, sms – сообщения, сеть GSM, sms – сообщения, GSM модем, диспетчер;

Объект, контроллер, модем, телефонная станция, модем, диспетчер;

5) Объект, узел сбора информации, модем, телефонная станция, модем, диспетчер;

6) Объект, узел сбора информации, интерфейс обмена информацией RS – 485, адаптер связи, диспетчер [1].

Каждый из способов передачи данных информации имеет свои достоинства и недостатки, и может быть применен в конкретных случаях по удаленности объекта диспетчеризации и экономическим показателям монтажа и последующей эксплуатации[2].

Выбранная сеть должна удовлетворять некоторым требованиям: высокая пропускная способность, возможность охвата небольших расстояний, связность подключенных станций и возможность широко вещания. Кроме этого, существует набор требований, характерных только для локальных беспроводных сетей. Важнейшие из них: производительность, число узлов, соединение с локальной магистральной сетью, обслуживаемая область, устойчивость передачи и безопасность, совместная работа в сети, переключение/роуминг, динамическая конфигурация [3].

Укажем достоинства и недостатки различных вариантов построения сети.

Преимущества кабельной сети: защищенность от атмосферных помех и излучений солнца; высокую степень безопасности данных.

Недостатки: прямая передача сигнала сильно влияет на обратную передачу, поскольку вся информация передается по одному каналу.

Преимущества GSM/GPRS: широкое распространение; широкий набор методов и тарифных планов.

Недостатки GSM/GPRS: не везде достаточный уровень сигнала для уверенного приема; сложности при решении технических вопросов в "глубинке" с операторами GSM.

Преимущества радиоканала: относительная дешевизна радиомодемов с не лицензируемыми

диапазонами частот; гибкость при построении радиоканала.

Недостатки радиоканала: сложности при решении технических вопросов в "глубинке"; в общедоступных каналах могут возникнуть коллизии с другими радиосистемами.

В таблице 1 представлены основные характеристики различных каналов связи. Анализ этих характеристик позволяет сделать вывод о том, что самым дешёвым способом передачи является кабельная связь, а самым дорогим – сотовая связь (по эксплуатационным затратам). Несмотря на это беспроводная связь обладает преимуществами перед кабельной связью, такими как: высокая скорость доступа в интернет; возможность подключаться к сети другого типа; мобильность; легкость создания и реструктуризация [4]. Кроме того, локальные беспроводные сети экономят средства на прокладку кабеля локальных сетей, облегчают задачу передислокации и другие модификации структуры сети.

Таблица 1. Сравнительная характеристика каналов связи

Канал связи	Дальность	Надежность	Стоимость
Кабельная сеть	Не ограничена	Низкая	Низкая
GPRS/GSM	Ограничена зоной сотовой связи	Средняя	Средняя/Высокая
Радиоканал	До 10 км в условиях прямой видимости	Высокая	Высокая

Таким образом, наиболее рациональным способом передачи связи между контроллером в квартире и общедомовым контроллером является радиоканал, а передачу данных в диспетчерский пункт лучше установить через беспроводную связь: используя радиоканал либо GSM модем, так как в этом случае передача данных может осуществляться на большие расстояния и без дополнительных затрат на материалы.

#### Список литературы

1. <http://www.kontel.ru/disp.htm>
2. <http://www.nanko.ru/disp/reshzhkh.htm>
3. Столлингс В., Беспроводные линии связи и сети.: Пер. с англ. - М., Издательский дом «Вильямс», 2003г., с 640.

<http://www.alkor94.kz/category/besprovodnaya-set-svoimi-rukami/topologiya-i-standarty/preimushhestva-i-nedostatki-besprovodnoj-seti/>

## АКТУАЛЬНОСТЬ МНОГОСТАДИЙНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*Кононов Ю.М., Долгих В.Ю.*

Научный руководитель: Гольдштейн А.Е., д.т.н., профессор, Винокуров Б.Б., к.т.н., доцент.  
Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: [association@sibmail.co](mailto:association@sibmail.co)

В последние годы в связи с истощением месторождений возникла острая необходимость открытия новых месторождений и разработки трудноизвлекаемых запасов с помощью методов повышения нефтеотдачи. В этой связи, перспективы освоения в России все возрастающей доли трудноизвлекаемых запасов связаны с газовыми методами увеличения нефтеотдачи. При реализации таких методов огромное значение играет подготовка, регулировка, контроль и мониторинг процесса газового воздействия. Также в процессе разработки возникает необходимость контролировать и уточнять состояние залежей с учетом новых сведений о месторождении.

Таким образом, разработка принципиально нового комплекса и алгоритма мероприятий для мониторинга и контроля протекания процесса при реализации газового воздействия на нефтяные пласты имеет не только большое научное, но и большое практическое значение.

Комплекс мероприятий по мониторингу и контролю состояния пласта и процесса газового воздействия должен предусматривать исследования перед началом реализации технологии газового воздействия (в том числе лабораторные исследования и математическое моделирование), в процессе её проведения и после завершения опытно-промышленных работ.

Предлагается следующая методика:

В период подготовки к реализации:

-предлабораторное математическое моделирование эксперимента

- физическое моделирование (лабораторные исследования)

В процессе применения технологии:

- мониторинг за состоянием пласта с помощью постоянно действующей геолого-технологической модели

- контроль технологических параметров разработки

- сейсмомониторинг

После завершения опытно-промышленных работ

- анализ применимых технологий (для уточнения и внесения корректировки в методику разработки).

Рассмотрим мероприятия более подробно:

### 1. Мероприятия, предусматриваемые в период подготовки к реализации:

- **Физическое моделирование** подразумевает лабораторные исследования на керне целевых месторождений, с осуществлением контроля основных технологических параметров процесса газового воздействия. Данная стадия является одной из важнейших на этапе подготовки к реализации данного метода, т.к. успешность дальнейшей реализации в значительной степени зависит от корректности данных, полученных в процессе лабораторных исследований, т.е. возможности предсказания, прогноза поведения реального нефтеносного пласта. Подготовка к лабораторным исследованиям подразумевает выбор подходящей методики лабораторных исследований, опираясь на мировой и отечественный опыт [1,2].

- **Математическое моделирование** подразделяется на моделирование результатов лабораторных исследований (предшествующее физическому моделированию) и моделирование с использованием модели реального пласта (моделирование, опирающееся на результаты физического моделирования). Моделирование, предшествующее лабораторным исследованиям, подразумевает адаптацию модели к результатам физического моделирования, т.е. к определённой методике эксперимента. Моделирование с использованием модели реального пласта подразумевает прогноз поведения нефтеносного пласта в целом и наблюдение за процессом вытеснения нефти во времени. Для успешного моделирования необходимы корректные входные данные, полученные путём лабораторных исследований. В случае моделирования термогазового воздействия, моделирование осложняется необходимостью учёта изменения температуры пласта и особенностей протекающих химических реакций [1,4]

### 2. Мероприятия, предусматриваемые в процессе применения технологии:

Процесс контроля за разработкой месторождений осуществляется на протяжении всего периода его эксплуатации и используется для решения целого ряда вопросов. Данный процесс основывается на обработке и анализе получаемой информации: планирование видоизменений и уточнений принятой системы разработки, оптимизации работы скважин, определение степени выработки запасов нефти, энергетического состояния залежей, технического состояния скважин и скважинного оборудования, и т.д.

Контроль за разработкой нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений направлен на обеспечение оптимальных условий выработки запасов нефти с учетом законодательства Российской Федерации и существующих регламентирующих и проектных документов. Комплекс работ по контролю и регулированию разработки месторождения определяется особенностями его строения, степенью изученности, технологическими и техническими возможностями, экологическими и финансовыми ограничениями проведения различных видов работ.

Комплекс по контролю за состоянием пласта в процессе реализации газового воздействия может сочетать в себе следующие пункты:

- мониторинг за состоянием пласта с помощью постоянно действующей геолого-технологической модели, который подразумевает постоянную корректировку и адаптацию модели с учетом новой информации о месторождении.

-использование внутрискважинных исследований. Среди всех методов ведущее место, при контроле за разработкой нефтяных месторождений, занимают промыслово-геофизические методы исследования скважин целью которых является получение информации о состоянии и изменениях, происходящих в продуктивных пластах в процессе их эксплуатации [3].

- сейсмомониторинг проводится несколько раз за историю разработки - с целью контроля за состоянием пласта. В процессе разработки, может проводиться повторная сейсмическая съемка, которая носит название 4-мерной сейморазведки, или сейсмомониторинга. Путем сравнения различных параметров сейсмических данных, находятся различия, и интерпретируются с позиций изменения положения водонефтяных, газонефтяных контактов, насыщенности, давления – того, что действительно могло измениться в пласте за время разработки и значимо для сейморазведки.

При закачке газа происходит замещение им нефти в пласте, в результате этого, плотность

скачкообразно падает. При последующем же снижении давления процесс ее снижения продолжается, поэтому при газовых методах воздействия на нефтяные пласты сейсмомониторинг является очень эффективным инструментом контроля.

#### **Выводы:**

Изучены и выявлены проблемы контроля возникающие при реализации газовых методов воздействия на нефтяные пласты.

Необходим комплексный подход на каждом шаге подготовки, при проведении лабораторных исследований и реализации метода.

Комплекс мероприятий по мониторингу и контролю является необходимой частью при подготовке и реализации данного метода.

Мероприятия при подготовке и реализации газового воздействия должны включать в себя исследования перед началом реализации технологии, в процессе её проведения и после завершения опытно-промышленных работ.

Особое внимание необходимо уделять лабораторным исследованиям т.к. успешность дальнейшей реализации в значительной степени зависит от корректности данных полученных в их результате.

Список литературы:

1. Fraim M. L., Moffitt P. D., Yannimaras D. V. Laboratory Testing and Simulation Results for High Pressure Air Injection in a Waterflooded North Sea Oil Reservoir // SPE 38905, copyright 1997
2. “Газовые и водогазовые методы воздействия на нефтяные пласты” под редакцией С.Г. Степановой – М.: Газойлпресс, 2006 – 200 с.
3. В.Е. Косарев Контроль за разработкой нефтяных и газовых месторождений: пособие для самостоятельного изучения для слушателей курсов повышения квалификации специальности «Геофизика». – Казань: Казанский государственный университет, 2009. - 145 с.
4. А.А. Боксерман, Ямбаев М.Ф. Метод закачки и внутрислоевой трансформации воздуха на месторождениях легкой нефти // Сб. док. 12 Европейского симпозиума по повышению нефтеотдачи. – Казань, 2003., с. 64-68

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ НАГРЕВ ИЗДЕЛИЙ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

*Куликова И. В.*

Научный руководитель: Ширяев В.В., к.т.н., доцент  
Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
e-mail: sku4ajka@mail.ru

Процедура неразрушающего контроля включает в себя две операции: воздействие на контролируемый объект и регистрацию его отклика на воздействие. Применительно к АТНК (Активному тепловому неразрушающему контролю) это соответствует операциям нагрева (охлаждения) объектом контроля и регистрации температурного поля на поверхности объекта контроля. Изделия из углепластика и стеклопластика хорошо поддаются АТНК, так как коэффициент излучения материалов в инфракрасном диапазоне  $\approx 1$ , следовательно, их можно рассматривать как абсолютно черные тела. Углепластики используются вместо металлов во многих изделиях — от частей космических кораблей до удочек:

ракетно-космическая техника, авиатехника (самолётостроение, вертолётостроение), судостроение (корабли, спортивное судостроение), автомобилестроение (спортивные автомобили, мотоциклы, усиление железобетонных конструкций, спортивный инвентарь (велосипеды, хоккейные клюшки, лыжный спорт (лыжи, палки, ботинки), лезвия коньков, стрелы, оборудование виндсерфинга), медицинская техника, рыболовные снасти (удилища), бытовая техника (отделка корпусов телефонов, ноутбуков и пр.)

Температура, как количественный показатель внутренней энергии тел является универсальной характеристикой объектов и процессов физического мира, в котором непрерывно происходит генерация, преобразование, передача, накопление и использование энергии в ее различных формах. Очевидно, что анализ тепловых процессов позволяет получить разнообразную информацию о состоянии объектов и протекании физических процессов в природе, энергетике, строительстве, промышленности и медицине.

Общеизвестно, что благодаря высокой удельной прочности и удельной жесткости композиционные материалы, армированные углеродными волокнами, широко применяются в качестве основных конструктивных материалов в самолетостроении. Высокие механические характеристики углеродных волокон позволяют получать высококачественные материалы - углепластики.

Масса самолета без топлива и коммерческой нагрузки примерно в два раза меньше массы снаряженного самолета, в том числе около 30% приходится на различные конструкции планера. Снижение веса этих конструкций благодаря использованию современных материалов позволяет уменьшить габариты двигателя и т. д. и приводит к снижению расхода горючего. Снижение массы конструктивных материалов всего на 1 кг приво-

дит к снижению общей массы самолета на 3-7 кг. Использование композиционных материалов в производстве самолетов позволяет также снизить их общую стоимость и гибко варьировать условия проектирования.

В военной промышленности разработка и применение композиционных материалов на основе углеродных волокон в основном направлена на создание военных самолетов. Сведений о применении углепластиков в производстве другой военной техники очень мало вследствие засекречивания проводимых работ.

При контроле с криволинейной поверхностью необходимо учитывать артефакты, возникающие из-за отражения постороннего теплового излучения, геометрического искажения проекций внутренних дефектов, так же связанных с кривизной поверхности.

Но узкие подповерхностные трещины, расположенные перпендикулярно передней поверхности, практически не обнаруживаются при равномерном нагреве (поверхностные дефекты могут быть видны на мониторе тепловизора из-за чисто радиационного феномена: трещина выступает в качестве имитатора «черного тела» с повышенным коэффициентом излучения). Такие дефекты можно выявить, если в изделии создан тепловой поток, распространяющийся параллельно передней поверхности. Для этого изделие следует нагревать на поверхности в локальной зоне.

Поэтому на металлургических предприятиях, в основном, применяют УЗВ метод, причем ввод и сьем ультразвукового излучения производят через струю воды.

Ультразвуковой контроль - один из самых популярных методов неразрушающего контроля, использующий для выявления дефектов материалов ультразвуковые волны.

С целью повышения качества и надежности производства продукции в различных отраслях народного хозяйства: энергетике, металлургии, тяжелом и химическом машиностроении, на железнодорожном транспорте, в судостроении, в строительстве газопроводов и в других отраслях проводят неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль является наиболее популярным методом получения информации о дефектах, расположенных на значительной глубине в различных материалах, изделиях и сварных соединениях.

Сочетание ряда характерных для ультразвукового неразрушающего контроля свойств делает этот вид контроля во многих случаях практически незаменимым. Данный метод является превентив-

ной мерой прогнозирования и предотвращения неисправностей, аварийного выхода из строя машин, механизмов, металлоконструкций, трубопроводов нефте-газоснабжения, сосудов и аппаратов, работающих под высоким давлением, поковок, листового проката, труб и других видов продукции. Эта работа выполняется операторами-дефектоспистами.

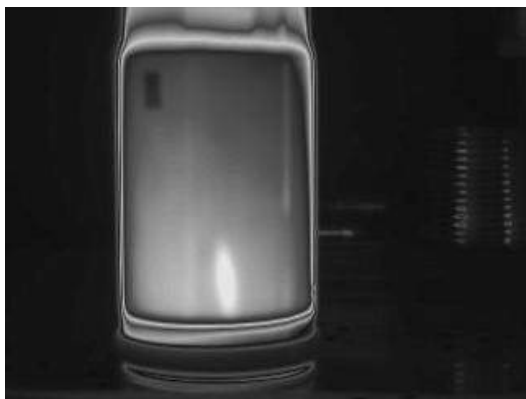


Рис. 1. Утонение цилиндрической поверхности.

На рисунке 1 показан нагрев изделия с цилиндрической поверхностью внешним источником.

Эксперимент проводился следующим образом: в большой пластиковый стакан заливалась горячая вода. С помощью тепловизора регистрировалось распределение температур.

Для оценки эффективности нагрева поверхностью внешним источником, произведем нагрев изделия с цилиндрической поверхностью при помощи ультразвука.

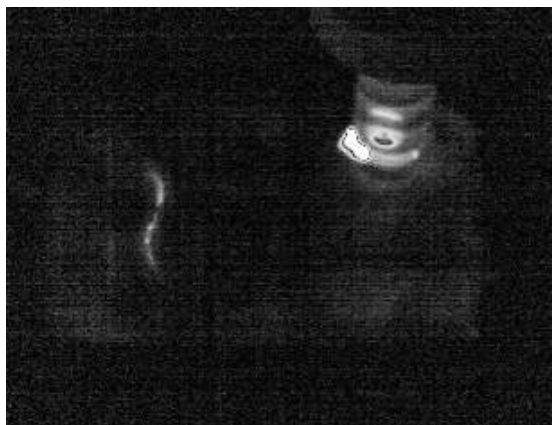


Рис. 2. Трещина в цилиндрической поверхности.

На рисунках 2 и 3 изображен нагрев изделия с цилиндрической поверхностью при помощи ультразвука.

Как видно из полученных термограмм при нагреве изделия с помощью ультразвука, отчетливо проявляется дефект.



Рис. 3. Трещина в цилиндрической поверхности.

Из этого следует, что ультразвуковой нагрев более эффективен, так как при нагреве изделия внешним источником нельзя говорить о геометрических размерах дефекта, в связи с тем, что дефект проявляется плохо.

#### Заключение

Таким образом, при исследовании криволинейных поверхностей источником нагрева должен выступать сам дефект, поэтому используется ультразвуковой нагрев. Это обусловлено концентрацией энергии в месте дефекта.

#### Литература

1. Справочник Дж. Любина «Композиционные материалы», М., 1988.
2. Справочник Р. Зигель, Дж. Хауэлл «Теплообмен излучением», Издательство «Мир», М., 1975.
3. Куликова И.В. АТНК изделий с цилиндрической поверхностью // Современные техника и технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 3-х томах - Томск, ТПУ. - 12-16 апреля 2010. - Томск: Изд. ТПУ. - 2010 - Т. 1. - с. 230-231.

Куликова И. В. Особенности активного теплового неразрушающего контроля изделий с криволинейной поверхностью // Информационно-измерительная техника и технологии: сборник материалов I Научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры «Информационно-измерительная техника» Национального исследовательского Томского политехнического университета / под ред. А.В. Юрченко - Томск, ТПУ. - 25-26 февраля 2010. - Томск: Изд. ТПУ. - 2010. - с. 87-88.

## ТЕХНОЛОГИЯ PLC И НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА

*Николенко К. В., Юрченко А. В.*

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30

E-mail: [rubos\\_saboteur@mail.ru](mailto:rubos_saboteur@mail.ru)

О технологии PLC (Power Line Communication) или «Связь по электросети» так или иначе слышали многие, однако о реальных возможностях технологии осведомлено лишь небольшое количество специалистов. Отчасти это связано с информационной политикой производителей и невнятным маркетингом, который не учитывал российские реалии, отчасти виноваты болезни роста, поскольку первая и вторая версия стандарта работали не так хорошо, как хотелось бы. В этом обзоре представлен свежий взгляд на возможности этой интересной технологии, которая базируется на стандарте, одобренном IEC в 2006 году. Этот стандарт обеспечивает физическую скорость передачи данных до 200 Мбит/сек в режиме полу-дуплекс, что соответствует максимальной скорости передачи реальных данных 80 мбит/сек в полнодуплексном режиме. Максимальная скорость ниже пропускной способности FastEthernet из-за издержек на служебный трафик и избыточность данных для протокола коррекции ошибок.

PLC технологии сейчас находятся на этапе становления и бурного развития, особенно в Европе и США. В 2000 году был образован HomePlug Powerline Alliance – консорциум компаний производящих электрооборудование, поставщиков эл. энергии, провайдеров сетей (интернет и телевидение). И уже к 2005 году был создан стандарт HomePlug AV в котором требовались скорости передачи данных от 14 до 200 Mbit/s. Что уже значительно, но это можно считать 2-м поколением PLC.

В настоящее время технологии продвинулись еще дальше. И третье поколение PLC не заставит себя ждать. В феврале 2011 года (в момент написания статьи) принимается новый стандарт IEEE 1901. В этом стандарте не только еще больше повышаются скорость передачи данных и их надежность, но и применяются новые методы передачи. Так в PLC 2-го поколения (имеется ввиду HomePlug AV, деление на поколения условное и применяется автором для наглядности) применялась только ортогонального частотно-разделенного мультиплексирования (OFDM). В PLC 3-го поколения применяется уже Dual PHY, т.е двойной физический уровень передачи данных. И это действительно так: вместе с FFT OFDM применяется Wavelet OFDM modulation, т.е. ортогональное частотно-разделенное мультиплексирование, но с применением вейвлетов. Что позволяет в несколько раз поднять скорость передачи данных. И по расчетам специалистов с применением IEEE 1901 она должна достичь 500 Mbit/s. (!)

### Суть технологии.

Принципы работы PLC 3-го поколения не слишком отличаются от принципов 1 и 2-го поколений. Поэтому, для наглядности некоторые детали будут опущены, но сути технологии это не меняет.

Итак, основой технологии Powerline, или PLC, является использование частотного разделения сигнала, при котором высокоскоростной поток данных разбивается на несколько относительно низкоскоростных потоков, каждый из которых передается на отдельной поднесущей частоте с последующим их объединением в один сигнал.

При использовании обычного частотного мультиплексирования (FDM - Frequency-Division Multiplexing) защитные интервалы (Guard Band) между поднесущими, необходимые для предотвращения взаимного влияния сигналов, довольно велики, поэтому доступный спектр используется не очень эффективно.

В случае же ортогонального частотно-разделенного мультиплексирования (OFDM), центры поднесущих частот размещены так, что пик каждого последующего сигнала совпадает с нулевым значением предыдущих (рис.1). Такое размещение позволяет более эффективно использовать доступную полосу частот.

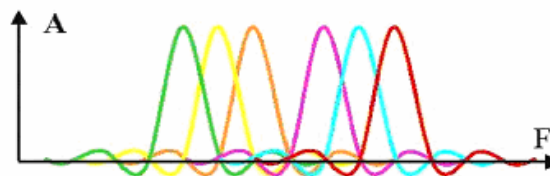


Рис. 1. OFDM

Перед тем как отдельные поднесущие частоты будут объединены в один сигнал, они претерпевают фазовую модуляцию, каждая -- своей последовательностью бит.

После этого все они проходят через PowerPacket engine и собираются в единый информационный пакет, который еще называют OFDM-symbol. На рисунке 2 приведен пример относительной квадратурной фазовой манипуляции (DQPSK - Differential Quadrature Phase Shift Keying) на каждой из 4-х поднесущих частот в диапазоне 4-5 МГц.

Реально в технологии Powerline используются 84 поднесущие частоты в диапазоне 4-21 МГц. Теоретическая скорость передачи данных при использовании параллельных потоков с одновременным фазовым модулированием сигналов составляет более 100 Мб/с. Адаптация к физической среде, устранение ошибок и разрешение конфликтов. При передаче сигналов по бытовой сети электропитания могут возникать большие затухания в



передающей функции на определенных частотах, что приведет к потере данных.

В лабораторных условиях была построена АСКУЭ на этапе т.н. «последней мили» с применением оборудования компании «Инкотекс». Согласно проведенным исследованиям затухание PLC гораздо меньше ожидаемого. Получение PLC пакетов в рамках одной ТП составило 100%. Т.о. технология PLC как нельзя лучше подходит для локальных сетей сбора-передачи данных.

АСКУЭ осуществляет контроль не только за потреблением от городской сети, но и от солнечного энергетического комплекса мощностью 240 Вт. Учитывает сгенерированную и потребленную электроэнергию. За счет чего мы можем оценивать эффективность использования энергетического комплекса для освещения.

На отечественном рынке технология PLC известна прежде всего решениями типа «Домашняя сеть по электропроводке» которые представлены такими брендами как Zyxel, Dlink, Qlan. А также представлены системы сбора передачи данных в рамках АСКУЭ, здесь существует перспектива объединения технологической сети сбора данных и коммерческой сети предоставления доступа. Плюсы применения PLC очевидны:

+ нет необходимости прокладывать новые сети.

+ готовая инфраструктура (электросети уже обслуживает электрокомпания, а значит нет необходимости увеличивать тариф)

Но у PLC есть и свои минусы. При этом существует множество неверных представлений о них. Давайте разберемся.

#### **Мифы и факты о PLC**

Технология PLC проделала непростой путь от непонятно работающих поделок до решений операторского класса. На этом пути в разное время у разных людей возникали различные впечатления, которые превратились в устойчивые мифы[1]. Рассмотрим некоторые из них:

- Технология PLC медленная и ненадежная.
- Существуют устройства, которые при включении «блокируют» всю сеть и с этим ничего сделать нельзя.
- После развертывания PLC сети возможно возникновение помех в радиостанциях.
- В России плохие электросети, поэтому у нас эта технология никогда хорошо работать не сможет.

На самом деле часть, а зачастую и все вышеперечисленное не соответствует действительности:

- Ранние версии стандартов работали недостаточно надежно. Третье поколение устройств может похвастать высокой надежностью, а алгоритмы и протоколы непрерывно совершенствуются в регулярно выпускаемых обновлениях программного обеспечения.

- Устройства, которые оказывают влияние на PLC, хорошо известны. Это мощные электродвигатели, используемые в кондиционерах, холодильниках, и т.п. Способы борьбы тоже известны — использование специализированных недорогих фильтров и правильный дизайн PLC сети.

- При передаче даже по очень хорошему силовому кабелю сигнал быстро затухает, при передаче же по воздуху, например в коттеджной застройке, сигнал не оказывает ощутимого влияния на технику, работающую в поселке, поскольку линии электропередач и оборудование достаточно удалены друг от друга;

- Существуют совершенно разные типы электросетей. Для технологии PLC важны материал, толщина проводов, их геометрия, качество соединений, количество разветвлений. В России была очень хорошая школа электроэнергетики. В некоторых местах электропроводка, проложенная 30-40 лет назад, и сейчас обслуживает потребителей, увеличивших свое потребление в несколько раз благодаря советскому запасу прочности.

Кроме мифов существуют и вполне определенные нюансы, вызванные физическими особенностями распространения сигнала, которые существенно сужают сферу применения решений на базе PLC.

- В алюминиевой проводке затухание сигнала сильнее, чем в медной, что сокращает дальность связи примерно в 2 раза.

- В подземных кабелях из-за свойств земли затухание сигнала в 2-3 раза больше. Однако на передачу сигнала в электросетях, в основном, влияет не ослабление, а уровень шума, который в подземных коммуникациях существенно ниже.

- Развертывание PLC зачастую дешевле т.к. нет необходимости проектировать и прокладывать дополнительные коммуникационные сети.

- Устройства маршрутизации не сложнее чем в LAN-сетях.



## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ БОЛЬШИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

*Пустовойт А.В., Миляев Д.В.*

Научный руководитель: Миляев Д.В., к.т.н., доцент  
Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: sashatpu@sibmail.com

Для измерения больших сопротивлений разработано значительное количество способов и схем. Конкретный выбор схемы определяется, исходя из различных соображений: характер измеряемого сопротивления, предполагаемая его величина и другие. Каждый из вариантов имеет свои особенности. В данной статье представлен краткий обзор основных методов измерения больших сопротивлений, их достоинства и недостатки.

Методы измерения больших сопротивлений можно разделить на две основные группы: методы непосредственной оценки и методы сравнения.

Измерительные схемы омметров на основе методов непосредственной оценки содержат преобразователи измеряемого сопротивления в пропорциональное значение промежуточной величины, более удобной для измерения (напряжение, ток, интервал времени и т. д.).

В методе преобразования сопротивления в ток используется источник образцового напряжения, в цепь которого включено измеряемое сопротивление. Напряжение  $U_0$ , приложенное к измеряемому сопротивлению  $R_x$ , вызывает в цепи ток  $I_x$ , обратно пропорциональный измеряемому сопротивлению:  $I_x = U_0 / R_x$ .

В отличие от метода амперметра-вольтметра (в данной статье не рассматривается), в котором необходимо измерение двух различных величин, здесь, из-за использования образцового источника напряжения, отпала необходимость в измерении напряжения, но проблема измерения тока, величиной порядка несколько пикоампер осталась.

Обратный рассмотренному выше – метод преобразования сопротивления в напряжение, в котором используется источник образцового тока с очень большим входным сопротивлением, в цепь которого включается измеряемое сопротивление. Напряжение на резисторе прямо пропорционально измеряемому сопротивлению. Следует отметить, что даже при токе в 1мА и измеряемом сопротивлении 1ГОм напряжение будет 1ГВ, следовательно – необходимо использовать источник тока очень маленькой величины (порядка пикоампер).

Рассмотрим несколько известных схем, использующий данный метод. К ним относится схема с линейной шкалой, изображенной на рис. 1, в которой измеряемое сопротивление включается в цепь обратной связи операционного усилителя. Принцип работы заключается в следующем: ток  $I_0$  создается источником образцового напряжения  $U_0$  и равен  $U_0 / R_0$ . При входном сопротивлении усилителя много больше измеряемого, он практически весь протекает через измеряемое сопротивление  $R_x$ , а напряжение на выходе уси-

теля будет пропорционально измеряемому сопротивлению:  $U_x = U_0 \cdot R_x / R_0$ , следовательно,  $R_x = R_0 \cdot U_x / U_0$ .

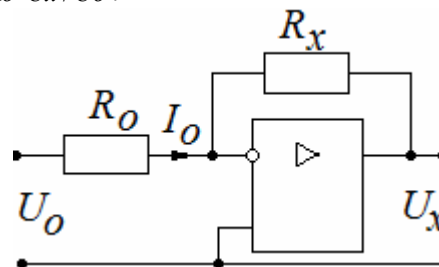


Рис. 1. Принципиальная схема метода преобразования сопротивления в ток.

К недостаткам относят потребность усилителя с очень большим входным сопротивлением, низкую чувствительность, ну а основным считается зависимость времени измерения от паразитной емкости объекта измерения (например, длинного кабеля). Преимуществами схемы являются прямая зависимость выходного напряжения от измеряемого сопротивления и простота реализации.

В схеме с обратной шкалой, построенной на основании этого же метода, образцовое  $R_0$  и измеряемое сопротивление  $R_x$  меняют местами. Работа схемы аналогична описанной выше. Уравнение преобразования в данном случае выглядит следующим образом:  $R_x = R_0 \cdot U_0 / U_x$ .

Достоинством данной схемы перед предыдущей является куда более низкая (а в идеале вообще – нулевая) зависимость скорости измерения от паразитной емкости объекта измерения.

Недостатком можно считать необходимость в образцовом источнике напряжения малой величины (порядка 10 пВ при измерении сопротивления 10ГОм).

Также значение сопротивления находится через напряжение методом делителя. Также как и в случае с использованием операционного усилителя, измеряемое сопротивление может быть включено в два участка схемы. В данном случае – на вход или на выход делителя. Рассмотрим оба варианта подключения.

Если напряжение снимается с измеряемого сопротивления, как изображено на рис. 2, то необходимо иметь образцовое сопротивление много большей величины, причем большой точности.

Уравнение преобразования:  $U_x = U_0 \cdot \frac{R_x}{R_x + R_0}$ .

При условии, что образцовое сопротивление много больше измеряемого, делается упрощение уравнения (при этом вносится дополнительная

погрешность):  $U_x = U_0 \cdot R_x / R_0$ , следовательно,  $R_x = R_0 \cdot U_x / U_0$ .

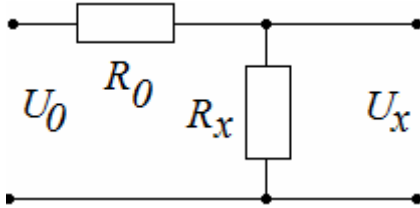


Рис. 2. Принципиальная схема метода делителя.

При снятии напряжения с образцового резистора принцип работы не отличается от описанного выше. Различно лишь расположение аргументов уравнения:  $R_x = R_0 \cdot U_0 / U_x$ .

Единственным отличием является то, что здесь измеряемое сопротивление должно значительно превышать значение образцового резистора, следовательно, в данной схеме отпадает необходимость в использовании высокоомного образцового резистора, что является основным достоинством перед предыдущей схемой. Недостатком схемы является обратная зависимость напряжения от измеряемого сопротивления.

Достоинством метода делителя в целом является простота реализации схем.

Измерительные схемы омметров на основе методов сравнения не содержат промежуточных преобразователей и позволяют осуществить сравнение измеряемой величины с образцовой мерой.

Одним из таких методов является метод, в котором используется мостовая схема. Схема изображена на рис. 3.

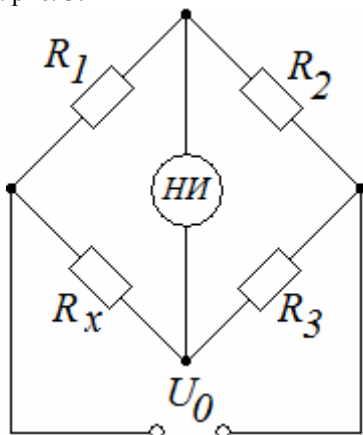


Рис. 3. Принципиальная схема мостового метода.

Принцип измерения основан на взаимной компенсации сопротивлений двух звеньев, одно из которых включает измеряемое сопротивление.

Нахождение величины измеряемого сопротивления определяется путем изменения соотношения  $R_1 / R_2$  и сопротивления  $R_3$  добиваются равновесия, определяемого отсутствием тока в цепи

нуль-индикатора НИ. При этом результат измерения определяют по значениям  $R_1 / R_2$  и сопротивления  $R_3$ .

Условие равновесия моста:  $R_x \cdot R_2 = R_1 \cdot R_3$ . Исходя из этого, уравнение нахождения измеряемого сопротивления:  $R_x = R_1 \cdot R_3 / R_2$ .

К преимуществам данного метода относят большую точность и высокую чувствительность измерения, но при этом проявляется потребность в высокоомных образцовых мерах. Также к недостаткам относят громоздкость схемы и сложность автоматизации измерений.

Еще один метод сравнения – компенсационный, схема которого представлена на рис. 4.

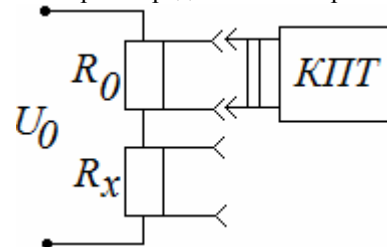


Рис. 4. Принципиальная схема компенсационного метода.

Здесь с помощью компенсатора постоянного тока КПТ последовательно измеряется напряжение на измеряемом сопротивлении  $U_x$  и на образцовом сопротивлении  $U_0$ . Ток в цепи должен быть постоянным, он равен  $U_0 / R_0$  и равен  $U_x / R_x$ . Исходя из этого:  $U_0 / R_0 = U_x / R_x$ , следовательно,  $R_x = R_0 \cdot U_x / U_0$ .

Преимущества заключаются в высокой точности измерения и не высокие требования к источнику питания.

Недостатками метода принято считать сложность измерения, а также потребность в компенсаторе постоянного тока с высоким входным сопротивлением.

Все рассмотренные методы имеют свои достоинства и недостатки, но главная проблема всех методов заключается в следующем: получение высокой чувствительности при высокой точности прибора и уменьшение времени измерения. Следует отметить, что пока что решения данной проблемы не найдено.

#### Список литературы

1. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат., 1988. – 304 с.
2. Электрические измерения: Учебник для вузов; Под редакцией Фремке А.В. и Душина Е.М. – Л.: Энергия, 1980. – 392 с.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДАТЧИКА МАГНИТНЫХ МЕТОК ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ВНЕШНИХ УСЛОВИЯХ

*Силкина М.В.*

Научный руководитель: Уразбеков Е.И.

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,

634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30

E-mail: [silkina.m@mail.ru](mailto:silkina.m@mail.ru)

При геофизическом исследовании скважин основным контролируемым параметром является глубина. Она определяется по длине спущенного в скважину каротажного кабеля. Для измерения длины кабеля широко применяется метод магнитных меток. Одним из основных блоков, влияющих на точность измерения при использовании данного метода, является блок считывания магнитных меток [1].

Считывание магнитной метки на практике осуществляется индукционными, гальваномагнитными или магнитомодуляционными преобразователями.

Недостатком использования индукционных и гальваномагнитных преобразователей является низкая точность измерения при низких и непостоянных скоростях движения изделий.

Наиболее подходящим является магнитомодуляционный метод измерения остаточной магнитной индукции с использованием ферроиндукционных преобразователей (феррозондов).

Магнитомодуляционные датчики характеризуются высокой чувствительностью, позволяют улавливать зашумленные магнитные метки при высоких скоростях движения изделия, но требуют достаточно сложной схемы включения.

Феррозонды принято разделять на два класса по типу используемого сердечника. Это феррозонды с использованием стержневых сердечников и феррозонды с замкнутыми сердечниками. Использование феррозондов с замкнутыми сердечниками предпочтительнее, поскольку эти феррозонды обладают: низким уровнем шума и более высокой стабильностью нулевого сигнала; низким уровнем полей рассеяния и меньшим уровнем ЭДС небаланса; малой потребляемой мощностью [2].

В нашем случае использовался встраиваемый, безкорпусной, тороидальной формы феррозонд ФП 1001 производства ООО НПП «Гаммамет».

Феррозонд представляет собой тороидальный сердечник на который равномерно намотана обмотка возбуждения  $w_1$ . По отношению к внешнему измеряемому полю, тороидальный феррозонд ничем не отличается от феррозондов со стержневыми сердечниками. Постоянный магнитный поток, обусловленный внешним полем, будет однородным лишь в частях сердечника, расположенных симметрично относительно направления измеряемого внешнего поля. Поэтому измерительная обмотка  $w_2$  состоит

из двух секций  $w_2'$  и  $w_2''$  включенных последовательно встречно, таким образом, чтобы наводимые в них ЭДС под воздействием поля возбуждения вычитались.

Для коррекции поля земли и других паразитных полей вводится компенсирующая обмотка  $w_K$ , намотанная на специальном каркасе, охватывающем весь сердечник. При пропускании тока в сердечнике возбуждается постоянное магнитное поле направленное встречно полю земли.

Структурная схема блока считывания магнитной метки представлена на рис. 1.

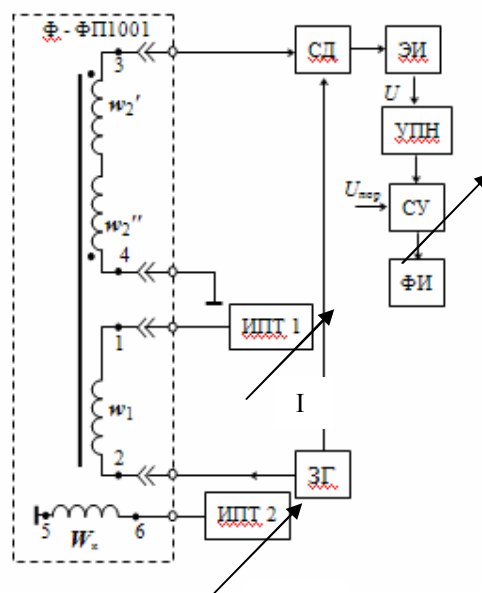


Рисунок 1 Структурная схема блока считывания магнитной метки.

Поскольку феррозонд предназначен для измерения достаточно сильных магнитных полей, подойдет режим работы феррозонда, при котором  $H_1 \sim \ll H_1 = +H_0$ .

В этом режиме по цепи возбуждения феррозонда протекает слабый переменный ток, возбуждаемый задающим синусоидальным генератором ЗГ, и достаточно сильный постоянный ток от источника постоянного тока ИПТ 1 (рис. 1). Переменный ток образует поле  $H_1 \sim$ , которое настолько мало, что не оказывает влияния на величину дифференциальной проницаемости сердечников. Напротив, постоянный ток создает поле  $H_1 =$ , которое может изменить величину магнитной проницаемости и таким образом изменить рабочую точку феррозонда.

Сигнал с измерительной обмотки  $w_2$  поступает на синхронный детектор СД, обеспечивающий выделение первой гармоники, несущей информацию о внешнем магнитном поле. Блок электронного интегратора ЭИ преобразует сигнал в постоянное напряжение, которое после усиления в блоке усилителя постоянного напряжения УПН, сравнивается с пороговым напряжением Упор в сравнивающем устройстве СУ (выделение метки на фоне шумов). В конечном счете на выходе блока считывания магнитной метки формируется импульс сигнала “метка”, характеризующий прохождение метки мимо считывающего устройства. Импульс формируется в блоке ФИ – формирователь импульсов.

Источник постоянного тока ИПТ 2 необходим для формирования поля коррекции НК, компенсирующего поле земли и других паразитных полей.

Чувствительность блока считывания магнитной метки определялась с использованием трехконтурного устройства создания постоянного магнитного поля, обеспечивающего высокую однородность магнитного поля. Зависимость чувствительности от положения рабочей точки (значения тока на выходе ИПТ 1) представлена на рис. 2.

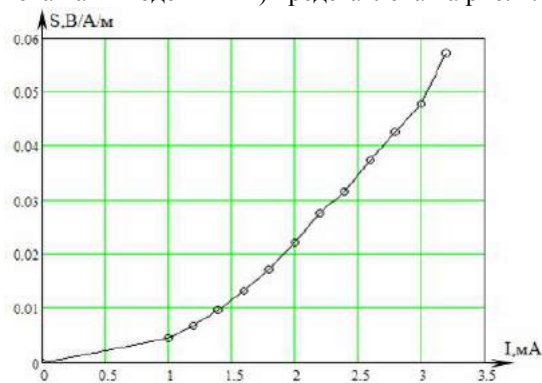


Рисунок 2 Зависимость чувствительности преобразователя от тока с выхода ИПТ 1

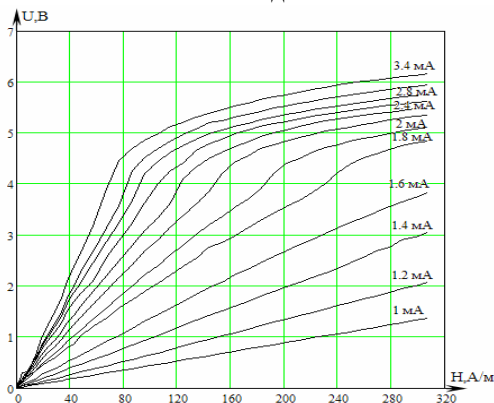


Рисунок 3 Зависимости выходного напряжения преобразователя от напряженности внешнего маг-

нитного поля при различных значениях тока преднамагничивания

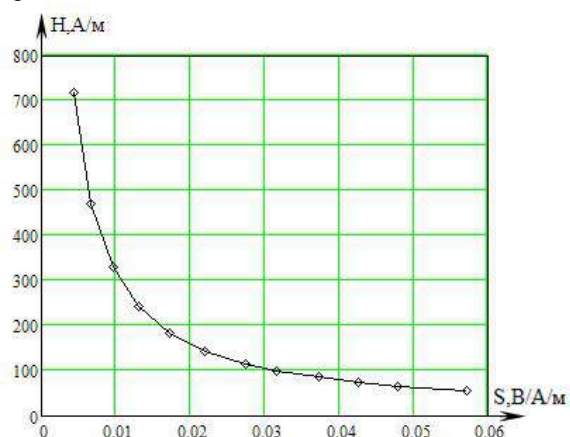


Рисунок 4 Зависимость динамического диапазона от чувствительности преобразователя

Преимущества использования нашего датчика перед остальными представленными на рынке датчиками в том, что благодаря возможности менять положение рабочей точки, мы можем менять чувствительность преобразователя, следовательно, в зависимости от чувствительности меняется динамический диапазон (Рис 4.), а также возможность регулирования уровня метки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1 Силкина М.В. Пути повышения точности определения длины каротажного кабеля //Информационно-измерительная техника и технологии: сборник материалов I Научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры «Информационно-измерительная техника» Национального исследовательского Томского политехнического университета/ под ред. А.В. Юрченко - Томск, ТПУ. - 25-26 февраля 2010. - Томск: Изд. ТПУ. - 2010. - с. 38-39

2 Уразбеков Е.И., Гольдштейн А.Е., Силкина М.В. Датчик магнитных меток с регулировкой чувствительности и коррекцией внешних полей //Информационно-измерительная техника и технологии: сборник материалов I Научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры «Информационно-измерительная техника» Национального исследовательского Томского политехнического университета/ под ред. А.В. Юрченко - Томск, ТПУ. - 25-26 февраля 2010. - Томск: Изд. ТПУ. - 2010. - с. 40-41

3 Уразбеков Е.И. Метод измерения длины стальных канатов с помощью нанесения магнитных меток: Сборник трудов 12 конференции СТТ ТПУ. Томск.: Изд-во ТПУ, 2006.-Т. 1.-С. 135-138.



## СТАНЦИЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

*Суматохина К.В., Китаева М. В., Охорзина. А. В., Юрченко А.В.*

Научный руководитель Юрченко А. В, д.т.н, профессор  
Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: *ameba\_89@mail.ru*

В условиях уменьшения мировых запасов природного топлива (невозобновляемых ресурсов), большое внимание уделяется использованию солнечной энергии путем прямого преобразования в электрическую. Для этой цели применяются кремниевые солнечные элементы (СЭ). Они являются главным источником электроэнергии в космических аппаратах. Однако широкое использование СЭ на Земле сдерживается их значительной стоимостью. Снижение стоимости кремниевых солнечных элементов в основном ведется за счет уменьшения стоимости монокристаллического кремния и создания дешевых пленочных элементов на основе аморфного кремния. В обоих случаях важны деградационные и энергетические характеристики СЭ и соответственно солнечных батарей (СБ) изготавливаемых на их основе.

При преобразовании солнечного излучения (особенно при высоких уровнях солнечной радиации) в СБ выделяется некоторое количество тепла, и рабочая поверхность может нагреваться до 80-100 °С. Это приводит к повышенному износу параметров СЭ и снижению энергетических характеристик СБ при их использовании. Концентрация дефектов, определяющая степень деградации параметров элемента, будет зависеть не только от плотности интегрального потока солнечной радиации, но и от рабочей температуры СБ [1]. Поэтому необходимо изучение влияния температуры и освещенности на фотоэлектрические и радиационные характеристики кремниевых СЭ работающих в натуральных условиях.

До этого момента такая процедура производилась на мобильной станции мониторинга (рис.1).

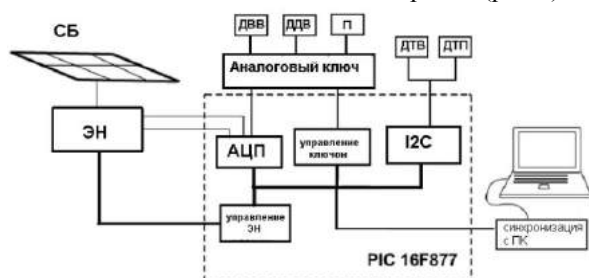


Рис 1. Блок – схема станции мониторинга

Станция работает следующим образом. Измерения начинаются в начале каждого часа. Затем, однократно с интервалом в одну минуту, регистрируется вольт – амперная характеристика (ВАХ) СБ, ее температура, температура воздуха, вычисляется рабочая точка ВАХ. По истечению пятнадцати минут измерения прекращаются до начала следующего часа. В итоге одного цикла для каждого параметра набирается одномерный массив,

состоящий из пятнадцати элементов. Далее массив усредняется, и полученный результат сохраняется в файл данных. Причем, результаты измерения, где ток короткого замыкания СБ меньше 0.1 А не сохраняются. Такие значения тока короткого замыкания соответствуют сумеркам или ночной фазе суток и не представляет интереса для исследования [2].

Подобная схема реализации не позволяет измерять ВАХ при низкой освещенности. Количество точек ВАХ при  $S_r \leq 300$  Вт/м<sup>2</sup> составляет 2-3 точки. Поэтому провели модификацию схемы измерения ВАХ на основе магазина сопротивлений и микроконтроллера OLIMEX-LPC-P2378. Число снимаемых точек достигает 30, что позволяет увеличить точность измерений.

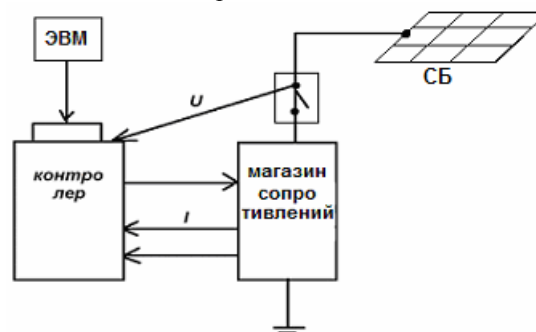


Рис 2. Структурная схема станции мониторинга

При запуске программы подается сигнал на МК, который подает управляющий сигнал на реле, которые подключают нагрузку. Нагрузка представляет собой магазин сопротивлений от 1 Ом до 8 кОм, что позволяет измерить ВАХ с большой точностью и определить рабочую точку (рис.3).

Управление станцией происходит при помощи программы, созданной на платформе LabVIEW (рис. 4).

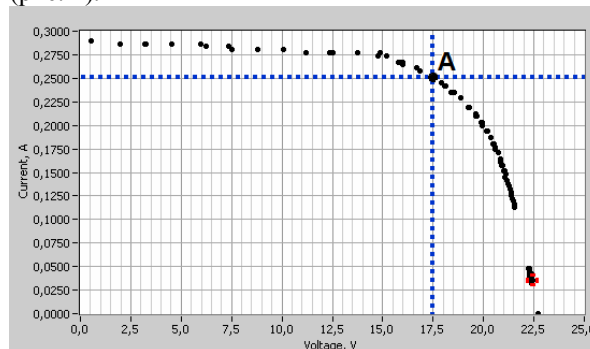


Рис 3. Измерение ВАХ. А-рабочая точка.

В левом нижнем углу окна управления программой представлено 14 переключателей, которые позволяют проводить измерения в ручную, что дает возможность наиболее точно оценивать работу СБ.

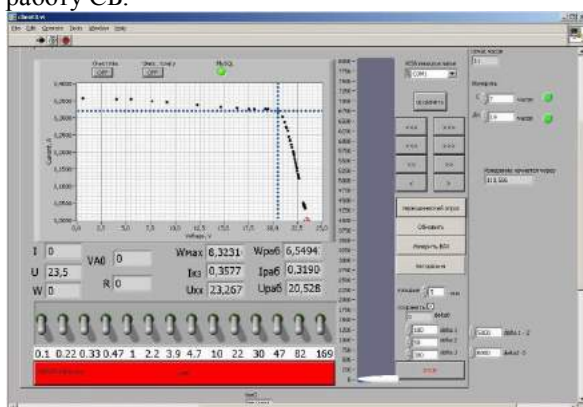


Рис 4. Окно программы LabVIEW

Разработанная станция мониторинга совместно с TOR-станцией позволяет измерять ВАХ СБ, определять ее параметры и измерять основные параметры климата. Это позволяет определить эффективность работы СБ при различных погодных условиях.

Данная станция установлена на крыше Института Оптики Атмосферы в Академгородке и подключена к СБ мощностью 25 Вт, установленной под углом 45° к горизонту в направлении на юг. Данные измерения автоматически регистрируются и отображаются на сайте [lop.iao.ru](http://lop.iao.ru) с января 2011 года (Рис.5).

Выводы:

1. Была модифицирована конструкция станции мониторинга и написана программа для измерения ВАХ СБ.
2. Измеренные характеристики СБ мощностью 25 Вт можно наблюдать в on-line-режиме по адресу <http://lop.iao.ru/activity/?id=sb>

#### Список литературы

1. Бариков М.Я. Фотоэлектрические и радиационные характеристики кремниевых солнечных элементов при повышенных освещенностях и температурах. // Физика и техника полупроводников. 1997. т. 31 №5 С. 520 – 522
2. А.В. Юрченко, А.В. Козлов, Мобильная станция мониторинга работы солнечных батарей в природных условиях.// Датчик и системы, 2006.- №9.-С. 64-67.
3. <http://lop.iao.ru/activity/?id=sb>

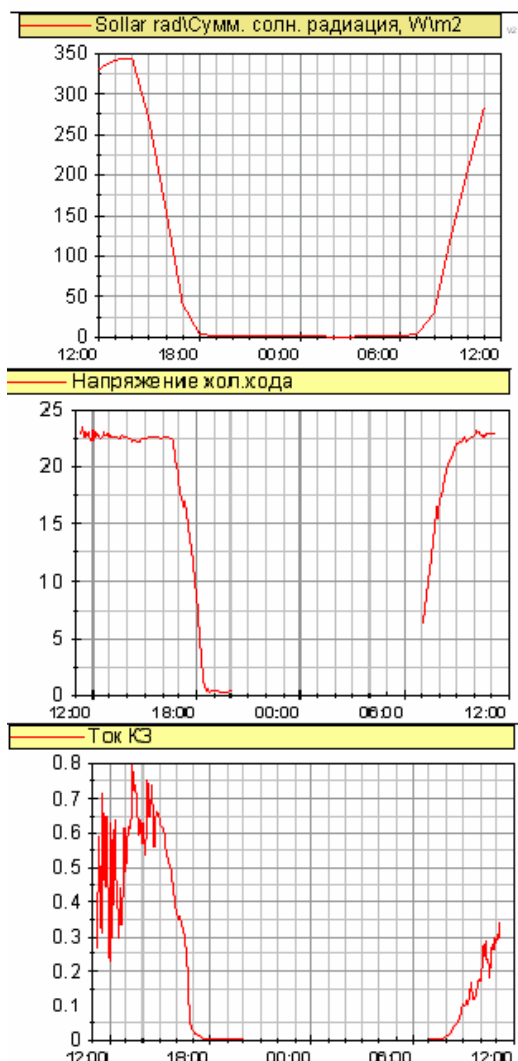


Рис 5. Измерения станции.

## К ВЫБОРУ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СТАДИИ ПОДГОТОВКИ НЕФТИ.

*Уфимцева Е. О.*

Научный руководитель: Винокуров Б.Б., к.т.н., доцент  
Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
e-mail: [jane111@sibmail.com](mailto:jane111@sibmail.com)

Развитие нефтяной промышленности предъявляет повышенные требования к информационно-измерительной технике, поскольку, контроль за технологическими параметрами необходим на всех этапах подготовки нефти.

Современная измерительная техника должна отвечать требованиям не только точности и качества измерения. Приборы должны быть недорогими, надежными, малогабаритными и др.

На сегодняшний день проблема измерения в системе контроля за технологическим процессом при промысловой подготовки нефти не теряет своей актуальности. Поскольку, промысловая подготовка является промежуточным этапом подготовки нефти, от качества процесса зависит ее дальнейшая транспортировка и переработка.

Нефть и нефтепродукты представляют собой сложные смеси углеводородов и их гетеропродводных. Анализ таких смесей с выделением индивидуальных соединений требует много времени. Поэтому в технологических расчетах при определении качества сырья, продуктов нефтепереработки и нефтехимии часто пользуются данными технического анализа, который состоит в определении некоторых физических, химических и эксплуатационных свойств нефтепродуктов. С этой целью используют следующие методы, в комплексе дающие возможность охарактеризовать товарные свойства нефтепродуктов в различных условиях эксплуатации, связать их с составом анализируемых продуктов, дать рекомендации для наиболее рационального их применения :

- химические, использующие классические примеры аналитической химии;
- физические – определение плотности, вязкости, температуры плавления, замерзания и кипения, теплоты сгорания, молекулярной массы, а также некоторых основных показателей (пенетрация, дуктильность);
- физико-химические – колориметрия, потенциометрическое титрование, нефелометрия, рефрактометрия, спектроскопия, хроматография.

Нефть, получаемая из скважин, содержит частицы горных пород, воду, а также растворенные в ней соли и газы. Присутствие пластовой воды в нефтях увеличивает транспортные расходы не только из-за увеличения объема перекачиваемой жидкости. Механические примеси осложняют транспорт и переработку, вызывая эрозию внутренних поверхностей трубопроводов, аппаратуры и арматуры, змеевиках огневых подогревателей, резкое снижение коэффициента теплоотдачи, повышение зольности остаточных продуктов пере-

работки. При наличии пластовых вод в нефтях, поступающих на переработку, нарушаются технологические процессы переработки, а соли, содержащиеся в пластовой воде, ухудшают качество нефтепродуктов. Хлористые соли кальция, магния и натрия, попадая на нефтеперерабатывающие установки, подвергаются гидролизу. Так соли хлористого магния, разлагаясь до 90%, подвергаются гидролизу в зонах высоких температур, образуя хлористый водород, который в свою очередь в зонах низких температур образует соляную кислоту.

Технологические процессы при промысловой подготовки нефти

Извлеченная из скважин сырая нефть содержит попутные газы (50-100 м<sup>3</sup>/т), пластовую воду (200-300 кг/т) и растворенные в воде минеральные соли (10-15 кг/т), которые отрицательно сказываются на транспортировке, хранении и последующей переработке. Поэтому, подготовка нефти обязательно включает следующие операции:

- сепарация;
- обезвоживание (дегидратация) нефти;
- обессоливание нефти;
- нагрев водонефтяной эмульсии;
- дегазация нефти;
- удаление попутных (растворенных в нефти) газов или стабилизация нефти;
- очистка и подготовка нефтепромысловых сточных вод.

Анализ широкого спектра технологического оборудования, применяемого при подготовке нефти на ТХУ, ЭЛОУ и УКПН, выявил наиболее часто применяемые технологические блоки: резервуары (рис.1), насосы, теплообменники, отстойники (рис.2), нефтегазосепараторы, подогреватели, печи, электродегидраторы, конденсаторы-холодильники, ректификационные колонны.



Рис. 1 Резервуар

Рис. 2 Отстойники

Каждый из названных технологических блоков имеет различные модификации: по размерам, по исполнению (горизонтальное, вертикальное), по типу подогрева (огневой или паровой), по режимным показателям (температура, давление) и т.д.

Как объект автоматизации каждый технологический блок имеет свою типовую группу параметров контроля и управления и, соответственно,



свой типовой набор исполнительных механизмов, преобразователей, блоков питания, датчиков и т.д.

Для удобства управления технологическими процессами необходимо контролировать основные параметры, характеризующие состояние нефти и нефтепродуктов и их состав (например, плотность, вязкость, фракционный состав). Эксплуатационные свойства характеризуют полезный эффект от использования нефтепродукта по назначению, определяют область его применения. Часто на практике нефтепродукты и нефти характеризуются уровнем качества. Оптимальным уровнем считается такой, при котором достигается наиболее полное удовлетворение требований потребителя. Уровень качества зависит от уровня каждого свойства и значимости этого свойства. Количественную характеристику одного или нескольких свойств продукции, составляющих его качество.

Для контроля этих параметров необходима определенная автоматизированная система. А конкретно система измерения плотности и вязкости нефти. Так как именно от этих параметров зависит качество нефти. Плотность характеризует химический состав и происхождение продукта, а так же его качество. Вязкость является важнейшей свойством, характеризующим эксплуатационные свойства нефтепродуктов. Вязкостью определяются масштабы перемещения нефти и газа в природных условиях, ее необходимо учитывать в расчетах, связанных с добычей этих полезных ископаемых. Особенно важна эта характеристика для определения качества масляных фракций, получаемых при переработке нефти и качества стандартных смазочных масел. По значению вязкости судят о возможности распыления и перекачивания нефтепродуктов при транспортировке нефти по трубопроводам, топлив в двигателях и т.д.

Измерение плотности и вязкости необходимо во многих технологических процессах современного производства. Острую потребность в измерителях этих показателей испытывают предприятия нефтегазового, нефтехимического и энергетического комплексов, где имеется большое количество резервуарных парков, и осуществляются товарные операции (отгрузка, поставка, хранение).

Для измерения плотности и вязкости представлены ряд приборов, использующих разные методы измерений. Различия в условиях применения и разнообразие предъявляемых требований привели к необходимости использования системы. Наиболее распространенными методами измерения плотности ареометрический, пикнометрический и метод гидростатического взвешивания. В последнее время успешно развиваются автоматические

методы: вибрационные, ультразвуковые, радиоизотопные, гидростатические. Добиться экономической эффективности при использовании уровнемера можно только при правильном выборе метода измерения, соответствующего реальным условиям применения. Каждый метод обладает характеристиками и возможностями, которые необходимо тщательно рассмотреть прежде, чем сделать окончательный выбор.

Для правильного и грамотного работы системы необходимо учитывать следующие факторы:

- переменная, которая подлежит рассмотрению (плотность, вязкость, температура и т.д.);
- требуемая (достаточная) погрешность измерений;
- условия внутри резервуара;
- характеристики измеряемого продукта;
- требования, предъявляемые к прибору, параметрам выходных сигналов, мощности источника электропитания и т.д.;
- требования по безопасности.

При выборе средств измерений учитывается:

1. Вид контролируемой среды: жидкость; пастообразные среды; сыпучие материалы; кусковые материалы.

2. Свойства контролируемого продукта: химическая активность; удельный вес; электрическая проводимость; диэлектрическая проницаемость; влажность; взрывоопасность; температура; давление.

3. Диапазон измерений плотности вязкости.

4. Необходимость дистанционной передачи показаний.

5. Вид контролируемой емкости (резервуара): открытые; закрытые с низким давлением; закрытые с высоким давлением; вертикальные; горизонтальные; цилиндрические; сферические.

6. Условия монтажа прибора: размещение датчика в выносной камере; через запорную арматуру; верхний или боковой монтаж; положение, длина и диаметр монтажного патрубка; наличие потоков среды при наливе; конструкции внутри резервуара; размеры резервуара; профиль дна резервуара.

#### Литература

1. Гриценко А.И. Экология. Нефть и газ./ А.И. Гриценко, Г.С. Аكوпова, В.М. Максимов. – М.: Наука, 1997.,598с.

2. Химия нефти и газа : учебное пособие / Под ред. Проскурякова В.А., Дробкина А.Е. 3-е изд.,- Сб. Химия., 1995. 448с.

3. В.Н. Антипов, Г.В. Бахмат, Г.Г. Васильев и др.; Под общей ред. Ю.Д. Земенкова Хранение нефти и нефтепродуктов

## НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

*Ширшова А.М., Ширяев В.В.*

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: sadale@mail.ru

Искусственная нейронная сеть (ИНС) – математическая модель, а также ее программная или аппаратная реализация, построенная по принципу функционирования и организации биологических нейронных сетей. Современные искусственные нейронные сети по сложности и "интеллекту" приближаются к нервной системе таракана. ИНС позволяет с успехом решать проблемы распределения образов, выполнения прогнозов, оптимизации, ассоциативной памяти и управления. Ниже приводятся области, в которых находят применение нейронные сети (НС) [1].

**Распознавание образов и классификация.** В качестве образов могут выступать различные по своей природе объекты: символы текста, изображения, образцы звуков и т. д. При обучении сети предлагаются различные образцы образов с указанием того, к какому классу они относятся. По окончании обучения сети ей можно предъявлять неизвестные ранее образы и получать ответ о принадлежности к определенному классу.

**Принятие решений и управление.** Эта задача близка к задаче классификации. Классификации подлежат ситуации, характеристики которых поступают на вход нейронной сети. На выходе сети при этом должен появиться признак решения, которое она приняла. При этом в качестве входных сигналов используются различные критерии описания состояния управляемой системы.

**Кластеризация.** Под кластеризацией понимается разбиение множества входных сигналов на классы, при том, что ни количество, ни признаки классов заранее не известны. После обучения такая сеть способна определять, к какому классу относится входной сигнал. Сеть также может сигнализировать о том, что входной сигнал не относится ни к одному из выделенных классов — это является признаком новых, отсутствующих в обучающей выборке, данных. Кластеризацию осуществляют, например, нейронные сети Кохонена.

**Прогнозирование и аппроксимация.** Способности нейронной сети к прогнозированию напрямую следуют из ее способности к обобщению и выделению скрытых зависимостей между входными и выходными данными. После обучения сеть способна предсказать будущее значение некой последовательности на основе нескольких предыдущих значений и/или каких-то существующих в настоящий момент факторов. Следует отметить, что прогнозирование возможно только тогда, когда предыдущие изменения действительно в какой-то степени предопределяют будущие. Например, прогнозирование котировок акций на основе котировок за прошлую неделю может оказаться ус-

пешным (а может и не оказаться), тогда как прогнозирование результатов завтрашней лотереи на основе данных за последние 50 лет почти наверняка не даст никаких результатов.

**Сжатие данных и ассоциативная память.** Способность нейросетей к выявлению взаимосвязей между различными параметрами дает возможность выразить данные большой размерности более компактно, если данные тесно взаимосвязаны друг с другом.

Модели НС могут быть программного и аппаратного исполнения.

Основу каждой НС составляют относительно простые, в большинстве случаев – однотипные, элементы (ячейки), имитирующие работу нейронов мозга. Далее под нейроном будет подразумеваться искусственный нейрон, то есть ячейка НС. Каждый нейрон характеризуется своим текущим состоянием по аналогии с нервными клетками головного мозга, которые могут быть возбуждены или заторможены. Он обладает группой синапсов – однонаправленных входных связей, соединенных с выходами других нейронов, а также имеет аксон – выходную связь данного нейрона, с которой сигнал (возбуждения или торможения) поступает на синапсы следующих нейронов. Общий вид нейрона приведен на рисунке 1. Каждый синапс характеризуется величиной синаптической связи или ее весом  $w_i$ , который по физическому смыслу эквивалентен электрической проводимости.

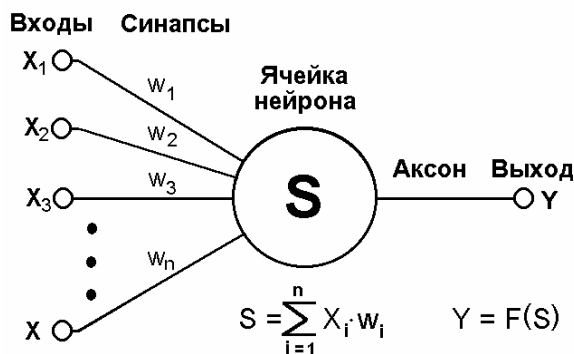


Рис.1 Искусственный нейрон

Текущее состояние нейрона определяется, как взвешенная сумма его входов:

$$S = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i$$

Выход нейрона есть функция его состояния:

$$y = f(s)$$

Нелинейная функция  $f$  называется активационной и может иметь различный вид, как показано

на рисунке 2. Одной из наиболее распространенных является нелинейная функция с насыщением, так называемая логистическая функция или сигмоид (т.е. функция S-образного вида)[2]:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha x}} \quad (3)$$

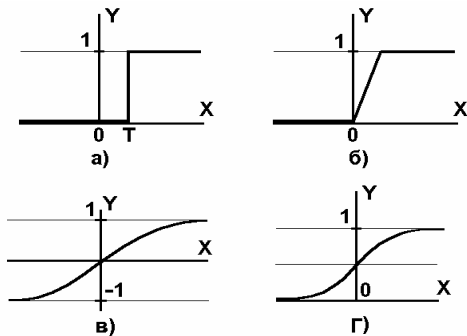


Рис.2 а) функция единичного скачка; б) линейный порог (гистерезис); в) сигмоид – гиперболический тангенс; г) сигмоид – формула (3)

Многослойные нейронные сети. В состав нейронной сети может входить несколько слоев нейронов с произвольным числом нейронов в каждом слое. Пример нейронной сети, состоящей из 3 слоев, приведен на рисунке 3.

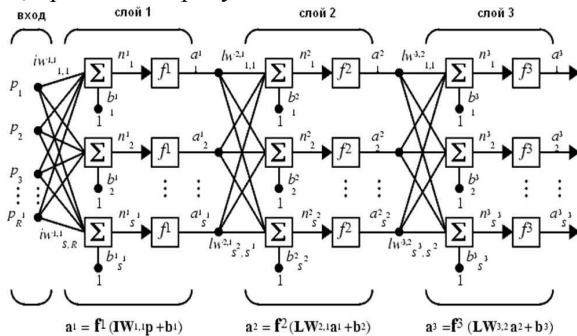


Рис.3 Многослойная нейронная сеть

Вход сети имеет  $R$  входов,  $S^1$  нейронов в первом слое,  $S^2$  нейронов во втором слое и  $S^3$  в третьем. Слой, который образует выход сети, называется выходным слоем, все другие слои называются скрытыми слоями [3].

Многослойные нейронные сети обладают мощными возможностями. Например, двухслойная сеть, в которой первый слой содержит сигмоидальную функцию активации, а второй слой линейную функцию, может быть обучена аппроксимировать с произвольной точностью любую функцию с конечным числом точек разрыва [3].

Обучение нейронных сетей. Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения — одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Для обучения сети необходимо собрать достаточный и представительский объем данных, содержащих признаки исследуемого объекта. Известен ряд эвристических правил, связывающих количество наблюдений для обучения сети с размером сети. Простейшее из них гласит, что количество наблюдений должно быть в 10 раз больше числа связей в сети.

Технически обучение заключается в нахождении весов и смещений нейронов сети, которые минимизируют ошибку обучения. Ошибка обучения для нейронной сети определяется путем прогона через сеть всех имеющихся наблюдений и сравнения выходных данных с желаемыми целевыми значениями. Эти разности позволяют сформировать функцию ошибок. В качестве такой функции берется сумма квадратов ошибок. Таким образом, обучение сети является процедурой изучения поверхности функции ошибок. Отталкиваясь от случайно выбранной точки на поверхности функции ошибок, алгоритм обучения постепенно отыскивает глобальный минимум, который в конечном счете может оказаться и локальным минимумом.

Способность обобщения. Способность сети, обученной на некотором множестве данных, выдавать правильные данные для достаточно широкого класса новых данных, в том числе и не представленных при обучении называется свойством обобщения нейронной сети.

Явление переобучения. Если в результате обучения нейронная сеть хорошо распознает примеры из обучающего множества, но не приобретает свойство обобщения, т.е. не распознает или плохо распознает любые другие примеры, кроме обучающих, то говорят, что сеть переобучена. Переобучение - это результат чрезмерной подгонки сети к обучающим примерам [4].

Список литературы:

1. [ru.wikipedia.org/...](http://ru.wikipedia.org/)Искусственная нейронная сеть–Википедия.
2. Ф.Уоссермен, Нейрокомпьютерная техника, М.,Мир, 1992.
3. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6 / Под общ. ред. к.т.н. В.Г.Потемкина, - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.
4. <http://www.basegroup.ru> – Технологии анализа данных.

## ПОСЛЕДНИЕ РАЗРАБОТКИ ДАТЧИКОВ ДВИГАТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ

Скрипка О.А.

Научный руководитель Винокуров Б.Б., доцент  
Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,  
634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30  
E-mail: [041151@sibmail.com](mailto:041151@sibmail.com)

Для максимальной оптимизации и координации работы двигателя и других автомобильных систем, ответственных за повышение топливной эффективности и снижение эмиссии, и в связи с повышенным спросом на более комфортабельные автомобили, чья надежность определяется непрерывным ужесточением норм эмиссии и стандартов безопасности, в последнее время разрабатываются и входят в эксплуатацию все большее количество датчиков, необходимых для контроля корректного и согласованного функционирования автомобильных систем. В настоящее время существует несколько направлений построения таких датчиков. Одной из важнейших тенденций в развитии цифровых импульсных датчиков скорости и положения, наблюдавшаяся на рубеже веков, является переход от пассивных аналоговых (индуктивных) к цифровым (активным) устройствам. Еще одним направлением является осуществление прямого управления давлением в двигателе, что связано с необходимостью установить более жесткие нормы регулирования эмиссии. Реализация данной стратегии приводит к разработке датчиков, способных выполнять прямой мониторинг процессов горения в двигателе. Соответственно, такие традиционные датчики и технологии мониторинга, как датчик массового расхода воздуха, датчик детонации и датчик распределительного вала, сегодня уже считаются устаревшими. [1] Вот почему в настоящее время производители электроники прорабатывают возможность исключения этих типов датчиков из своих новых проектов.

Системы управления двигателем и трансмиссией, включая датчики, микроконтроллеры, ИС контроля питания, составляют приблизительно треть всей электроники автомобиля. Важнейшими задачами данных систем является повышение эффективности способов и характеристик управления и оптимизация работы двигателя и как следствие достижение максимальной топливной эффективности и снижение эмиссии.

Одним из примеров перспективных автомобильных датчиков является нагреваемый датчик концентрации кислорода с твердым электролитом  $ZrO_2$  Thimble Type Oxygen Sensor Bosch, конструкция которого представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Конструкция датчика концентрации кислорода

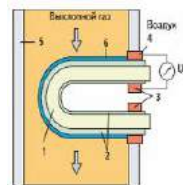


Рисунок 2. Конструкция и принцип работы сенсорной ячейки

Активная керамическая часть датчика представляет собой твердый электролит в форме трубки, закрытой на одном конце, который нагревается изнутри электрически. Электрически подогреваемые датчики особенно удобны для измерения параметров двигателя, действующего на обедненной топливной смеси, действующего на обедненной топливной смеси, они работоспособны и во время прогрева двигателя. При температуре свыше  $350^\circ\text{C}$  электролит становится проводящим и реагирует на содержание кислорода в выхлопном газе, образуя характерный гальванический заряд, который снимается с электродов, покрывающих внутреннюю и верхнюю поверхности керамики, — слоев платины с микропорами. Максимальное значение заряда соответствует  $\lambda = 1$ . Заряд преобразуется в выходное ступенчатое напряжение датчика от 0,1 до 0,9 В с 0,45 В при достижении стехиометрического соотношения. Типичное сопротивление составляет 2–6,5 Ом. Данный тип датчика функционирует, сравнивая чистый атмосферный воздух с выхлопами, поэтому очень чувствителен к различным загрязнениям — грязи, маслу, от которых датчик необходимо защищать.

Рисунок 3. Датчик концентрации кислорода на ВАЗ-21114



На ВАЗ 21114 используются датчики концентрации старого образца. Данные датчики требуют время для прогрева до  $300^\circ\text{C}$ . В противном случае контроллер управляет системой впрыска, не учитывая показания датчика, что является существенным недостатком.

Растущая потребность в снижении эмиссии  $CO_2$  увеличивает полезную роль датчика массового расхода воздуха в регулировании соотношения воздух/топливо для оптимизации процесса сгорания. Сегодня актуальны микромеханические MEMS-расходомеры массы воздуха, включающие тонкопленочные нагреваемые и управляющие

электронные элементы, размещенные на одной подложке. Нагреваемые и измерительные резисторы выполняются в виде тонких платиновых слоев, депонированных на поверхность кристалла кремния, который устанавливается на утонченную подложку. Датчик температуры подогревателя и датчик температуры окружающего воздуха помогают поддерживать нагревательный резистор на постоянном уровне превышения температуры. Конструкция датчика представлена на рисунке 2. Измерительный принцип микромеханического сенсорного элемента Bosch представлен на рисунке 3.

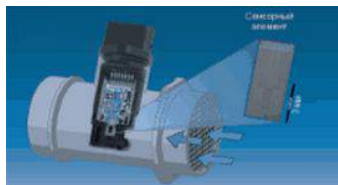


Рисунок 3. Микромеханический датчик массового расхода воздуха Bosch

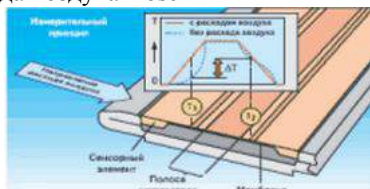


Рисунок 4. Измерительный принцип микромеханического сенсорного элемента Bosch

Более новый метод, разработанный Bosch для получения выходного сигнала, не требует измерять ток подогрева, вместо этого сигнал выводится из разницы температур воздуха, замеряемых двумя датчиками, расположенными по обе стороны от нагревательного резистора — на пути потока по ходу его движения и навстречу ему. Дифференциальный сигнал показывает и направление движения потока. Платиновые тонкопленочные RTD, которые предлагаются для автомобильных высокотемпературных применений, помимо высокотемпературных термисторов, характеризуются наиболее широким диапазоном ( $-220...+1000$  °C), в сравнении, например, с никелем ( $-60...+320$  °C). В типичном платиновом RTD керамическая подложка поддерживает структурированный платиновый слой, покрытый стеклом. Эти устройства характеризуются высокой точностью, повторяемостью, линейностью, долговременной стабильностью, но небольшим положительным температурным коэффициентом, меньшей чувствительностью к изменению температуры и меньшим базовым сопротивлением, чем термисторы, а также более высокой ценой.

В последние годы в автоэлектронике приобретают актуальность бесконтактные способы измерений, которые способны детектировать очень

малые изменения в тепловом (инфракрасном) излучении объекта. Многие из IR-датчиков работают по принципу сравнения инфракрасного излучения объекта, поглощаемого термочувствительной мембраной, с температурой детектора, которую измеряет термистор (MEMS-технология)[1]. Разница температур преобразуется в электрический потенциал посредством термоэлектрического эффекта в термоэлементе. Напряжение питания для датчика не требуется.

Ввиду того, что IR-датчики способны измерять температуры порядка  $-20...+100$  °C и, непосредственно, — только твердотельных объектов или поверхностей с достаточной эмиттирующей способностью, они находят свои основные применения в автомобильных системах безопасности (определение положения пассажиров, видеосистемы наблюдения в ночных и туманных условиях), климат-контроле, для обнаружения конденсации на окнах при тумане.

Важнейшая актуальная технология для прецизионных датчиков крутящего момента двигателей и входного/выходного валов коробок передач — магнестриктивная, от MDI и SiemensVDO, с поляризованным магнитоупругим кольцом и бесконтактным датчиком магнитного поля, которое пропорционально крутящему моменту. Альтернативные актуальные методы представляют собой беспроводные и безбатарейные SAW устройства на поверхностных акустических волнах, которые разработали компании Honeywell и Transense, — резонаторы, резонансная частота которых (номинальная 433 МГц датчиков Honeywell) изменяется под действием механического напряжения. Опрос датчиков осуществляется беспроводным методом — радиочастотными импульсами. Резонансная частота отклика позволяет вычислить крутящий момент.

Вышеперечисленные примеры еще раз подтверждают достоинства современных датчиков и целесообразность их применения. Таким образом можно сказать, что переход к использованию более совершенных технологий позволит сделать резкий скачок вперед в области автомобилестроения, что в настоящее время и необходимо российскому автопрому.

1. Датчики управления двигателем автомобиля. [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://pda.coolreferat.com>, свободный. – Загл. с экрана.

2. Система управления двигателем. [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.automan.ru/vaz/1118/10.shtml>, свободный. – Загл. с экрана.

3. Датчики управления двигателем автомобиля. [Электронный ресурс].- Режим доступа: [http://revolution.allbest.ru/transport/00081503\\_0.html](http://revolution.allbest.ru/transport/00081503_0.html), свободный. – Загл. с экрана



## СТАЦИОНАРНЫЕ И МОБИЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

*Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Ивлев Г.А.*

Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия г. Томск пр. Академический 1, тел. (3822) 492738,

E-mail [artem@iao.ru](mailto:artem@iao.ru)

### Постановка задачи

Одной из основных современных проблем является проблема возможных глобальных изменений окружающей среды и климата, которые при своем крайнем проявлении могут привести к природным катастрофам, что вызовет не только большие экономические, но и, к сожалению, человеческие потери. Причина ее появления заключается в возможном изменении климата за счет роста концентрации парниковых газов, что связывается с антропогенной деятельностью.

Для изучения данной проблемы необходимо организовать мониторинг парниковых газов. В настоящей статье дается описание стационарных и мобильных систем мониторинга параметров атмосферы.

### Стационарные системы мониторинга

Институт оптики атмосферы СО РАН располагает двумя полигонами. Один — базовый экспериментальный комплекс (БЭК), который находится

в Академгородке г. Томска. Второй — «Фоновый», расположен около п. Киреевск, находящегося в 60 км к западу от города на берегу р. Оби. При преобладающем западно-восточном переносе воздух будет последовательно проходить полигон «Фоновый», Томск и БЭК.

На обоих полигонах установлены идентичные автоматические комплексы для измерения метеорологических величин в приземном слое атмосферы. Оба комплекса представляют собой вантовые мачты, оснащенные на четырех уровнях датчиками температуры и влажности воздуха и анемометрами.

Датчики ветра установлены на высотах 10, 20, 30 и 36 м от земли на выносных держателях в южном и северном направлениях. Такое распределение позволяет учитывать возмущения воздушных потоков остовом мачты. Установленный комплект оборудования приведен в Таблице 1

Таблица 1 – состав измерительных комплексов.

Прибор	Параметр	Диапазон, погрешность	Полигон	примечание
Метеокомплекс ИОА СО РАН	Температура	-50...+50° С ± 0,2° С	БЭК, Фоновый	4 уровня
	Относительная влажность	10...100% С ± 5%	БЭК, Фоновый	4 уровня
	Скорость ветра	0,5...60 м/с ± 5%	БЭК, Фоновый	4 уровня
	Направление ветра	0...360° С ± 10%	БЭК, Фоновый	4 уровня
С310 (Оптек)	SO <sub>2</sub>	0...2000 мкг/м <sup>3</sup> ± 25%	БЭК, Фоновый	2 уровня
P-310A (Оптек)	NO	0...1000 мкг/м <sup>3</sup> ± 25%		2 уровня
	NO <sub>2</sub>	0...1000 мкг/м <sup>3</sup> ± 25%		
3-02П (Оптек)	O <sub>3</sub>	0...1000 мкг/м <sup>3</sup> ± 15%	БЭК	2 уровня
СВ-320 (Оптек)	H <sub>2</sub> S	0...200 мкг/м <sup>3</sup> ± 15%	БЭК	2 уровня
Н-320 (Оптек)	NH <sub>3</sub>	0...1000 мкг/м <sup>3</sup> ± 15%	БЭК	2 уровня
GMM 222	CO <sub>2</sub>	0...10000 млн <sup>-1</sup> ± 20%	БЭК, Фоновый	2 уровня
К-100 (Оптек)	CO	0...400 мкг/м <sup>3</sup> ± 20%	БЭК, Фоновый	2 уровня
NMHC - 2000	CH <sub>4</sub> , ΣСН	0,5 млн <sup>-1</sup> и 0,50 млн <sup>-1</sup> ± 25%	БЭК	2 уровня
GRIMM 1.108	Дисперсный состав аэрозоля	0...300 нм ± 25%	БЭК, Фоновый	1 уровень

Вокруг полигона «Фоновый» отсутствуют промышленные предприятия, и получаемые здесь данные будут характеризовать фоновые условия. Второй пост размещен на северо-восточной окраине Томского академгородка. Учитывая преобладающий западно-восточный перенос воздуха в регионе, можно говорить о том, что второй периодически будет отягощен антропогенным влиянием, так как воздушная масса после «Фонового» пройдет через территорию г. Томска, а затем попадет в Академгородок. Таким образом, получаемые данные позволят не только контролировать состав воздуха в фоновых условиях, но и выделять вклад крупного промышленного центра в его изменение.

Забор воздуха осуществляется с двух уровней 10 и 30 метров. Затем пробы воздуха подаются на распределительную систему клапанов. К этой же системе подключены и баллоны со стандартной (заранее известной) концентрацией газовых

смесей. Затем проба или калибровочные смеси в зависимости от текущего режима работы, подаются на вход приборов. Плата сбора данных оцифровывает сигналы от приборов и передает информацию в ПК. ПК управляет системой клапанов выбирая режимы измерений – с 10 метров, с 30 метров или калибровка, собирает, выполняет необходимые расчеты и сохраняет результаты. Затем полученные данные при помощи GSM модема по сети Internet отправляются в лабораторию.

### Мобильная станция мониторинга АКВ-2

Разработанные [1—3] методы и модели, а также и расчеты, проведенные для конкретных регионов, показали, что город является не только «островом тепла», но и «островом загрязнений» из-за особенностей локальной циркуляции воздуха, возникающей в его окрестностях.

Зона локальной циркуляции зависит от масштаба города, количества и мощности предпри-



ятий. Выбросы, попадающие в ее зону, накапливаются до определенного уровня. Поскольку температура воздуха внутри образовавшейся колонки выше, то он начинает подниматься. По данным [4] вначале колонка с примесями имеет вертикальный вид, а затем под действием основного потока она начинает наклоняться, приобретать горизонтальный вид на значительном удалении от города и распространяться вблизи верхней границы пограничного слоя атмосферы. Высота этого слоя зависит от сезона, и он отделяется от свободной атмосферы задерживающим слоем [5].

Все вышеизложенное требует нетрадиционных методов исследования распределения примесей в атмосфере городов. В связи с этим в ИОА СО РАН разработана и изготовлена мобильная станция АКВ-2, предназначенная для контроля состава воздуха в городах и их окрестностях.

Измерительная аппаратура мобильной станции, состоящая из восьми газоанализаторов и одного аэрозольного анализатора (Таблица 2), размещена на стойках в КУНГе автомобиля; там же оборудованы рабочие места для операторов. Снаружи на задней стенке КУНГа установлена телескопическая мачта ХЖ4.115.025Сп, на которой крепятся анеморумбометр М-63, пиранометр М-115м, датчики температуры и влажности.

Таблица 2 – состав измерительного комплекса.

Прибор	Параметр	Диапазон, погрешность
Метеокомплекс ИОА СО РАН	Температура	-50...+50° С ± 0,2° С
	Относительная влажность	10...100% С ± 5%
	Скорость ветра	0,5...60 м/с ± 5%
	Направление ветра	0...360° С ± 10%
С310 (Оптек)	SO <sub>2</sub>	0...2000 мкг/м <sup>3</sup> ± 25%
Р-310А (Оптек)	NO	0...1000 мкг/м <sup>3</sup> ± 25%
	NO <sub>2</sub>	0...1000 мкг/м <sup>3</sup> ± 25%
3-02П (Оптек)	O <sub>3</sub>	0...1000 мкг/м <sup>3</sup> ± 15%
СВ-320 (Оптек)	H <sub>2</sub> S	0...200 мкг/м <sup>3</sup> ± 15%
Н-320 (Оптек)	NH <sub>3</sub>	0...1000 мкг/м <sup>3</sup> ± 15%
GMM 222	CO <sub>2</sub>	0...10000 млн <sup>-1</sup> ± 20%
К-100 (Оптек)	CO	0...400 мкг/м <sup>3</sup> ± 20%
GRIMM 1.108	Дисперсный состав аэрозоля	0...300 нм ± 25%

В зависимости от целей исследования на мачту, на разные уровни высоты, также могут быть вынесены заборники воздуха для анализаторов. В передней части крыши установлен основной воздухозаборник, через который производится отбор наружного воздуха на измерительную аппаратуру.

В станции АКВ-2 установлена ЭВМ, фиксирующая результаты измерений от приемной части датчиков через устройство сопряжения. Одновременно через стандартные последовательные порты регистрируются протоколы данных от газоанализаторов и GPS-приемника. На ЭВМ установлено программное обеспечение, которое позволяет выбирать режим проведения измерений. Станция способна проводить измерения как в стационарном положении, так и в движении. В последнем

случае предусмотрена синхронная запись в базу данных вместе с измеряемыми параметрами координат положения станции, фиксируемых GPS-приемником.

Считывание показаний осуществляется с частотой один раз в секунду, однако не всегда есть необходимость работать с таким большим объемом данных и при длительных стационарных измерениях применяется режим измерений: 10 мин - продувка подводящих трактов, 10 мин - измерение.

АКВ-2 оснащена автономным источником питания на основе аккумуляторных батарей 24 В и однофазных преобразователей напряжения -220 В. Наличие автономного питания позволяет оперативно приступать к измерениям газовых и аэрозольных компонентов атмосферы, так как регистрирующая аппаратура может быть доставлена к месту проведения измерений уже в рабочем состоянии, т.е. отсутствует необходимость предварительного прогрева, калибровки и ожидания выхода станции на рабочий режим.

Таким образом, время, необходимое для приведения станции в рабочее положение, сокращается до нескольких минут. Начиная с февраля 2004 г. мобильная станция в рамках проекта СО РАН № 130 «Экология промышленных городов Сибири» участвовала в нескольких экспедициях: Томск—Иркутск, двух Томск-Новосибирск, работала в промышленных районах гг. Томска, Новосибирска и Норильска, их пригородных зонах.

#### Самолет – лаборатория

Учитывая сложную экологическую обстановку во многих регионах страны и отсутствие средств получения объективной информации о ней в масштабах района и региона, при создании самолета – лаборатории основной целью разработки было поставлено изготовление комплекса аппаратуры, предназначенного для измерения количества загрязняющих веществ в воздухе и на подстилающей поверхности.

Исследователей в области физики атмосферы самолет привлекает в первую очередь тем, что позволяет производить измерения непосредственно в интересующей точке пространства. При этом он позволяет доставить в заданную точку многочисленные приборы, объединенные, как правило, в единый комплекс, подключенный к бортовой системе регистрации на базе ЭВМ.

В ИОА СО РАН этот эффективный метод исследования эпизодически начал использоваться еще в первой половине 70 – х годов. С 1981 года самолетное зондирование стало регулярным.

Разработанная в 90 – е годы самолет – лаборатория, в качестве регистрирующей системы, имела IBM x386 с ISA платой АЦП разрешением 8 бит. С каждым годом расширялся состав измерительного комплекса, устаревшие приборы заменялись более современными, добавлялись новые. Поэтому возникла потребность глубокой модернизации

региструющей системы. В ходе промежуточной модернизации, в 2008 году устаревшая ЭВМ, была заменена на портативный компьютер, а плата АЦП на недорогую плату сбора данных отечественного производства. Осенью 2009 года планируется закупка многофункционального аппаратно – программного комплекса на основе PXI со встроенным контроллером, платой сбора данных, мультиплексором и мультиметром .

На рисунке 1 представлена максимально возможное оборудование, которое на данный момент времени имеет техническую возможность быть установленным на борту самолета – лаборатории. В зависимости от задач, на самолете – лаборатории часть оборудования может не устанавливаться или же наоборот, доукомплектовываться новыми блоками

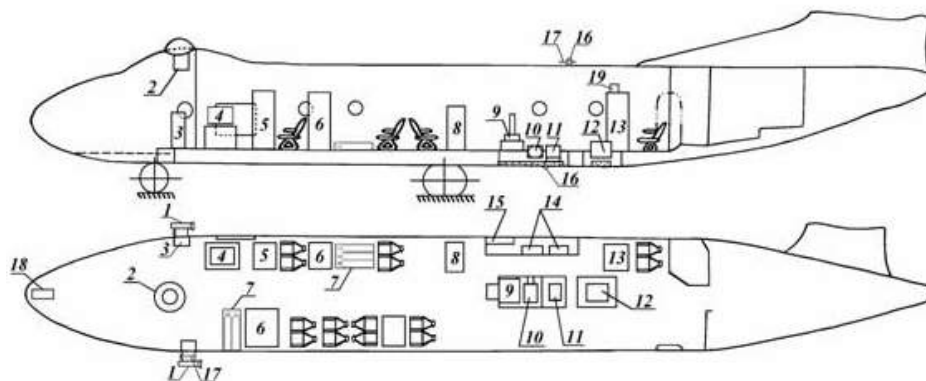


Рисунок 1.

1 заборники воздуха; 2 - солнечный спектрофотометр; 3 – фильтро-аспирационная установка, спектрометр аэрозоля; 4 – автоматическая диффузионная батарея (АДБ) ; 5 нефелометр со средствами термо- и гироскопии; 6 – блок газоанализаторов; 7 эталонные газовые смеси; 8 –регистратор лидара; 9 - лидар; 10 - спектрофотометр; 11 радиометр; 12 - тепловизор; 13 – центральный компьютер; 14- щит бортоператора; 15 – бортовой навигационный комплекс; 16 – пиранометр (альбедометр); 17 – датчики температуры и влажности; 18 – приемник глобальной системы позиционирования (GPS); 19 – датчик гамма-фон

Также на борту самолета установлена система глобального позиционирования. Кроме того, к регистрирующей системе подключаются штатные приборы самолета (Рисунок 1 поз. 14,15): воздушная и путевая скорость, угол сноса, статическое и динамическое давление, курс, крен и тангаж самолета.

В конструкции самолета АН 30, в носу, с внешней стороны обшивки самолета, предусмотрены крепления для дополнительного штатного оборудования. Эти крепления используются для установки специально разработанных заборников воздуха (рисунок 1 поз.1), от которых по воздуховодам проба поступает на вход газоанализаторов (Рисунок 1 поз. 6).

Датчики температуры, влажности воздуха и суммарной солнечной радиации являются выносными и крепятся на крыше самолета на место штатного измерителя температуры забортного воздуха (Рисунок 1 поз. 16 -17).

Метеоблок и штатные приборы имеют аналоговые выходные сигналы и соединены с системой регистрации (Рисунок 1 поз.13) проводной связью. Приборы газоанализа, дисперсного состава аэрозоля и GPS соединены с системой регистрации беспроводной связью. К выходным RS232 интерфейсам этих приборов подключается приемопередатчик Bluetooth, который является так называемым «радиоудлинителем», и фактически заменяет стандартный коммутационный кабель RS232. При таком решении нет необходимости

использовать платы расширения COM портов или переходники USB – COM порт. Условием работоспособности такого варианта является наличие Bluetooth адаптера 1 или 2 класса.

Система регистрации представляет собой блок подготовки аналоговых сигналов, плату сбора данных, портативный компьютер с Bluetooth адаптером, а также программного обеспечения разработанного на LabVIEW. Раз в секунду система регистрирует и сохраняет данные в текстовый файл. Текстовый файл состоит из даты, времени, навигационных параметров, метеопараметров, измеряемого газового и аэрозольного состава.

#### Список литературы

1. Пененко В. В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 351 с.
2. Пененко В.В., Цветова Е.А. Моделирование процессов переноса примесей в прямых задачах климатозко-логического мониторинга и прогнозирования // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 482-487.
3. Пененко В.В., Цветова Е.А. Методы и модели для изучения природной среды и оценки экологических рисков // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 5-6. С. 412-418.
4. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 360 с.
5. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеоздат, 2000. 780 с.

***СЕКЦИЯ 3  
ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В  
РАДИОФИЗИКЕ***

## МЕТОДИКА АКУСТИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

*Бочарова А.А., Соловьев А.В.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36  
E-mail: *euphoria@docsis.ru*

Акустический шум является важным экологическим фактором в окружающей среде. В городских условиях акустические шумы характеризуются большим многообразием источников техногенного происхождения связанных с деятельностью человека. Одним из основных факторов влияющих на шумовое загрязнение в городе является транспорт.

Шумовое загрязнение окружающей среды все время растет. Поэтому вопрос об исследовании шума сейчас актуален. Влияя на психику человека, он вызывает рассеянность, усталость и другие различные симптомы. Поэтому так важно знать участки местности с повышенной шумовой загрязненностью, так как именно в этих участках наиболее часто происходят ДТП и другие аварии на строительных, монтажных работах. [1-3]

Существуют различные методики определения уровня акустических шумов в городских условиях. Предлагаемая методика принципиально отличается от других. Различие заключается в том, что помимо измерений уровня акустических шумов в звуковом диапазоне частот, проводится мониторинг акустических шумов инфразвукового диапазона частот, так как колебания именно этого диапазона являются наиболее вредными и опасными для здоровья человека.

Одной из характеристик акустического поля является показатель спада. Показатель спада означает уменьшение амплитуды спектра с увеличением частоты. Он показывает, какие частоты преобладают. При увеличении показателя спада в спектре будут преобладать низкочастотные составляющие. Если показатель спада стремится к 0, то спектр будет ближе к равномерному. Данная методика позволяет определить области, в которых низкочастотные составляющие спектра сигнала преобладают, либо спектр стремится к равномерному.

На основе предложенной методики, проведено картирование города Томска по спектральным характеристикам акустических шумов. Измерения проводились с помощью прибора Шумомер – анализатор спектра ОКТАВА – 101 АМ во время повышенной деловой активности города в одно и то же время с 12:00 до 14:00 часов.

Выбор измерительных пунктов проводился в местах пересечения улиц, скопления транспорта и населения, где уровень акустических шумов наиболее высокий. Число измерительных пунктов в общей сложности составило 118 единиц.

В результате были построены карты шумовой загрязненности в звуковом и инфразвуковом диапазоне частот.

В звуковом диапазоне частот (Рис.1.) наиболее высокий уровень шума наблюдается в области крупных дорог, магистралей, таких как проспект Ленина, Фрунзе, улица Красноармейская и т.д. В жилых зонах, во дворах уровень шума гораздо ниже.

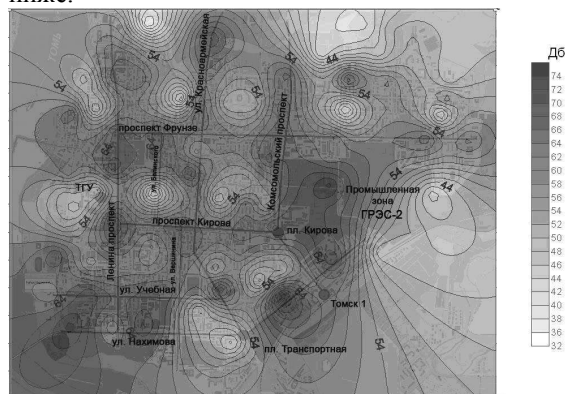


Рис.1. Уровень шума на частоте 1 кГц в измерительных пунктах города Томска

В звуковом диапазоне частот построена карта пространственное распределение формы спектра (Рис.2)

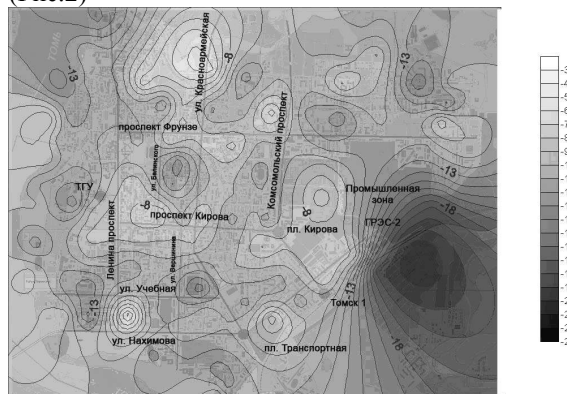


Рис.2. Пространственное распределение показателя спада для звукового диапазона частот

Из рисунка 2 видно, что вдоль крупных дорог, проспектов показатель спада находится в пределах от 3 до 7, то есть форма спектра стремится к более пологой. В этих местах повышается уровень в высокочастотной части спектра сигнала. В жилых районах, где уровень акустических шумов не велик, показатель спада достигает величин, порядка 20, крутизна спектра выше и высокочастотные составляющие уменьшаются.

В инфразвуковом диапазоне частот (Рис.3.) повышенный уровень шумов, как и в звуковом диапазоне, наблюдается в местах скопления транспорта, на крупных пересечениях улиц, таких как проспект Фрунзе - проспект Ленина, Учебная - Красноармейская, площадь Кирова и т.д. В инфразвуковом диапазоне частот наиболее высокий уровень шумов наблюдается в области промышленной зоны. Там находятся такие объекты, как ГРЭС-2, Союзлифтмонтаж, Томскэнергострой и т.д.



Рис.3. Уровень шума на частоте 10 Гц в измерительных пунктах города Томск

Проанализируем пространственное распределение акустических шумов в городе Томске. Как было сказано ранее, наибольший уровень шумов и показатель спада в городе наблюдается на перекрестках и проспектах, где находится транспорт. В звуковом диапазоне это более ярко выражено, чем в инфразвуковом. Отсюда видно, основным источником техногенных шумов в городских условиях является транспорт. На рисунке 4 представлена карта транспортной нагрузки в городе Томске.



Рис.4. Пространственное распределение транспортной нагрузки в городе Томске.

Вдоль крупных дорог, проспектов и на больших перекрестках наблюдается повышенный транспортный поток. По проспекту Ленина, Фрунзе, Кирова, Комсомольский проходит около 4000 автомобилей в час. На маленьких улицах, таких как Белинского, Вершинина, а также в жилых районах количество автомобилей в час не превышает 1000.

Рассмотрим, как величина транспортного потока влияет на шум. Для выявления зависимости

уровня звуковых шумов от уровня транспортной нагрузки построена линейная аппроксимация указанных параметров. На рисунке 5 изображена зависимость уровня шума звуковом диапазоне частот от транспортной нагрузки.

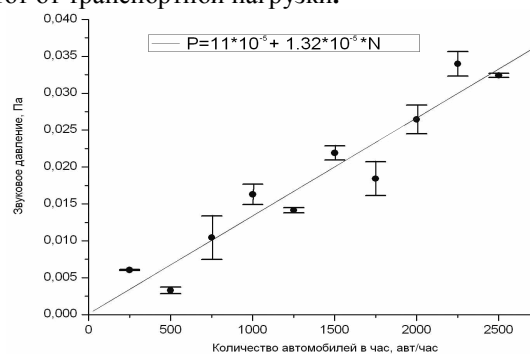


Рис.5. Уровень шума в звуковом диапазоне частот в зависимости от транспортной нагрузки.

Из рисунка 5 видно, что в звуковом диапазоне с увеличением транспортного потока до 2500 автомобилей в час уровень звукового давления увеличивается линейно. Эмпирическая модель этой зависимости имеет вид

$$P = 11 \cdot 10^{-5} + 1.32 \cdot 10^{-5} \cdot N,$$

где  $P$  – уровень звукового давления (Па),  $N$  – количество автомобилей в час (авт/час). Минимальный уровень звукового давления, который человек ощущает, называют порогом слышимости. У разных людей он различен, и поэтому условно за порог слышимости принято звуковое давление, равное  $2 \cdot 10^{-5}$  Па. Исходя из этой эмпирической модели, уровень фоновых шумов в городе превышает этот порог более чем в 5 раз.

В инфразвуковом диапазоне частот с увеличением количества транспорта уровень шума слабо меняется. Это связано с тем, что инфразвуковые волны с расстоянием затухают медленнее, чем звуковые. Так как у инфразвука длина волны больше, чем у звука, то он может огибать здания и препятствия, распространяясь на дальние расстояния. Как известно, акустическое поле является результатом суперпозиции полей различных источников. В связи с этим в городе создается квазиравномерное распределение инфразвукового фона.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск. 2001. 278 с.
2. Брюль Кьер. Шум окружающей среды. М. 2002. 203с.
3. Тейлор Р. Шум. Пер. с англ.. Арнольда Д.И./ Под ред. Исаковича М.А. М.: Мир. 1978. 308 с.

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, ИЗМЕРЕННАЯ НА СВЧ И КВЧ

*Дорофеева Г.А., Емельянов Е.В.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36  
E-mail: [dorofeeva6903@sibmail.com](mailto:dorofeeva6903@sibmail.com)

### Введение

Научно-технический прогресс непрерывно связан с созданием и использованием новых материалов, с развитием техники измерений, их характеристик. Одним из основных направлений развития современной науки является исследование наноматериалов, которые могут обладать уникальными свойствами по сравнению с массивными материалами. На сегодняшний день одними из широко исследуемых и используемых наноразмерных материалов являются углеродные нанотрубки. Наиболее значимые практические результаты достигнуты при разработке новых материалов на основе многостенных углеродных нанотрубок [1]. Ряд практических приложений многостенных углеродных нанотрубок базируется на основе их электрофизических свойств.

Под электрофизическими параметрами в данной работе подразумевается диэлектрическая проницаемость и потери исследуемых материалов.

Зачастую, при одновременном использовании нескольких методов измерений электрофизических параметров материалов, возникают противоречия в полученных результатах. В настоящей работе представлены результаты измерения ДП композиционных материалов на основе МУНТ двумя различными методами: резонаторным (методом открытого резонатора) и методом свободного пространства (с помощью спектрометра терагерцового диапазона).

### Экспериментальное оборудование

Блок-схема установки на основе открытого резонатора приведена на рисунке 1. Измерительная установка включает в себя: векторный анализатор цепей *PNA E8363B* фирмы *Agilent Technology*, 8-мм открытый резонатор, коаксиальные линии связи, а так же волноводно-коаксиальные переходы.

Векторный анализатор цепей *PNA E8363B* охватывает диапазон частот от 10 МГц до 40 ГГц. Сверхвысокочастотный сигнал от генератора по коаксиальному кабелю через ВКП поступает в элементы связи, которые возбуждают колебания в измерительном резонаторе. Прошедшая через измерительную ячейку мощность регистрируется самим анализатором цепей.

В *PNA E8363B* предусмотрено измерение частоты, как во всей полосе качания, так и в узком диапазоне, что позволяет наблюдать на экране как весь набор резонансных линий, так и каждую линию в отдельности. Векторный анализатор цепей обладает большим коэффициентом усиления вы-

ходного сигнала, что особенно важно при изучении электромагнитных параметров материалов с большими потерями. Установка довольно компактна, так как генераторный и измерительный блоки являются составляющими анализатора цепей *PNA E8363B*.

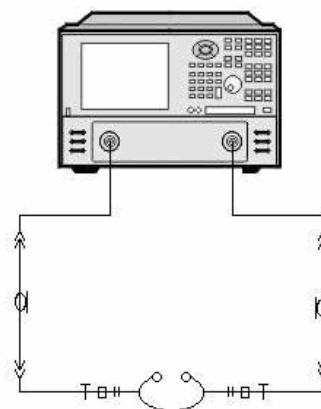


Рисунок 1 - Блок-схема экспериментальной установки на основе открытого резонатора

Блок-схема спектрометра терагерцового диапазона приведена на рисунке 2.

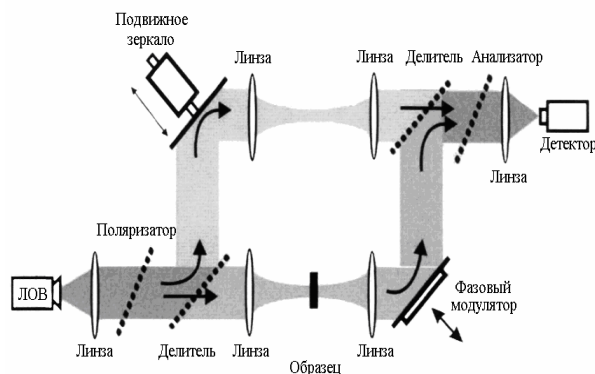


Рисунок 2 – Блок-схема спектрометра терагерцового диапазона

Выходящее из ЛОВ в открытое пространство излучение коллимируется в плоскопараллельный пучок линзой (полиэтилен, тефлон) и после прохождения измерительной схемы фокусируется такой же линзой на входное окно детектора (акустическая ячейка Голея). При измерении спектра коэффициента пропускания используется одно из плеч интерферометра Маха-Цандера (образованного делителями, фазовым модулятором и фазо-



вым компенсатором – подвижным зеркалом), в которое помещается образец.

Спектр пропускания записывается в два этапа. Вначале происходит сканирование частоты ЛОВ и снимается частотная зависимость интенсивности сигнала на приемнике без образца в измерительном тракте, затем – при наличии образца. Для измерения фазового сдвига используется второе, опорное плечо интерферометра. Измерение фазового сдвига проводится в два этапа. Сначала записывается частотная зависимость положения подвижного зеркала при отсутствии образца в измерительном тракте, а затем – при его наличии; абсолютная величина фазового сдвига рассчитывается из разности соответствующих массивов.

### Результаты измерения диэлектрической проницаемости композитов

Измерения на установке с использованием открытого резонатора были проведены в диапазоне частот 24 – 31 ГГц, с шагом примерно равным 1 ГГц, добротность резонатора в этом частотном диапазоне составила величину равную  $Q = 2000$  [2].

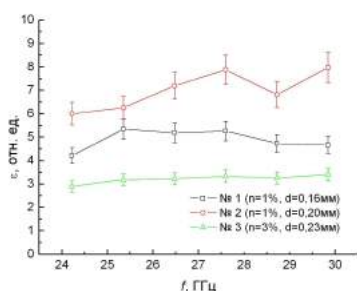


Рисунок 3 - Спектр диэлектрической проницаемости исследуемых образцов (№1 – P6FCC1/PMMA, n=1%, d=0,16 мм; №2 – P6FCA1/PMMA, n=1%, d=0,20 мм; №3 – P6FCC1/PMMA, n=3%, d=0,23 мм)

Примеры значений диэлектрической проницаемости тех же образцов, полученные на спектрометре терагерцового диапазона (диапазон частот 250 – 500 ГГц).

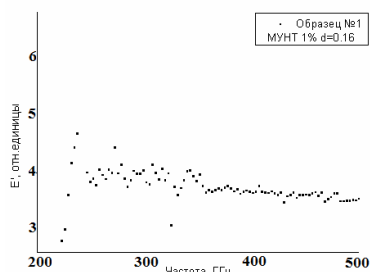


Рисунок 4 - Спектр реальной части диэлектрической проницаемости исследуемого образца №1 –

P6FCC1/PMMA, n=1%, d=0,16 мм;

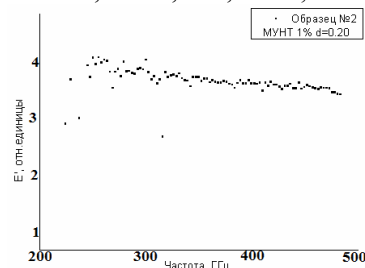


Рисунок 5 - Спектр диэлектрической проницаемости исследуемого образца №2 – P6FCA1/PMMA, n=1%, d=0,20 мм;

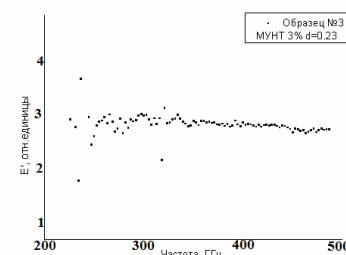


Рисунок 6 - Спектр диэлектрической проницаемости исследуемого образца №3 – P6FCC1/PMMA, n=3%, d=0,23 мм)

### Заключение

В работе показано, что спектры диэлектрической проницаемости образцов №1,3 имеют линейный характер в выбранном частотном диапазоне (рисунки 3,4,6).

Для образца №2 такая зависимость не наблюдается. Значения диэлектрической проницаемости, полученные на разных приборах, различаются (рисунки 3,5)

### Список литературы

- [1].Romanenko A.I., Anikeeva O.B., Buryakov T.I., Tkachev E.N., Zhdanov K.R., Kuznetsov V.L., Mazov I.N., Usoltseva A.N. Electrophysical properties of multiwalled carbon nanotubes with various diameters / Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics. 2009. Т. 246. № 11-12. С. 2641-2644.
- [2].Емельянов Е.В., Дорофеева Г.А. Диэлектрическая проницаемость характеристик композиционных материалов на основе многостенных углеродных нанотрубок, измеренная методом открытого квазиоптического резонатора / Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22). – Ч. 1. – С. 38 – 41.

## СПЕКТРЫ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ СВЧ АВТОГЕНЕРАТОРОВ С НЕУСТОЙЧИВЫМ СИНХРОННЫМ РЕЖИМОМ

*Усюкевич А.А., Новиков С.С.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: [usjukevitch@sibmail.com](mailto:usjukevitch@sibmail.com)

### Введение

Как известно, объединение генерирующих устройств может привести к синхронизации и установлению когерентного режима с постоянным распределением фаз. В настоящей работе обсуждаются возможные режимы колебаний в системе двух связанных СВЧ автогенераторов. Принято считать, что в подобной системе при близости частот генераторов могут существовать два основных типа когерентных регулярных движений: противофазные, синфазные и близкие к ним колебания. Однако последние исследования [1,2] показывают, что при определенных условиях система демонстрирует сложные некогерентные режимы. Так, при сильных резонансных свойствах взаимной связи синхронные колебания неустойчивы, когерентный режим разрушается, и система генерирует хаотические колебания с широкополосным сплошным спектром.

### Динамическая неустойчивость

На рисунке 1 представлена система двух автогенераторов ( $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ ) связанных через четырёхполюсник  $Y$ .

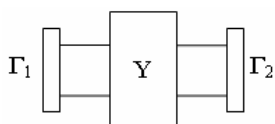


Рисунок 1 – Система связанных автогенераторов

В работе [1] показано, что четырёхполюсник  $Y$  с согласованной общей нагрузкой полностью описывается единственным элементом матрицы проводимости:

$$Y_{12} = -g \exp(j\alpha_s), \quad g > 0, \quad (1)$$

где  $\alpha_s$  – фазовый параметр цепи. Исходя из (1) можно определить следующие настройки параметра связи для когерентных режимов:

$$\operatorname{Re} Y_{12} > 0 \text{ при } \alpha_s = \pi, 3\pi \dots$$

В этой области устойчивы противофазные синхронные колебания.

$$\operatorname{Re} Y_{12} < 0 \text{ при } \alpha_s = 0, 2\pi \dots$$

В этой области устойчивы синфазные или близкие к ним синхронные колебания.

В работах [1,2] при обсуждении вопроса о локальной устойчивости было получено условие фазовой устойчивости:

$$-g/(C - 2C_{12}) < 0, (2)$$

$$2C_{12} = \left. \frac{d(y_{12}(j\omega))}{d\omega} \right|_{\omega_0},$$

где  $C$  – аналог ёмкости колебательного контура автогенератора. Параметр  $C_{12}$  определяет частотные свойства параметра связи. При малом  $C_{12}$ , когда  $2C_{12} < C$  условие (2) выполняется и синхронные колебания устойчивы. В случае  $2C_{12} > C$  устойчивость синхронных колебаний теряется.

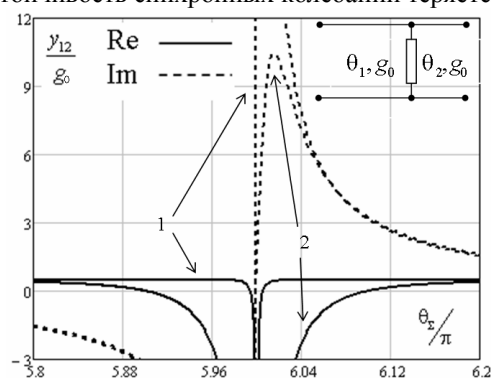


Рисунок 2 – Зависимость  $y_{12}$  от параметра несимметрии: 1 –  $\theta = 0$ , 2 –  $\theta = 36^\circ$

На рисунке 2 приведён расчёт параметра  $Y_{12}$  для цепи связи изображенной на вкладке.  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – электрические длины отрезков цепи, определяющие плоскость включения общей нагрузки;  $g_0$  – волновая проводимость канала;  $\theta = \theta_1 - \theta_2$  – параметр несимметрии;  $\theta_\Sigma = \theta_1 + \theta_2$ . Кривые 1 построены для симметричного канала ( $\theta = 0$ ). Из расчёта видно, что в таком случае параметр связи характеризуется резонансным поведением ( $2C_{12}$  велико и  $2C_{12} > C$ ), а область настройки синфазного режима ( $\operatorname{Re} Y_{12} < 0$ ) становится очень узкой, что приводит к неустойчивости когерентных колебаний. Данная неустойчивость, получившая название динамической, на практике приводит к полному разрушению синхронизма и установлению хаотического режима. Следует отметить, что введение несимметрии ( $\theta \neq 0$ ) небольшого порядка значительно расширяет область  $\operatorname{Re} Y_{12} < 0$  – кривые 2. В этой ситуации хаотические колебания не наблюдаются и устойчивыми будут синфазные колебания.

**Экспериментальное исследование**

Эксперимент был поставлен на системе связанных СВЧ автогенераторов. Мощности генераторов составляли  $30 \div 40$  мВт; частоты автогенераторов  $f_1$  и  $f_2$  изменялись в пределах  $2,9 \div 3,5$  ГГц. Топология экспериментального макета представлена на рисунке 3. Перестраиваемые варикапами генераторы собраны на биполярных транзисторах  $T_1$  и  $T_2$ . Цепь связи, выполненная в виде воздушной линии, соответствует симметричному варианту рисунка 2 ( $\theta = 0$ ). (Подробнее макет описан в [3]).

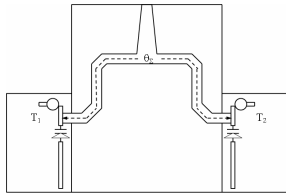


Рисунок 3 – Топология экспериментальной схемы системы двух автогенераторов

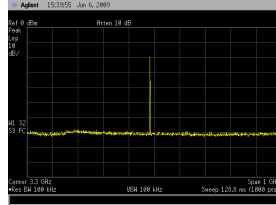
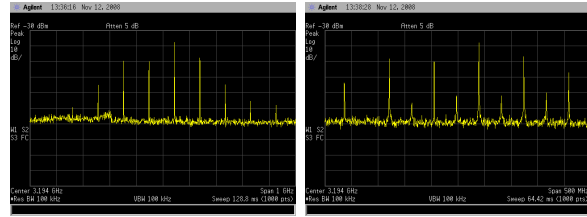


Рисунок 4 – Спектр синхронных колебаний системы двух автогенераторов ( $f_1 \approx f_2 \approx 3,290$  ГГц)

На рисунке 4 приведён одночастотный спектр при настройке в область устойчивости синхронных противофазных колебаний  $\text{Re} Y_{12} > 0$ .

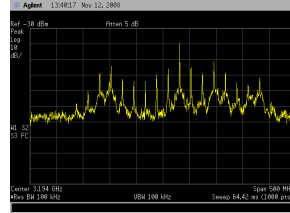
Настройка в область резонанса ( $\text{Re} Y_{12} < 0$ ) приводит к разрушению когерентности и установлению хаотических колебаний. На рисунке 5 представлена трансформация спектра системы при последовательном изменении частоты  $f_1$  одного генератора относительно постоянной частоты  $f_2$  второго. При значительной отстройке частот (рисунок 5а) наблюдается многочастотный спектр, характерный для синхронизации. Однако, дальнейшее сближение частот не приводит к захвату. Вместо этого наблюдается бифуркация с возникновением дополнительных составляющих (рисунок 5б). Дальнейшее сближение частот приводит к новым бифуркациям (рисунок 5в), в результате спектр усложняется и принимает сплошную форму. Как видно из рисунка 5г практически абсолютное равенство частот генераторов не приводит к синхронизации, вместо этого наблюдается сплошной спектр шириною порядка 1 ГГц. В отдельных экспериментах удалось получить хаотические колебания с шириной спектра достигающей 1,5 ГГц. Дальнейшее изменение расстройки при-

водит к разрушению шумового спектра – рисунок 5д и 5е.

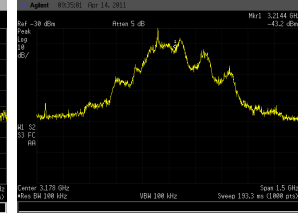


а)  $f_1 \approx 3,201$  ГГц,  
 $f_2 \approx 3,278$  ГГц

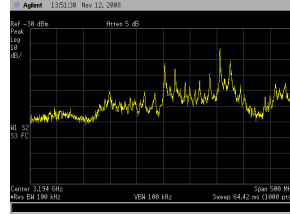
б)  $f_1 \approx 3,229$  ГГц,  
 $f_2 \approx 3,278$  ГГц



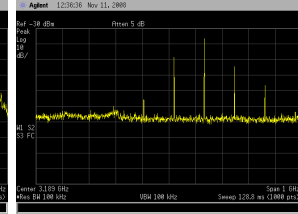
в)  $f_1 \approx 3,239$  ГГц,  
 $f_2 \approx 3,278$  ГГц



г)  $f_1 \approx f_2 \approx 3,278$  ГГц



д)  $f_1 \approx 3,309$  ГГц,  
 $f_2 \approx 3,278$  ГГц



е)  $f_1 \approx 3,318$  ГГц,  
 $f_2 \approx 3,278$  ГГц

Рисунок – 5. Трансформация спектра системы двух автогенераторов при различных частотных расстройках ( $\theta_\Sigma \approx 6\pi$ )

Следует отметить, что введение несимметрии ( $\theta \approx 30^\circ$ ) в канал связи приводит к установлению синхронного режима колебаний с результирующей мощностью порядка 60–80 мВт. Хаотические колебания при настройке уже не наблюдаются (см. рисунок 2).

**Список литературы**

[1].Новиков С.С. // Изв. Вузов. Физика, 2006 №9.Приложение. С. 265-270.  
[2].S. S. Novikov, A.A. Usjukevitch // In Proc. 16th Symposium on High Current Electronics, Tomsk, Russia, 2010, pp. 512-515.  
[3].S. S. Novikov, A.A. Usjukevitch // In Proc. 16th Symposium on High Current Electronics, Tomsk, Russia, 2010, pp. 516-520

## ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ТРЁХМЕРНОГО РАДИОВИДЕНИЯ

*Завьялова К.В., Суханов Д.Я.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: *sdv@mail.tsu.ru*

Системы радиовидения имеют множество перспективных приложений. В частности контроль качества на производстве, медицинская диагностика, обеспечение безопасности в виде досмотра пассажиров и багажа. Особый интерес представляют системы радиовидения, способные получать трёхмерные радиоизображения высокого разрешения. Среди существующих методов наиболее качественные трёхмерные радиоизображения, с разрешением близким к дифракционному пределу, позволяет получить технология радара с синтезированной апертурой (РСА) с применением сверхширокополосных сигналов [1]. Однако основным недостатком при создании подобных систем является высокая стоимость компонентов, обусловленная необходимостью измерения фазы с применением СВЧ смесителей и фильтров. Существует необходимость создания технически более простых, коммерчески доступных, быстродействующих систем радиовидения на основе локационной схемы измерений только амплитуды рассеянного поля. В данной работе предлагается новый подход к построению систем радиовидения ближнего радиуса действия, а именно: радиоголографический метод получения трёхмерных радиоизображений, основанный на измерении амплитуды интерференционной картины опорного и предметного сигналов на различных частотах в широкой полосе. При этом не используется фокусировка с помощью линз и системы зеркал для направления опорной или предметной волн.

Рассматривается следующая схема измерений (рис. 1). Передающая и приёмная антенны находятся друг от друга на фиксированном расстоянии  $d$  и образуют приемопередающий модуль. Приемопередающий модуль перемещается с определённым шагом в плоскости  $XOY$ , и производит измерения амплитуды поля на различных частотах. Передающая антенна подключена к перестраиваемому генератору монохроматических сигналов и излучает радиоволны в сторону исследуемого объекта и в сторону приёмной антенны. Волна, отражённая от объекта (предметная волна), интерферирует с прямой волной от источника (опорной волной). К приёмной антенне подключен детекторный диод, с помощью которого, через аналого-цифровой преобразователь (АЦП), измеряется интенсивность (квадрат амплитуды) волн. Зондирование осуществляется монохроматическим излучением со сканированием по частоте в широкой полосе частот. На каждой частоте производится измерение амплитуды, таким образом, реализуются широкополосные радиоголографические измерения.

Необходимо восстановить распределение неоднородностей в среде по результатам измерения амплитуды рассеянного поля на различных частотах. Используя измеренную информацию о интенсивности поля в приёмной антенне можно восстановить изображение рассеивателей в среде с помощью технологии синтеза апертуры.

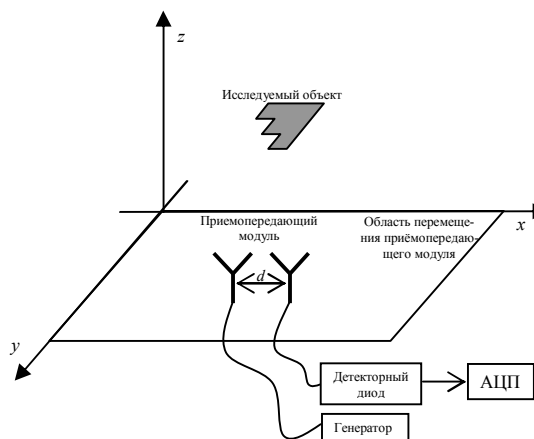


Рисунок 1 – Схема измерений

Рассмотрим скалярное приближение однократного рассеяния. Исследуемый объект представляется как множество изотропных точечных рассеивателей, которое описывается трёхмерной скалярной функцией  $\rho(x, y, z)$ . Поле в приёмной антенне на частоте  $f$  обозначим как  $U(x, y, f)$  [2]. Так как сигнал из приёмной антенны поступает в детектор, сигнал с которого оцифровывается в АЦП, в результате измерений будем иметь интенсивность поля в области измерений (напряжения на входе АЦП пропорциональны интенсивности поля в приёмной антенне):  $W(x, y, f) = |U(x, y, f)|^2$ .

Далее по измеренной функции  $W(x, y, f)$  восстанавливается изображение рассеивателей (решается обратная задача) в среде  $\rho(x, y, z)$  методом пространственно согласованной фильтрации [3]. Пространственно согласованный фильтр имеет вид:

$$H(x, y, z, f) = \frac{\exp(-ik(r_1 + r_2))}{(4\pi)^2 r_1 r_2},$$

$$\text{где } r_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad r_2 = \sqrt{(x-d)^2 + y^2 + z^2}.$$

Трёхмерное распределение неоднородностей  $\rho(x, y, z)$  восстанавливается следующим образом:

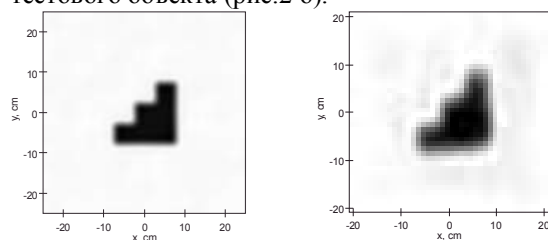
$$\rho(x, y, z) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \iint_S W(x, y, f) \cdot e^{ikd} H(x-x', y-y', z, f) dx' dy' df,$$

где множитель  $e^{ikd}$  под интегралом, устанавливает отсчёт фазы от опорного сигнала. Этот интеграл позволяет получить трёхмерное изображение, ко-

торое пропорционально коэффициенту рассеяния объектов в исследуемом пространстве  $\rho(x, y, z)$ .

На рисунке 2 а представлены результаты численного эксперимента для случая использования полосы частот от 5 ГГц до 10 ГГц, на области пространства  $1 \times 1 \times 1$  м<sup>3</sup>. При этом источник и приёмник были разнесены на расстояние 10 см, и перемещались вместе на области  $1 \times 1$  м<sup>2</sup>, с шагом 4 мм. Исследуемая неоднородность представлялась в виде плоского объекта ступенчатой формы с размером ступеньки 5 см (рис. 2), расположенного на расстоянии 30 см от области сканирования.

Кроме того, для описанной радиологической схемы измерений (рис. 1) были проведены экспериментальные исследования для диапазона частот от 1 ГГц до 13 ГГц с шагом 200 МГц. Измерения проводились для металлического объекта ступенчатой формы, с размером ступеньки 5 см, на удалении 40 см от области сканирования. Сканирование производилось на области 40 см на 40 см, с шагом 1 см. Полученные экспериментальные данные были обработаны с помощью предложенного метода. В результате было получено изображение тестового объекта (рис. 2 б).



а б  
Рисунок 2 – Восстановленное изображение исследуемого плоского объекта ступенчатой формы (а – по результатам численного эксперимента, для диапазона частот от 5 ГГц до 10 ГГц, б – по результатам натурального эксперимента, для диапазон частот от 1 ГГц до 13 ГГц (размер изображения  $50 \times 50$  см<sup>2</sup>))

Видно, что в случае численного моделирования восстановления изображения достигнуто разрешение близкое к дифракционному пределу для систем с синтезированием апертуры. В данном случае разрешение в плоскости сканирования – около 15 мм. Достигнутое разрешение по дальности составляет около 6 см, которое определяется шириной используемой полосы частот. Для используемой полосы в 5 ГГц теоретический предел разрешающей способности по дальности составляет 6 см.

Таким образом, численное моделирование показывает принципиальную возможность получения трёхмерных радиоизображений путём измерения только амплитуды поля на различных частотах при сканировании в широкой полосе частот. Трёхмерное изображение, полученное предложенным способом, имеет сравнимое качество с изображениями, получаемыми методами на основе технологии синтезирования апертуры с измерением фазы. Процедура восстановления трёхмерного изображения сводится к трёхмерному быстрому преобразованию Фурье.

Для эксперимента разрешение в плоскости получило порядка 15-20 мм, что тоже близко к дифракционному пределу для использованного диапазона частот.

Заключение:

Предложен метод трёхмерного радиовидения на основе измерения амплитуды поля интерференции предметного и опорного сигналов одиночным приёмопередающим модулем, перемещающимся в плоской прямоугольной области, при последовательном измерении на различных частотах в широкой полосе. Разрешение получаемых радиоизображений близко к теоретическому пределу для широкополосных радиолокаторов с синтезированной апертурой. Применимость предложенного метода подтверждена экспериментально.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы в рамках мероприятия 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6), а также при поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» мероприятие 2, проект № 2.1.2/3339, и при поддержке ФЦП мероприятия 1.1 «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров», ГК № 14.740.11.0076 от 06.09.2010 (2010-2012).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов/ Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: «Радиотехника», 2005. – 368 с.
2. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. -М.: Наука, -1990.
3. Федорюк М.В. Метод перевала. - М.: «Наука», 1977. - 367 с.

## ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ И ФАЗИРОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ КОМБИНИРОВАННОЙ АНТЕННЫ НА ДОБРОТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ

*Запасной А.С., Лопатина А.П., Беличенко В.П.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: [zas\\_rff@sibmail.com](mailto:zas_rff@sibmail.com)

Добротность излучения антенны является одной из наиболее важных ее характеристик, определяющих полосу рабочих частот. Классический подход к определению добротности произвольной антенны состоит в следующем: предполагается, что антенна целиком вмещается в гипотетическую сферу радиуса  $a$ . Рассчитываются запасенные вне указанной сферы электрическая ( $W_e'$ ) и магнитная ( $W_m'$ ) энергии, а также мощность излучения ( $P$ ) антенны. Энергиями, запасенными внутри сферы и потерями в антенне, пренебрегают и расчет добротности ( $Q$ ) производят по формуле:

$$Q = \begin{cases} \frac{2\omega W_e'}{P}, & W_e' > W_m' \\ \frac{2\omega W_m'}{P}, & W_m' > W_e' \end{cases}. \quad (1)$$

Реализация такого подхода в работах [1,2] позволила установить фундаментальное ограничение. Согласно ему  $Q$  не может превосходить значения

$$Q_{M1} = \left[ \frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{ka} \right], \quad (2)$$

где  $ka$  – электрический радиус сферы.

Оказывается, что именно такую добротность излучения имеют элементарный электрический или магнитный диполи, помещенные в центре сферы. Если же в центре сферы совмещены параллельно или ортогонально ориентированные электрический и магнитный диполи, то ограничение (2) несколько видоизменяется:

$$Q_{M2} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{(ka)^3} + \frac{2}{ka} \right]. \quad (3)$$

Однако ни в [1,2] ни в других известных работах не проанализированы эффекты, связанные с изменением пространственной конфигурации излучающей системы.

В данной работе сначала исследуется влияние пространственного разноразности и фазировки ортогонально ориентированных электрического и магнитного диполей на добротность излучения (Рис.1).

При выводе аналитического представления для добротности излучения использовались общие соотношения для полей произвольной системы электрических и магнитных токов в сферической системе координат [3] и подход, изложенный в [2]. При этом предполагалось, что начальные фазы токов в электрическом и магнитном диполях соот-

ветственно равны  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , а модули моментов токов связаны соотношением  $|p_2| = Z_0 \alpha |p_1|$ , где  $Z_0$  – волновое сопротивление окружающего пространства.

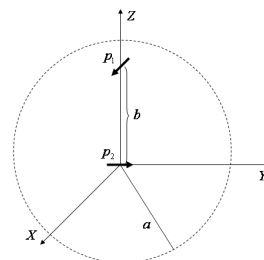


Рис.1. Ортогонально ориентированные диполи  
Окончательное расчетное соотношение выглядит следующим образом:

$$Q_R = \frac{1}{G} \left\{ \frac{1}{(kb)^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \left[ \frac{d}{db} [bj_n(kb)] \right]^2 J_n^1 + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) j_n^2(kb) J_n^2 - \right. \\ \left. - \alpha j_1(kb) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) J_1^2 + \frac{4}{3} \alpha^2 J_1^2 \right\}, \quad (4)$$

где

$$G = \frac{1}{(kb)^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \left[ \frac{d}{db} [bj_n(kb)] \right]^2 + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) j_n^2(kb) + \frac{4}{3} \alpha^2 - \\ - 4\alpha j_1(kb) \sin(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (5)$$

$$J_n^1 = \int_a^{\infty} \left[ n(n+1) |h_n^{(2)}(kr)|^2 + \left| \frac{d}{dr} [rh_n^{(2)}(kr)] \right|^2 - 1 \right] dr,$$

$$J_n^2 = \int_a^{\infty} \left[ |h_n^{(2)}(kr)|^2 - \frac{1}{(kr)^2} \right] r^2 dr.$$

Здесь  $j_n(kb)$ ,  $h_n^{(2)}(kr)$  – соответственно сферические функции Бесселя и Ханкеля второго рода, а для интегралов  $J_n^1$  и  $J_n^2$  получены аналитические выражения, которые не приводятся вследствие их громоздкости.

Расчет  $Q_R$  проводился при следующих значениях параметров:  $ka = 2$  и  $0.1 < kb < 2$ . При этом ставилась задача уменьшения значений добротности  $Q_R$  в как можно большем интервале изменения  $kb$ . Исследование показало, что наиболее оптимальным является выбор весового коэффициента



та  $\alpha = 0.4$  и разности начальных фаз  $\varphi_1 - \varphi_2 = -\pi/2$ . На рисунке 2 изображена отвечающая данному случаю зависимость  $Q_R$  от  $kb$ . На нем же для сравнения приведены значения  $Q_{M1}$  и  $Q_{M2}$  определяемые соотношениями (2) и (3).

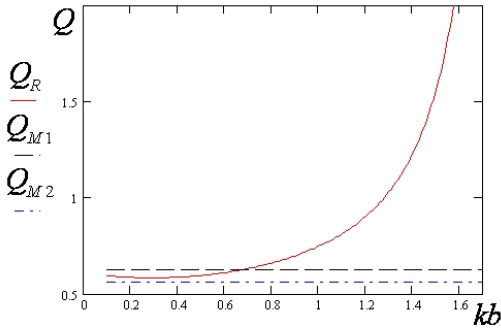


Рис.2. Добротность излучения ортогонально ориентированных диполей.

Как видно в интервале  $0.1 < kb < 0.65$  значения  $Q_R$  оказываются меньшими чем  $Q_{M1}$ , но большими чем  $Q_{M2}$ . Дополнительный анализ показал, что основной причиной, определяющей подобную зависимость  $Q_R$  является наличие специфического интерференционного потока энергии, особенности которого были проанализированы в работе [4]. С целью обеспечения существенного изменения структуры этого потока излучающая система была дополнена еще одним электрическим диполем (Рис.3.) с моментом  $p_3$  ( $|p_3| = |p_1|$ ) и начальной фазой тока  $\varphi_3$ . Подобную систему можно рассматривать как одну из возможных моделей комбинированной антенны [4].

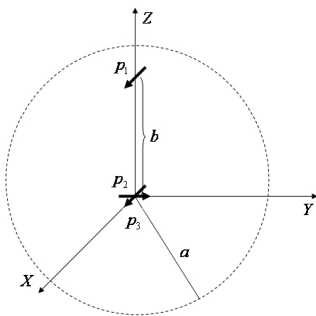


Рис.3. Модель комбинированной антенны

Процедура вывода расчетных соотношений повторяет, в своей основе, вывод выражения (4). Отличительной чертой окончательных результатов является наличие еще одного интерференционного потока энергии обусловленного взаимодействием электрических диполей. Нормированное выражение этого потока характеризующее его зависимость от параметров  $kb$  и  $\varphi_1 - \varphi_3$  имеет следующий вид:

$$G_{13} = \frac{4}{kb} \frac{d}{db} [bj_1(kb)] \cos(\varphi_1 - \varphi_3) \quad (6)$$

Как видно из сопоставления (5) и (6) это отличие связано с иной зависимостью от параметра  $kb$  и разности начальных фаз.

На рисунке 4 представлена зависимость добротности излучения  $Q_Z$  анализируемой модели комбинированной антенны, соответствующая оптимальному подбору параметров:  $\alpha = 1.7$ ,  $\varphi_1 - \varphi_2 = -\pi/2$  и  $\varphi_1 - \varphi_3 = 0$ .

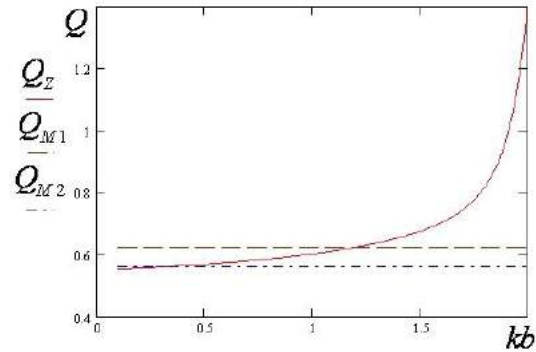


Рис.4. Добротность излучения модели комбинированной антенны

Здесь отчетливо проявляется заметное расширение интервала значений параметра  $kb$  ( $0.1 < kb < 1.18$ ), в пределах которого добротность исследуемой модели антенны оказывается меньше добротности уединенного диполя. Более того, в области малых значений  $kb$  она весьма близка к добротности  $Q_{M2}$ .

Таким образом, в результате проведенного исследования показано, что путем изменения в комбинированной антенне относительного положения составляющих ее элементов, амплитуд и начальных фаз токов можно управлять добротностью излучения антенны, а следовательно и ее полосой рабочих частот.

Список литературы:

1. Chu L.J. Physical limitations of omnidirectional antennas // Journal of Applied Physics. – 1948. – V. 19. – P.1163–1175.
2. McLean J.S. A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas // IEEE Trans. Antennas and Prop. – 1996. – V. 44. – №5. – P.672–676.
3. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. – М.: Радио и связь, 1983. – 296 с
4. Беличенко В.П., Якубов В.П., Запасной А.С., Конкурирующие интерференционные потоки энергии в комбинированных антеннах и их влияние на полосу пропускания и мощность излучения // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т.53. – №9/2. – С.110–111

## РАДИОСПЕКТРОСКОП ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОТКЛИКА ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ В ДИАПАЗОНЕ 26-38 ГГц

*Землянухин Ю.П., Журавлев В.А., Сусляев В.И., Бабинович А.Н.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: ypz@mf.tsu.ru

Исследование материальных параметров листовых материалов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн можно проводить с помощью квазиоптических преобразователей. Измеряемыми величинами являются комплексные коэффициенты отражения ( $R$ ) и прохождения ( $T$ ) электромагнитных волн. Эти коэффициенты зависят от толщины слоя магнетодиэлектрика ( $d$ ) и значений комплексных магнитной  $\mu = \mu' + i\mu''$  и диэлектрической  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$  проницаемостей. Здесь  $\mu'$ ,  $\epsilon'$  – действительные,  $\mu''$ ,  $\epsilon''$  – мнимые части проницаемостей,  $i$  – мнимая единица. В зависимости от типа аппаратуры измеряются либо модули  $|R|$ ,  $|T|$  этих величин (с помощью скалярных анализаторов цепей), либо модули  $|R|$ ,  $|T|$  и фазы  $\varphi_R$ ,  $\varphi_T$  (с помощью векторных анализаторов цепей). Соответственно скалярные анализаторы цепей дают возможность определять из эксперимента только две величины: или значения  $\mu'$ ,  $\mu''$  при известных  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  или наоборот. Векторные анализаторы позволяют вычислить все материальные параметры. В плосковолновом приближении выражения для коэффициентов отражения и прохождения могут быть записаны в виде:

$$R = \frac{\rho(1 - e^{-2i\gamma d})}{1 - \rho^2 e^{-2i\gamma d}},$$

$$T = \frac{\{1 - \rho^2\} e^{-i\gamma d}}{1 - \rho^2 e^{-2i\gamma d}},$$
(1)

где  $\rho = \frac{Z-1}{Z+1}$  – коэффициент отражения от перед-

ней грани магнетодиэлектрика,  $Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$  – волновое сопротивление,  $\gamma = k_0 \sqrt{\mu\epsilon}$  – постоянная распространения электромагнитной волны в слое магнетодиэлектрика,  $k_0 = \omega/c$  – волновое число свободного пространства,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота электромагнитного процесса. Отметим, что для измерения величин  $|R|$ ,  $|T|$  и  $\varphi_R$ ,  $\varphi_T$  могут быть использованы стандартные анализаторы цепей, дополненные специальными квазиоптическими преобразователями.

Блок-схема одного из вариантов измерительного квазиоптического преобразователя приведена на рис. 1. Он построен на основе панорамного измерителя коэффициента стоячей волны (КСВн) и коэффициента прохождения типа P2-65. Диапазон рабочих частот измерителя 26 до 37,5 ГГц.

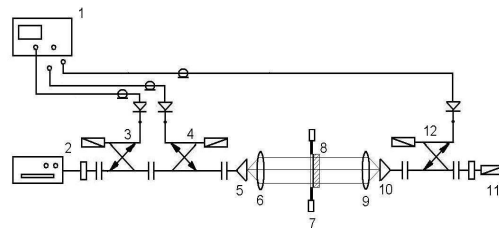


Рис.1. Блок-схема квазиоптической установки для исследования коэффициентов прохождения и отражения: 1 – индикаторный блок Я2Р-67; 2 – генератор качающейся частоты P2-65; 3, 4, 12 – направленные ответвители; 5, 10 – рупорные преобразователи; 6, 9 – фторопластовые линзы с фокусным расстоянием 6 см; 7 – диафрагма; 8 – измеряемый образец, 11 – согласованная нагрузка.

Измерительный комплекс состоит из волноводной и квазиоптической части. СВЧ сигнал от генератора качающейся частоты 2 подается на направленный ответвитель 3, измеряющий мощность падающей волны и направленный ответвитель 4, измеряющий мощность отраженной от измерительной квазиоптической ячейки волны. С помощью рупора 5 и фокусирующей линзы 6 формируется волновой пучок с плоским фронтом, который поступает на диафрагму 7, изготовленную из поглощающего СВЧ мощность материала с круглым отверстием диаметром 50 мм. На обратной стороне диафрагмы крепится плоскопараллельный образец исследуемого материала 8. Далее с помощью линзы 9 и рупора 10 осуществляется обратная фокусировка СВЧ мощности в направленный ответвитель 12, измеряющий мощность прошедшей через измерительную ячейку волны. Волноводный тракт оканчивается согласованной нагрузкой 11. Измерение падающей, отраженной и прошедшей волн происходит в индикаторном блоке 1 типа Я2Р-67 измерителя.

Метрологические характеристики квазиоптического преобразователя для измерения частотных зависимостей коэффициента прохождения тестировались с помощью плоскопараллельных образцов диэлектриков с известной диэлектрической проницаемостью. Образцы являются стандартными образцами предприятия и прошли метрологическую проверку в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии, г. Новосибирск. Параметры образцов приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Метрологические характеристики стандартных образцов предприятия (СОП).

Номер СОП	Калибруемый параметр	
	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь
СОП-1	3,81	0,00028
СОП-2	3,81	0,00008
СОП-3	4,98	0,0086
СОП-4	4,74	0,0070
СОП-5	6,34	0,0082
СОП-6	8,02	0,0056
СОП-7	9,40	0,0055

На рис.2 приведены частотные зависимости коэффициентов прохождения, измеренные на данных образцах. Точки – измеренные значения, кривая 2 получена усреднением экспериментальных данных по 5 точкам. Кривая 1 – расчетная зависимость коэффициента прохождения, вычисленная по формуле (1). Видно, что отклонение усредненной измеренной зависимости  $|T|$  от теоретической не превышает 0,5 дБ для всех образцов.

В связи с этим, путем сопоставления расчетной и измеренной величин коэффициента прохождения можно находить значения диэлектрической проницаемости листовых диэлектриков  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ , если в данном диапазоне ее дисперсия отсутствует или мала. Результаты таких измерений представлены на рисунке 3.

Получено, что  $\epsilon'$  у материала на рис. 3а составляет  $\approx 2,8$ , на рис. 3б –  $\epsilon' \approx 9$ . Тангенс угла потерь у обоих материалов мал и составляет около 0.005. Таким образом, из измерения частотных зависимостей коэффициентов прохождения квазиоптическим методом можно определять величины диэлектрической проницаемости листовых материалов.

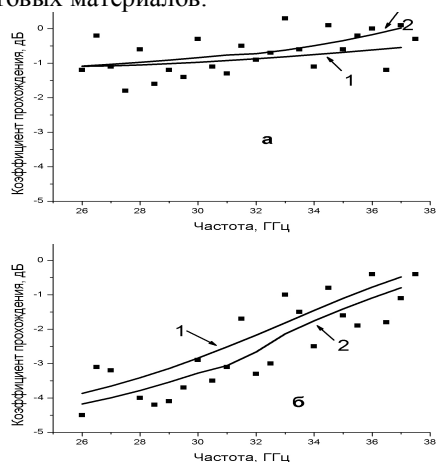


Рис. 3. Измерение  $\epsilon$  листовых диэлектрических материалов.

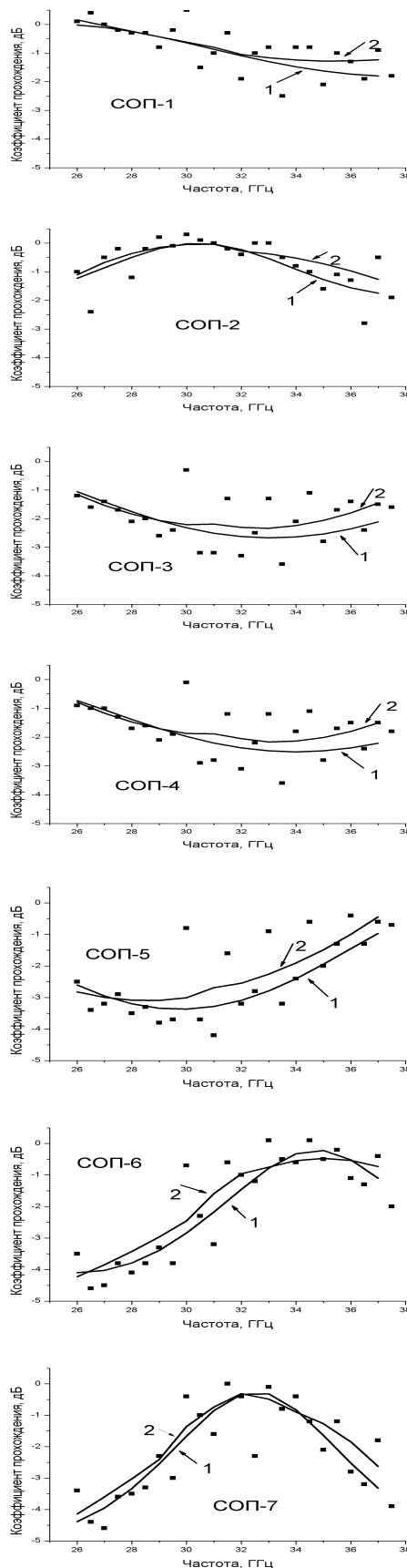


Рис.2. Частотные зависимости коэффициента отражения

## ЗВУКОВОЕ ВИДЕНИЕ ЗВУКОИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

*Калашикова М.А., Суханов Д.Я.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: [sdv@mail.tsu.ru](mailto:sdv@mail.tsu.ru)

Ультразвуковой контроль качества различных изделий на производстве и в процессе эксплуатации имеет широкое распространение вследствие высокой чувствительности к скрытым дефектам, простоте применения, и низкой стоимостью диагностического оборудования. Большинство методов ультразвукового контроля требуют прямого контакта ультразвуковых датчиков и исследуемого объекта, что усложняет процесс обследования на дефекты для объектов сложных геометрических форм. Существуют методы ультразвукового контроля, основанные на погружении исследуемого объекта в звукопроводящую жидкость, что упрощает обследование сложных объектов, однако не все объекты допустимо погружать в жидкость. В данной работе предлагается метод бесконтактного ультразвукового видения звукоизлучающих объектов через воздух. Предполагается, что исследуемый объект является источником звука с широким спектром с частотами до 100 кГц. Предлагаемый метод может найти применение в системах бесконтактного ультразвукового контроля качества.

Будем рассматривать плоский звукоизлучающий объект, звуковые сигналы от которого измеряются двумерной заполненной решёткой микрофонов на расстоянии  $h$  (рисунок 1).

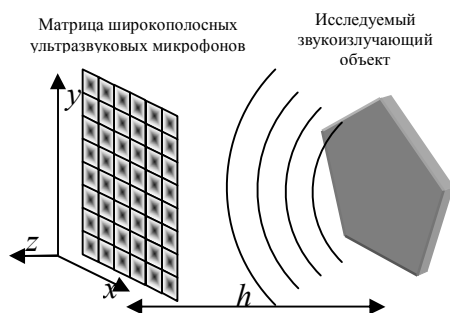


Рисунок 1 – Схема измерений

Обозначим поле, излучаемое объектом на различных частотах в непосредственной близости от него функцией  $v(x, y, f)$ . Тогда, поле в плоскости матрицы микрофонов можно записать в виде:

$$U(x, y, f) = \iint_S v(x', y', f) \frac{e^{ik\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + h^2}}}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + h^2}} dx' dy', \quad (1)$$

где  $S$  - область, занимаемая плоским объектом,  
 $k = \frac{2\pi f}{c}$  - волновое число в воздухе.

Чтобы восстановить изображение объекта необходимо, по измеренному полю  $U(x, y, f)$  восстановить поле  $v(x, y, f)$ , с помощью которого определяются области объекта, где происходит излучение звука. В случае если плоский объект однород-

ный, то его излучение будет почти равномерным со всей поверхности, а если объект содержит дефект в виде трещины или деформации, то в этой области будет некоторая особенность излучаемого звукового поля  $v(x, y, f)$ .

Излучаемое поле можно найти методом пространственно согласованной фильтрации:

$$V(x, y, f) = \iint_S U(x', y', f) \frac{e^{-ik\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + h^2}}}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + h^2}} dx' dy'. \quad (2)$$

Изображение дефектов, целесообразно визуализировать с помощью следующей операции:

$$M(x, y) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} |V(x, y, f)| df. \quad (3)$$

Для проверки предложенного метода было проведено численное моделирование и эксперимент по восстановлению изображения вибрирующей пластины. Численный эксперимент осуществлялся в полосе частот 30-60 кГц для пластины с прямолинейным вырезом (рисунок 2). На рисунке 3 представлено поле  $v(x, y, f)$  на частоте 60 кГц.

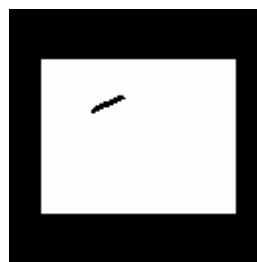


Рисунок 2 – Пластина размерами 15,5 см на 12,5 см с дефектом



Рисунок 3 – Изображение звукового поля излучения пластины на частоте 60 кГц

Результат численного моделирования поля в плоскости матрицы микрофонов представлен на рисунке 4. С помощью формул (2) и (3) была решена задача восстановления изображения пластины с дефектом (рисунок 5). Можно отчетливо различить границы самой пластины, а также контуры дефекта.

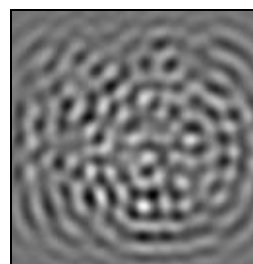


Рисунок 4 – Звуковое поле в плоскости измерений на частоте 60 кГц на области 20 см на 20 см.

Рисунок 5 – Восстановленное изображение пластины с дефектом

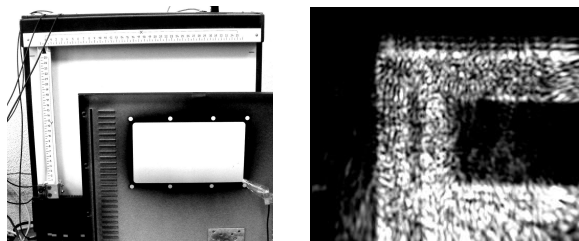
Рисунок 6 – Фотография экспериментальной установки

Рисунок 7 – Восстановленное изображение тестового объекта (изображение 30 см на 24 см)

В соответствии со схемой на рисунке 1, был проведён эксперимент с металлической пластиной (часть корпуса персонального компьютера) в полосе частот 37-43 кГц (рисунок 6). К металлической пластине был прислонён ультразвуковой излучатель, для возбуждения вибрации пластины в полосе частот 37-43 кГц. Вместо матрицы микрофонов использовался механическое двухкоординатное позиционирующее устройство, которое размещало микрофон в различных точках в плоскости на области 30 см на 24 см. В результате обработки данных измерений согласно формулам (2)-(3) было восстановлено изображение пластины (рисунок 7), можно видеть контуры пластины, и область горизонтальных вырезов.

В результате численных и экспериментальных исследований подтверждена возможность восстановления изображения плоского широкополосного источника звука и определения его неоднородностей.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы в рамках мероприятия 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6), а также при поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» мероприятие 2, проект № 2.1.2/3339, и при поддержке ФЦП мероприятие 1.1 «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров», ГК № 14.740.11.0076 от 06.09.2010 (2010-2012).



#### ЛИТЕРАТУРА

1. Грегуш П. Звуковидение. – Москва: Мир, 1982. – 229 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ ФОКУСИРОВКИ В ЗАДАЧАХ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА НЕРОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*Клоков А.В., Якубов В.П., Сато М.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: [701-kav@elefot.tsu.ru](mailto:701-kav@elefot.tsu.ru)

В настоящее время, благодаря, техническому прогрессу и уменьшению стоимости, получили широкое распространение системы подповерхностного зондирования, т.е. георадары. Эти системы позволяют проводить неразрушающие подземные исследования в промышленных целях, таких как поиск потерянных линий связи, контроль состояния труб водо и газоснабжения, обнаружения мин, подземных вод, поиск минеральных ресурсов, а также для археологических и исторических целей, т. е. изучение археологических слоев Земли, поиск различного рода артефактов и т.д. В связи с этим встает вопрос быстрой и качественной обработки данных, которые получены с помощью георадаров. Основным методом обработки подземных данных, является фокусировка отраженных сигналов.

В результате дифракции каждый точечный рассеиватель находящийся в однородной среде отображается в виде гиперболы. В этом случае истинное положение рассеивателя соответствует вершине гиперболы. Фокусировка перемещает отражения в их истинные позиции убирая эффект дифракции, тем самым увеличивая пространственное разрешение и позволяя получить изображение.

В обработке данных наиболее широко используются два метода фокусировки: метод дифракционного суммирования во временной области [1] и миграция Столта в спектральной области [1, 2].

Эксперимент был проведен в лабораторных условиях в ящике с песком в Центре Исследований Северо-восточной Азии, Университет Тохоку (Сендай, Япония). Зондирование проводилось оборудованием фирмы MALA Geoscience, работающим в режиме реального времени и с лазерной системой контроля координат зондирования iGPS [3]. Был создан искусственный холм (Рис. 1), а в качестве тестового объекта использована металлическая сфера диаметром 15 см, помещенная в песок на глубину порядка 20 см. Диэлектрическая проницаемость песка примерно равна 4.

В каждой точке измерялась форма отраженного сигнала с частотой дискретизации равной 512 точек на временное окно. На рисунке 2 в оттенках серого цвета показаны исходные измеренные данные в зависимости от положения на траектории измерений (горизонтальная ось) и времени (вертикальная ось). На этом рисунке хорошо видны отражения от границы воздух-песок и форма дифракционных гипербол вызванных отражением сигнала от тестового объекта. Типичные осцилло-

граммы наблюдаемого сигнала и его спектр, показаны на рисунке 3.

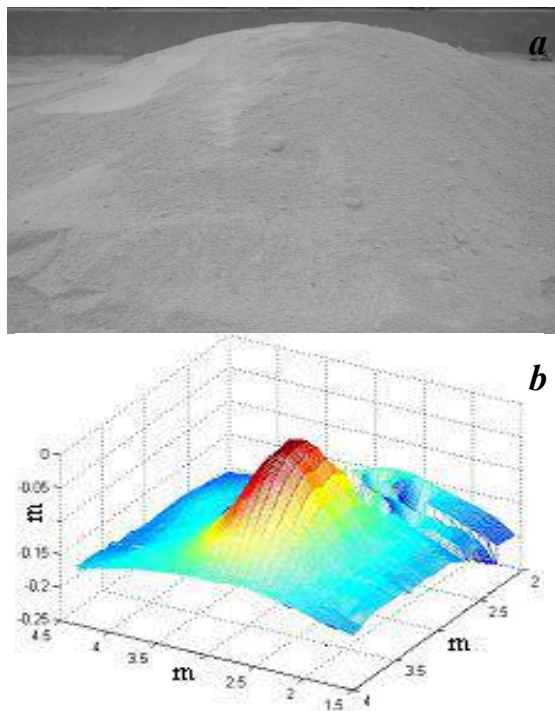


Рис. 1. Искусственный холм (а) и его модель (б).

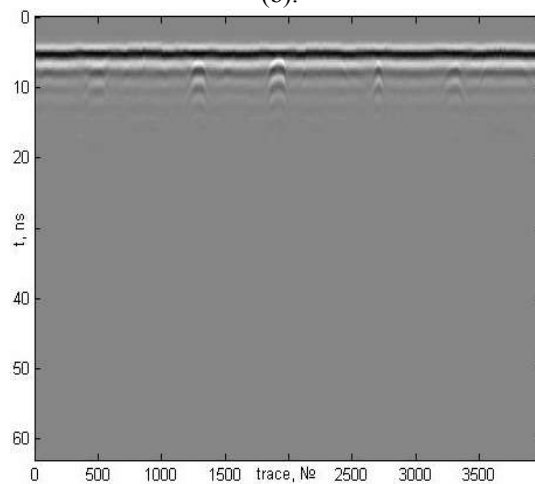


Рис. 2. Исходные данные измерения.



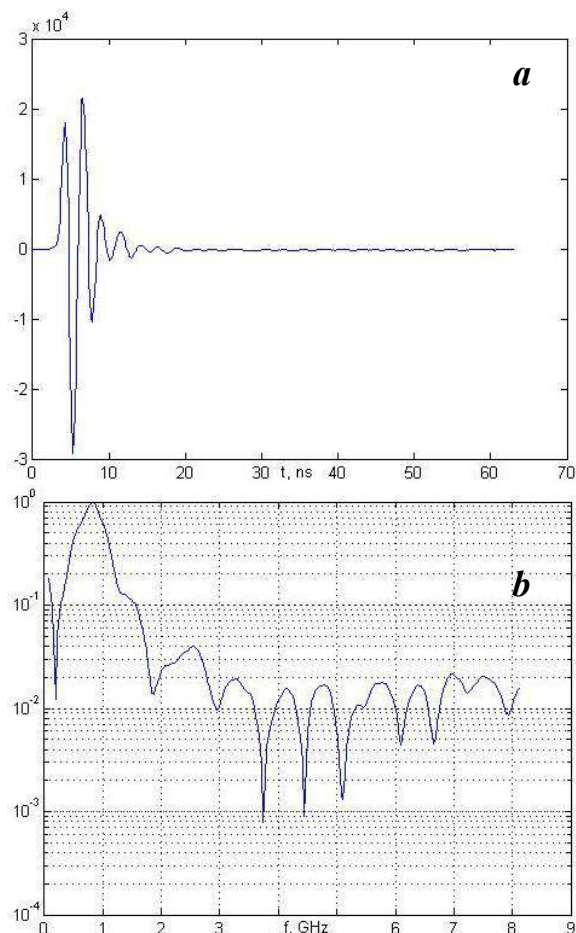


Рис. 3. Форма наблюдаемого сигнала (а) и его спектр (b).

Восстановленное трехмерное изображение (X и Y плоскости) искусственного холма и металлической сферы показаны на рисунке 4. Фокусировка осуществлялась с помощью алгоритма дифракционного суммирования и в предположении неровной поверхности:

$$S(\mathbf{R}_F) = \sum_j S\left(t = \frac{2|\mathbf{R}_j - \mathbf{R}_F|}{v}\right)$$

Тестовый объект отмечен окружностью. На рисунке видно, что поперечные и продольные размеры сферы не равны, это связано с различными выборками шагов вдоль X и Y координат. В эксперименте использовалась прямоугольная сетка с 21 точкой в поперечном направлении и 200 точек в продольном направлении. Также видно, что форма отраженного сигнала от границы песок-воздух совпадает с формой рельефа искусственного холма.

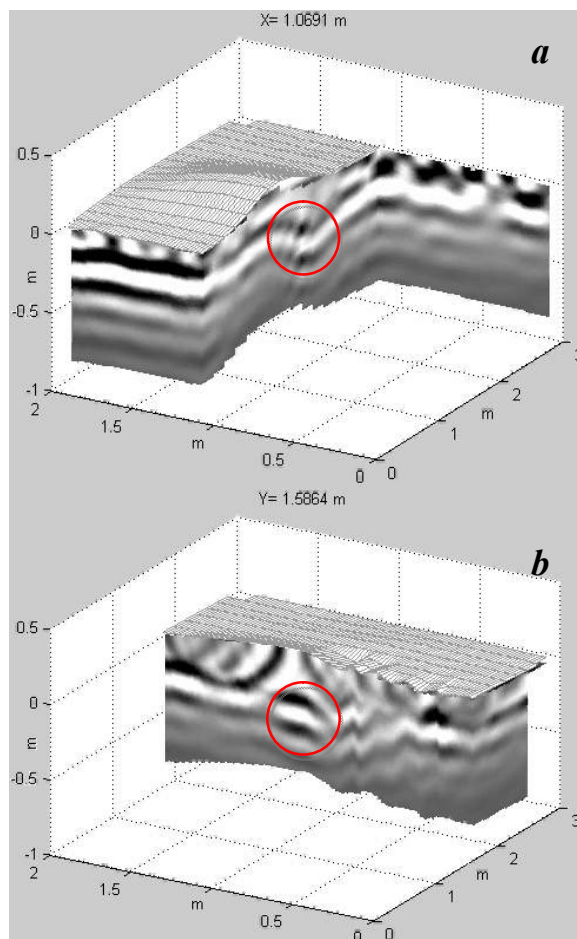


Рис. 4. Восстановленное трехмерное изображение искусственного холма и металлической сферы X - плоскость (a) and Y - плоскость (b).

В заключение хотелось бы отметить, что экспериментальные результаты демонстрируют возможность выполнения полного трехмерного восстановления подповерхностного изображения методом фокусировки на неровной поверхности в лабораторных условиях.

Дальнейшая работа будет сосредоточена на реализации и тестирования этой системы для восстановления изображений с учетом топографических свойства поверхности в полевых условиях.

Список литературы:

- [1] Yilmaz, Oz, Doherty, Stephen M., editor, 2001, Seismic Data Analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data.
- [2] Stolt, R.H., 1978, Migration by Fourier transform, Geophysics, 43, no. 1, 23- 48.
- [3] Depenthal, C., Schwendemann, J., iGPS – a New System for Static and Kinematic Measurements, Optical 3-D Measurement Techniques IX, Vol. I, Vienna, Austria, Jul. 1-3, 2009, pp. 131-140

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

*Козик А.А., Кузнецова С.И.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: [amadela@sibmail.com](mailto:amadela@sibmail.com)

С помощью универсального широкополосного радиоспектроскопа СВЧ на базе анализатора цепей E836B фирмы Agilent Technologies измерены диэлектрические спектры водных растворов  $\text{CuSO}_4$  и  $\text{NaCl}$  в диапазоне частот от 0,5 до 40 ГГц. Проводилось сравнение измеренных спектров со спектром дистиллированной воды. Влияние на спектры растворов внешнего постоянного магнитного поля напряженностью 35 мТл, превышающее ошибку эксперимента, обнаружено для области малых концентраций солей.

Для задач дистанционного зондирования морей и океанов необходимо создание эталонных растворов солей и их фундаментальное исследование в лабораторных условиях. В то время как растворы  $\text{NaCl}$  давно исследованы, для солей меди получены ограниченные электрофизические данные. В настоящее время активно исследуется влияние магнитного поля на чистую воду, и значительно меньше публикаций по влиянию магнитного поля на водные растворы электролитов.

В данной работе спектры комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) для дистиллированной воды и водных растворов  $\text{NaCl}$  и  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  измерялись с помощью универсального широкополосного радиоспектроскопа СВЧ на базе анализатора цепей E836B фирмы Agilent Technologies. Применялся метод открытого конца коаксиала с пересчетом комплексного коэффициента отражения в комплексную диэлектрическую проницаемость (КДП). Измерительная ячейка представляла собой пробирку с испытуемой жидкостью, в которую погружался коаксиальный датчик.

Сначала измерялись спектры КДП бидистиллированной деионизованной воды класса А. Затем готовились растворы  $\text{CuSO}_4$  и  $\text{NaCl}$  на основе реактивов классификации ЧДА. Диэлектрические спектры растворов сравнивались со спектрами чистой воды в области частот от 0,5 до 40 ГГц. Измеренные диэлектрические спектры представлены на рисунках 1, 2.

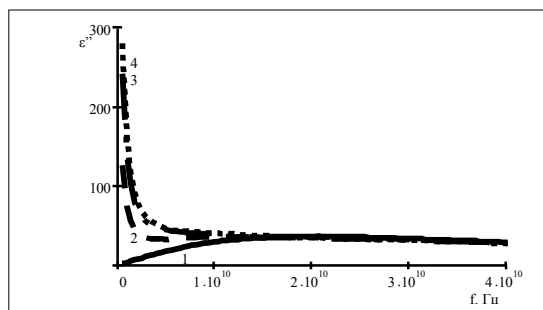
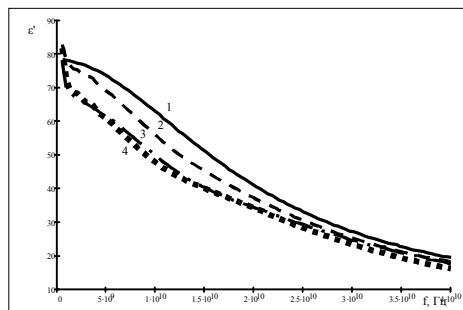


Рис.1 Частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости при различных концентрациях раствора  $\text{NaCl}$  1-дистиллированная вода, 2- водный раствор  $\text{NaCl}$  концентрации 4,6%, 3 – 8,8%, 4- 14,6%

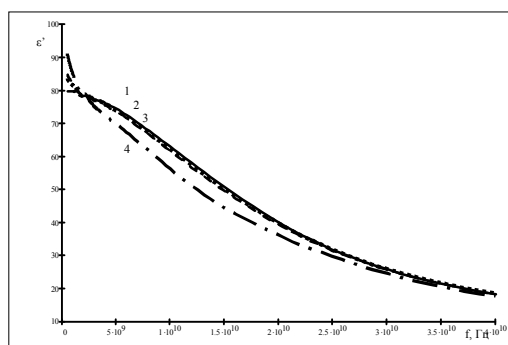


Рис.2а Частотная зависимость действительной части комплексной диэлектрической проницаемости при различных концентрациях раствора  $\text{CuSO}_4$  1-дистиллированная вода, 2- водный раствор  $\text{CuSO}_4$  концентрации <1%, 3 – 1%, 4- 5%

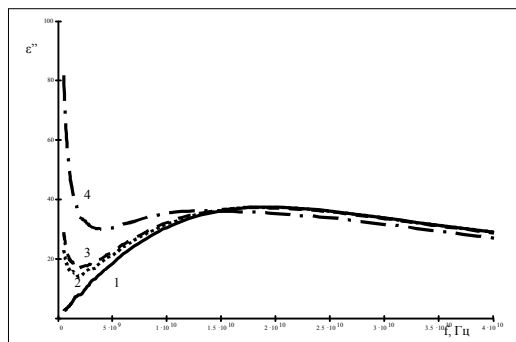


Рис.2б Частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости при различных концентрациях раствора  $\text{CuSO}_4$  1- дистиллированная вода, 2- водный раствор  $\text{CuSO}_4$  концентрации  $<1\%$ , 3 –  $1\%$ , 4-  $5\%$

Далее на воду и растворы воздействовали постоянным магнитным полем напряженностью 35 мТл в течение 15 минут. Данные по дистиллированной воде и 0,9% физиологическому раствору NaCl показаны на рисунках 3 и 4. Из полученных данных мы можем сделать вывод, что на чистую воду и водные растворы электролитов с малыми концентрациями ( $<1\%$ ) магнитное поле оказывает влияние, уменьшая действительную часть диэлектрической проницаемости до 5%, что превышает погрешность измерений (1%). А при концентрации солей  $>1\%$  не заметно изменений спектральных характеристик.

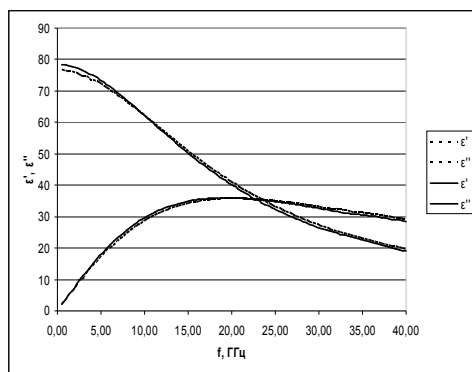


Рис.3. Частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости для чистой дистиллированной воды (1) и намагниченной воды (2). Магнитное поле 50 мТл.

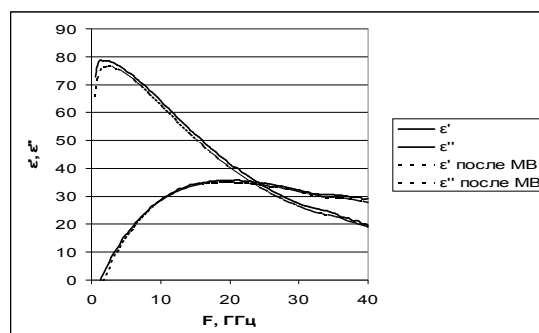


Рис.4. Частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости 0,9% раствора NaCl до и после воздействия магнитным полем 35 мТл.

Это можно попробовать объяснить следующим образом. Существует мнение, что молекулы растворителя (воды) в поле иона утрачивают возможность переориентации во внешнем поле. Поле ионов их «связывает». Снижение  $\epsilon'$  и увеличение  $\epsilon''$  служат доказательством затруднения процесса переориентации диполей воды во внешнем высокочастотном электрическом поле. В нашей ситуации внутреннее поле ионов, стабилизируя структуру раствора, препятствует воздействию на раствор внешнего магнитного поля. Для очень малых концентраций раствора ( $<1\%$ ) всё же можно говорить о влиянии магнитного поля, что фактически наблюдалось в данной работе для NaCl. С увеличением концентрации до  $1\%$  это влияние прекращается.

Из экспериментально полученных зависимостей можно сделать следующие выводы.

- 1) Магнитное поле порядка 35 мТл -50 мТл влияет на электрофизические характеристики чистой дистиллированной воды, это слабое, но заметное по диэлектрическим спектрам влияние.
- 2) Добавление в воду солей значительно увеличивает мнимую часть КДП, делая зависимость  $\epsilon''$  от частоты резко нелинейной, а также изменяет частотную зависимость действительной части КДП.
- 3) Наличие большого количества ионов соли в растворе делает невозможным влияние внешнего магнитного поля.

## МИКРОПОЛОСКОВАЯ АНТЕННАЯ РЕШЁТКА ДЛЯ РАДИОЛОКАТОРА РЕЧНЫХ СУДОВ

*Коноваленко М.О., Буянов Ю.И.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: [konovalenko@micran.ru](mailto:konovalenko@micran.ru)

Аннотация: Предложена конструкция микрополосковой коллинеарной антенной решётки с шириной диаграммы направленности  $1^\circ$  и уровнем боковых лепестков менее  $-25$  дБ. Проведен теоретический анализ факторов, влияющих на характеристики направленности антенны. Предложена методика измерения амплитудно-фазового распределения и настройки антенны. Приведены результаты измерений характеристик направленности опытных образцов антенной системы.

В импульсных радиолокаторах для речных и морских судов выпускаемых зарубежными фирмами в качестве антенных систем используются обычно волноводно-щелевые антенные решётки (АР) с последовательным возбуждением, полоса рабочих частот которых составляет менее 1% из-за отклонения максимума диаграммы направленности (ДН) при изменении частоты [1]. Например, при основной частоте около 10 ГГц и её изменении на 150 МГц отклонение максимума волноводно-щелевой АР размером порядка 2 м составляет почти  $1.5^\circ$ . Этот серьёзный недостаток накладывает ограничение на ширину полосы частот излучаемого или принимаемого сигнала АР, что не позволяет получить высокое разрешение радиолокаторов по дальности в 1 м и доли метров. Для увеличения разрешающей способности по дальности радиолокатора требуется узконаправленная антенная система 3-х сантиметрового диапазона радиоволн с полосой пропускания до 5%, которая даёт возможность использования широкополосных сигналов с полосой частот в сотни мегагерц.

В данной работе показан вариант практической реализации микрополосковой коллинеарной двухметровой АР с последовательно-параллельным питанием отдельных излучающих элементов, разработанной для судовой РЛС ближнего обзора. АР имеет ширину полосы рабочих частот 300 МГц, что позволило достигнуть в РЛС разрешения по дальности 1.5 м.

В многоэлементных узконаправленных АР, когда количество элементарных излучателей достигает десятки и сотни штук, обеспечение синфазного возбуждения всех элементов – это очень непростая задача. В свою очередь для исключения возможности отклонения максимума ДН или изменения её формы от частоты следует получить синфазное распределение по раскрытию АР. В данной работе АР разбивается на секции в количестве 8 шт. (рис. 1а). Каждая секция представляет собой отдельную синфазную коллинеарную АР из 22 вибраторов [2]. Вибраторы выполнены в виде по-

луволовых отрезков несимметричных микрополосковых линий. Синфазное возбуждение вибраторов достигается тем, что каждый последующий вибратор присоединяется к предыдущему, при этом концы линий перекрещиваются (рис. 1б). Итого, общая длина микрополосковой АР равна 1.9 м., раскрыв которой обеспечивает ширину ДН в горизонтальной плоскости по уровню половинной мощности, равную  $1^\circ$ .

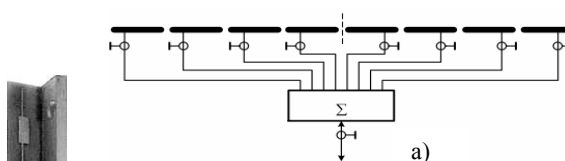


Рис.1. а) Функциональная схема АР, б) Конструкция секции АР

Для ослабления частотной зависимости положения максимума ДН возбуждение каждой секции осуществляется вблизи ее середины. Смещение точки возбуждения из середины секции необходимо для того, чтобы амплитуды в крайних вибраторах одной секции различались на 2-3 дБ. Это позволяет получить распределение поля в соответствии с рис. 2., т.е. амплитуда по всей длине АР имеет спадающий к краям закон распределения. В результате разность амплитуды относительно центра АР и края составляет 12 дБ, при этом расчетный уровень боковых лепестков ДН АР (рис. 3) менее  $-21$  дБ вблизи главного лепестка и менее  $-30$  дБ при положении более  $\pm 10^\circ$ .

Для обеспечения амплитудного распределения поля в соответствии с кривой рис. 2 используемый делитель мощности выполнен в виде синфазного неравновесного сумматора. При этом перепад относительно коэффициента передачи соседних входов составляет 3 дБ по направлению от входа 4 к входам 3-1 и от входа 5 по направлению к входам 6-8. Питающие секции линии имеют равную электрическую длину для синфазного возбуждения относительно друг друга.

Для формирования ДН в вертикальной плоскости все восемь секций размещены в одном рупоре (рис. 4), что обеспечивает ширину ДН в вертикальной плоскости порядка  $27^\circ$ .

На рис. 5 приведены результаты измеренной ДН изготовленной АР.

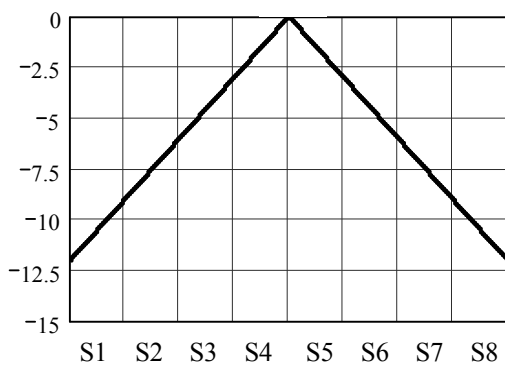


Рис.2. Амплитудное распределение поля по раскрытию антенной решётки (S1, S2, ..., S8 – номер секции)

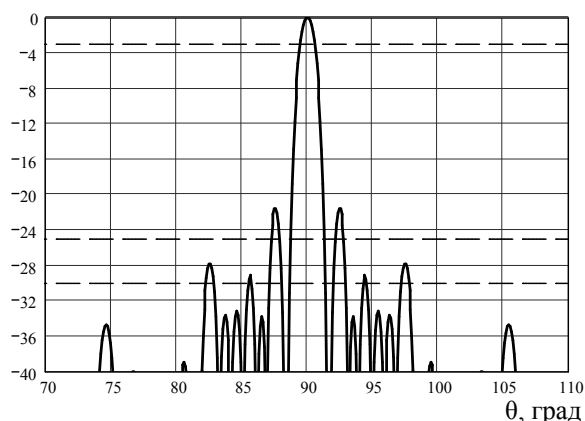


Рис.3. Расчётная диаграмма направленности АР

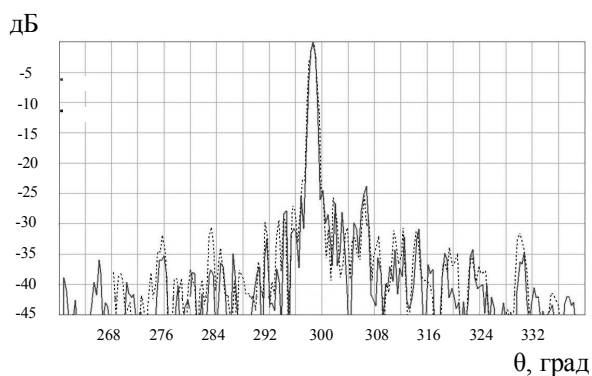
При анализе факторов, влияющих на ДН АР, было выявлено, что для соблюдения поставленных требований к антенной системе необходимо обеспечить постоянство фазы по апертуре АР с осцилляциями не более  $8^{\circ}$ - $10^{\circ}$ , амплитудное распределение не должно выходить за рамки указанного закона более чем на 0.5-0.8 дБ. Внутри секции желателен спад амплитуды на 2 дБ. Особенно важно не допускать значительных перепадов амплитуды между границами соседних секций (более 1.5 дБ), т.к. это ведёт к появлению вторичных максимумов.



Рис.4. Внешний вид антенной решётки, размещаемой внутри защитного диэлектрического корпуса

Настройка АР производилась с помощью векторного измерителя комплексных коэффициентов передачи Wiltron 37369A, способного работать в

полосе частот от 40 МГц до 40 ГГц; при этом выравнивалось фазовое распределение поля по апертуре АР путём корректировки электрической длины питающих линий в виде отрезков 50-омного коаксиального кабеля. Т.о. для изменения фазы один конец коаксиала в месте припаивания к полоскам сумматора либо отодвигался назад, либо приближался. При рабочей частоте 9.43 ГГц набег фазы на 1 мм провода составляет  $11.5^{\circ}$ , поэтому для выравнивания фазы был сооружён специальный измерительный стенд, который минимизировал ошибку неточного позиционирования согласованного приёмного рупора относительно раскрытия измеряемой АР.



— Без защитного корпуса  
 ..... С защитным корпусом

Рис.5. Измеренная диаграмма направленности АР в горизонтальной плоскости

Как изначально предполагалось, боковые лепестки ДН в горизонтальной плоскости оказались несколько выше расчётных, что объясняется технологической погрешностью выравнивая фазы поля по раскрытию АР и точностью измерений самого прибора, а также частичной нестыковкой амплитуды поля на краях секций.

Частотная зависимость ДН АР в диапазоне 9.28–9.58 ГГц практически отсутствует, в свою очередь коэффициент усиления в указанной полосе частот не изменяется на величину более 1.5 дБ и в среднем равен 25 дБ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вершков М. В., Миротворский О. Б. Судовые антенны. 3-е изд., Л., Судостроение, 1990. – 304с.
2. Бахарев С. И., Вольман В. И., Либ Ю. Н. И др. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. М: Радио и связь, 1982. – 328с.

## ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ AGILENT TECHNOLOGIES PNA E8363B

*Кочеткова Т.Д., Соболев В.А.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36  
tdk\_tomsk@mail2000.ru

Исследование диэлектрической проницаемости почв ведётся более ста лет, и эта задача не теряет своей актуальности. Постоянно возникающие новые практические потребности требуют новых знаний об окружающей среде, в частности, почве. Расширяется диапазон частот измерений, совершенствуются методы и приборы, создаются модели для теоретических расчётов. На величину диэлектрической проницаемости влияет множество факторов: влажность, температура, минералогический и органический состав, структура и др. Кроме того существуют региональные особенности морфологии почв. Всё это многообразие форм, свойственное природе и ещё, к счастью, сохраняющееся в ней, не позволяет (пока или вообще) создать универсальную теоретическую модель для решения обратной задачи: по диэлектрической проницаемости почвы определять её влажность, структуру, тип. Представляет интерес и получение экспериментальных данных об электромагнитных характеристиках почв отдельных регионов для оценки состояния окружающей среды.

В Центре радиофизических измерений, диагностики и исследования параметров природных и искусственных материалов Томского госуниверситета начаты работы по изучению спектров комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$  почв Томской области.

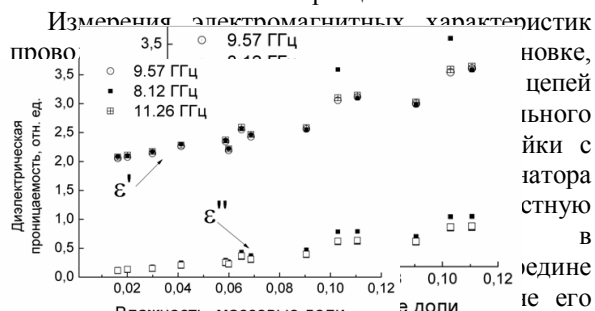
На данном этапе исследовались образцы почв трёх видов:

- подзолистая почва, сосновый бор, п. Киреевск;
- чернозём, сельхозугодья, п. Богашево;
- очищенный кварцевый песок.

Исследовалась зависимость спектров действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости от влажности и типа почвы. Учитывались плотность образцов и температура.

Экспериментальные образцы готовились следующим образом. Некоторое количество почвы естественной влажности при комнатной температуре 25 °С взвешивалось на весах Shimadzu AUX – 320 (погрешность  $\pm 0,5$  мг). После этого в почву добавлялась дистиллированная вода в требуемых массовых пропорциях. Влажная почва тщательно перемешивалась до однородного состояния. После контрольного взвешивания, чтобы учесть испарение влаги в процессе перемешивания, почва помещалась в тонкие кварцевые трубки, которые плотно закрывались с обоих концов резиновыми пробками. Плотность заполнения в трубках контролировалась

взвешиванием готового образца.



длина сделано круглое отверстие для образцов. Такой способ позволяет получить колебания в резонаторе с пучностью электрического поля в середине длины на шести частотах от 8 до 12 ГГц. Из теории малых возмущений известно, что образец должен иметь малый объём по сравнению с объёмом резонатора. С другой стороны, для такого объёма исследования, как почвы, требуется большой объём образца, чтобы поместить все включения и, по возможности, сохранить структуру. Использовались трубки двух диаметров: 2,7 мм и 3,6 мм. При такой разности в количестве вещества точность измерений сухой почвы не изменилась. Для трубок диаметром 3,6 мм существует предел влажности образцов – до массовой доли влаги порядка 0,25. Далее резонансная линия колебаний накладывается на соседнюю линию другой моды и измерения становятся неоднозначными. Для образцов в более тонких трубках можно измерить  $\epsilon^*$  почвы с большей влажностью. Результаты измерений в разных трубках при одинаковой влажности практически совпадают.

Рис. 1. Зависимость диэлектрической проницаемости почвы (чернозём, сельхозугодья, п. Богашево) от весовой влажности. Температура 25°C.

На рис. 1 приведены спектры диэлектрической



проницаемости почвы, взятой на сельскохозяйственных угодьях около п. Богашёво Томского района Томской области при различной степени увлажнённости. В данном эксперименте мы ограничились малым содержанием влаги с целью определения чувствительности метода. Массовая доля влаги  $W$  равномерно менялась от 0.016 до 0.11.

Видно, что диэлектрическая проницаемость почвы не имеет выраженной частотной дисперсии в данном диапазоне частот. Величина  $\epsilon'$  изменяется 40% при изменении влажности на 9%, а  $\epsilon''$  – более, чем в 2 раза.

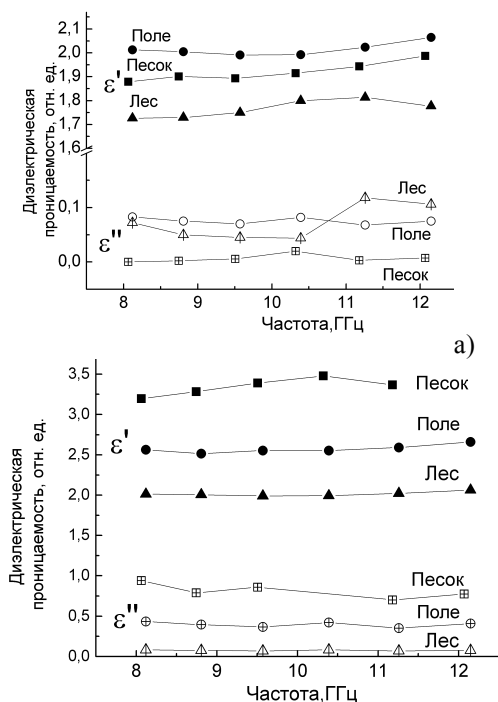


Рис. 2. Спектры диэлектрической проницаемости почв Томского района: а) массовая доля влаги  $W = 0$ , б)  $W = 0,0614$ . Лес – подзолистая почва, сосновый бор, п. Киреевск; Поле – чернозём, сельхозугодья, п. Богашево; Песок – очищенный кварцевый песок. Температура 25°C.

На рисунке 2 представлены спектры диэлектрической проницаемости разных видов почв при двух значениях влажности. Различие  $\epsilon'$  составляет порядка 5–8%, а  $\epsilon''$  – 75%. Также интересным представляется факт, что при увлажнении значение диэлектрической проницаемости песка оказалось больше, чем у полевой почвы. Это согласуется с учением о почвенной влаге, по которому связанная вода в почве имеет меньшую диэлектрическую проницаемость, чем свободная вода. А в песке степень связанности влаги ниже, чем в полевой почве.

На рис. 3 показаны спектры действительной части диэлектрической проницаемости, как наиболее ярко выраженные, для разных фракций кварцевого песка при разной степени

увлажнённости. Фракции песка отличаются размером зёрен (указаны на графике) и получены просеиванием через набор сит. Во-первых, здесь также видно, что зависимость от влажности уверенно определяется данным методом. Во-вторых, прослеживается неодинаковость увлажнения песка с разным размером частиц.

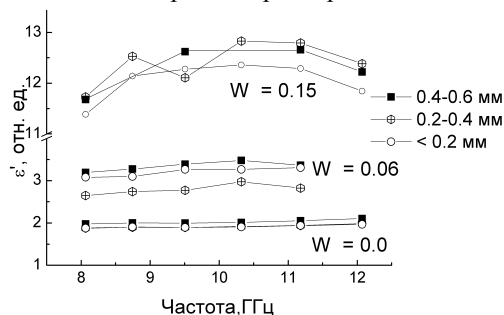


Рис. 3. Спектры действительной части диэлектрической проницаемости кварцевого песка при различной степени увлажнения.

$W$  – массовая доля влаги. Температура 25°C. "

Проводилось исследование влияния некоторых неизбежных факторов на величину диэлектрической проницаемости. Например, положение образца в резонаторе может быть не строго по центру в связи с тем, что диаметр отверстия немного больше диаметра трубки. Установлено, что вариации положения образца в пределах 1,0 – 1,5 мм приводят к разбросу значений  $\epsilon'$  на 0,5%, а  $\epsilon''$  – на 1,5%.

Также исследовалось влияние неравномерной плотности образца. Трубка с почвой перемещалась по своей длине в отверстии. Вариации плотности по длине трубки приводят к разбросу значений  $\epsilon'$  на 1%, а  $\epsilon''$  – на 1,5%.

Как уже говорилось, при изготовлении образцов контролировалась их плотность. Одинаковых значений плотности образцов достигнуть не удалось. Разброс плотности не превышал 15%. При этом разброс значений  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  составлял 5 – 25%.

Полученные результаты показывают, что в измеренных пределах наблюдается линейная зависимость обеих составляющих диэлектрической проницаемости от влажности. Показано достаточно заметное различие  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  для разных видов почв.

Анализ причин погрешностей измерения показал, что вариации положения образца и неравномерность плотности по его длине не превышают погрешность метода. Для корректного сравнения данных измерений требуется тщательный контроль плотности образцов. Чувствительность измерительного устройства достаточна для осуществления контроля влажности и проведения исследований электрофизических свойств почв для различных фундаментальных и прикладных целей.

## НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

*Кулешов Г.Е., Доценко О.А., Сусляев В.И., Кочеткова О.А.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36.

E-mail: [grigorij-kge@sibmail.com](mailto:grigorij-kge@sibmail.com)

В последние десятилетия развитие электронной техники привело к появлению очень большого количества бытовой, промышленной и научной аппаратуры, работающей в высокочастотной области электромагнитного излучения (ЭМИ). В качестве примеров таких устройств можно привести микроволновые печи, мобильные телефоны, ближнюю беспроводную радиосвязь для устройств разных типов (Bluetooth-технология), беспроводную локальную сеть связи (LAN-технология) и т.п. Преимущества от их использования очевидны. Однако имеется и обратная сторона у данной тенденции – эти приборы являются источниками электромагнитных полей (ЭМП), оказывающих воздействие на организм человека. При этом опасность для здоровья, которую они несут при постоянном использовании, очевидна. И она растет пропорционально количеству источников излучения, окружающих человека, их мощности и времени экспозиции.

Это подтверждается экспериментальными исследованиями биологических последствий длительного воздействия высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) ЭМП [1], проводимыми Всемирной организацией здравоохранения. Получены данные, доказывающие связь между долговременным использованием сотовых телефонов и повышением риска возникновения опухолей. Комиссия Международного агентства по исследованию рака (IARC) в 2002 г. сделала вывод, что воздействие ЭМП связано с возможной канцерогенностью [2]. Существует корреляция между глиомой и использованием аналоговых и сотовых телефонов [3], выявлено значительное повышение риска развития невриномы слухового нерва и глиомы, отмеченное у пользователей мобильных телефонов со стажем 10 лет и более [4, 5]. Отмечено также, что регистрируется все больше свидетельств непосредственной связи ВЧ ЭМП и возникновения лейкемии, в том числе у детей, подвергавшихся воздействию ЭМП. Так как механизм воздействия излучения на детский организм еще не определен [6], в большинстве отчетов рекомендуется ограничить использование мобильных телефонов детьми [2, 7]. Заключение исследователей напрямую противоречит многолетним заявлениям производителей высокочастотной электроники о том, что использование их продукции абсолютно безопасно.

Поскольку отказаться от использования электронных устройств человечество уже не в состоянии, актуальной задачей является разработка средств защиты от воздействия ВЧ ЭМИ, осно-

ванных на достижениях современной науки и техники, которые можно использовать в мобильных устройствах и другой электронной технике. Все это привело к поиску новых материалов, обладающих необходимыми для современной радиоэлектроники свойствами: большими значениями магнитной и диэлектрической проницаемости, малыми тангенсами диэлектрических и магнитных потерь, высокой проводимостью, превосходными тепловыми и механическими характеристиками, или сочетанием различных свойств.

Исследования в данном направлении ведутся достаточно активно во всем мире. Множество работ посвящено использованию в качестве защитных покрытий тонких пленок разнообразных веществ. В ряде работ для снижения электромагнитных помех предлагается добавлять наноразмерные частицы в конструкционные материалы.

Наиболее оправданным является применение защитных устройств на основе отражающих и поглощающих материалов, активно взаимодействующих с ЭМИ. Отражатели изготавливаются из металлов, хорошо проводящих электрический ток, или композитов, в которых используются проводящие структуры. В качестве активной фазы поглочителей СВЧ диапазона хорошо зарекомендовали себя оксидные ферритмагнетики, сажа, карбонильное железо.

В этом аспекте особое внимание уделяется ферритам с гексагональной кристаллической структурой (гексаферритам), так как у них область естественного ферромагнитного резонанса находится в диапазоне СВЧ, что сказывается на проявлении у них магнитных свойств в данной области. Также важно отметить, что ВЧ свойства данного класса материалов зависят от способа получения, химического состава [8], формы и размера частиц [9], типа композиционной смеси, что упрощает получение материала с заданными свойствами. Для точного расчета характеристик композиционной смеси необходимо знать электромагнитные свойства составных частей.

В данной работе исследовались электромагнитные свойства нанопорошков гексаферритов системы  $\text{Co}_x\text{Zn}_{2-x}\text{W}$  ( $x=0,6; 0,7$ ), которые в дальнейшем предполагается использовать в качестве наполнителей композитов для изготовления защитных покрытий. Образец представляет собой композиционную смесь: воздух – порошок, которая помещена в кварцевую трубку с внутренним диаметром 1 мм и длиной 70 мм.

Измерения электромагнитных характеристик проводились при температуре окружающего воз-

духа 25 °С резонаторным методом на установке, состоящей из векторного анализатора цепей Agilent Technologies E8363В и набора объемных прямоугольных резонаторов в качестве измерительных ячеек.

На рисунках 1 и 2 приведены данные о частотных зависимостях диэлектрической  $\epsilon^*$  и магнитной  $\mu^*$  проницаемостей исследуемой смеси. Так как ЭМ характеристики воздуха не зависят от частоты ( $\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon'' = 1,0 + j0,0$ ;  $\mu^* = \mu' + j\mu'' = 1,0 + j0,0$ ), то полученные графики характеризуют свойства активной фазы.

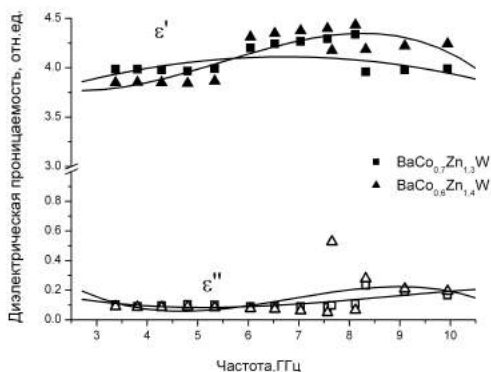


Рис. 1. Спектры диэлектрической проницаемости нанопорошков ферритов W – типа.

Из рисунка 1 следует, что в рассматриваемом диапазоне  $\epsilon' = 4 \pm 0,5$  отн.ед., а  $\epsilon'' = 0,2 \pm 0,1$  отн.ед. и ярко выраженной частотной зависимости нет.

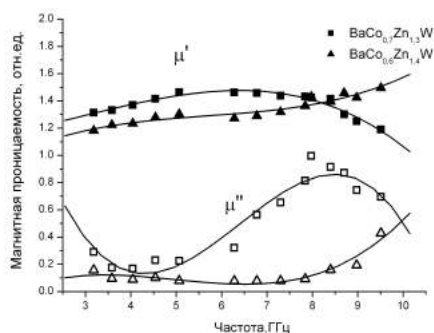


Рис. 2. Спектры магнитной проницаемости нанопорошков ферритов W – типа.

Из рисунка 2 следует, что область дисперсии  $\mu^*$  порошка  $\text{Co}_{0,7}\text{Zn}_{1,3}\text{W}$  находится в диапазоне 7,5 – 9,5 ГГц, а у порошка  $\text{Co}_{0,6}\text{Zn}_{1,4}\text{W}$  – на более высоких частотах. Рост  $\mu''$  от 0,2 до 0,8 отн.ед. у порошка  $\text{Co}_{0,7}\text{Zn}_{1,3}\text{W}$  указывает на то, что его можно использовать в качестве материала, поглощающего магнитную составляющую ЭМИ.

Полученные зависимости можно использовать как характеристики активной фазы при расчете

защитных покрытий, связующими в которых будут: эпоксидная смола, вододисперсионная краска, силикон и т.п. Применение того или иного связующего зависит от потребительского назначения готового композита.

Работа выполнялась при частичной поддержке проектами: ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 год», ГК № П2476, № 14.740.11.0335 и ГК № 8691p/13125.

### Литература

1. Independent Expert Group on Mobile Phones. Mobile phones and health. United Kingdom, Expert Group on Mobile Phones. URL: <http://www.iegmp.org.uk/report/text.htm> (дата обращения 10.03.2010).

2. Licari L. Children's health and environment: developing action plans / L. Licari, L. Nemer, G. Tamburlini – Copenhagen: WHO. 2006. 88 p.

3. Auvinen A. Brain tumors and salivary gland cancers among cellular telephone users / A. Auvinen, M. Hietanen, R. Luukkonen, R.S. Koskela // Epidemiology. 2002. V. 13. P. 356 – 359.

4. Hepworth S.J. Mobile phone use and risk of glioma in adults: case-control study / S.J. Hepworth, M. J. Schoemaker, K.R Muir, A.J. Swerdlow, M.J.A. van Tongeren, P.A. McKinney // BMJ. 2006. V. 332. P. 883 – 887.

5. Hardell L. Case-control study on cellular and cordless telephones and the risk for acoustic neuroma or meningioma in patients diagnosed 2000–2003 / L. Hardell, M. Carlberg, M.K. Hansson // Neuroepidemiology. 2005. V. 25. P. 120 – 128.

6. Отчет о 20-м совещании Европейского комитета по окружающей среде и охране здоровья Хельсинки, Финляндия, 12–13 декабря 2005. URL: [http://www.euro.who.int/Document/EENC/20th\\_EENC\\_Mtg\\_report\\_Rus.pdf](http://www.euro.who.int/Document/EENC/20th_EENC_Mtg_report_Rus.pdf) (дата обращения 10.03.2010).

7. Какое влияние оказывают мобильные телефоны на здоровье людей? Сеть фактических данных по вопросам здоровья. URL: <http://www.euro.who.int/en/system.html> (дата обращения 10.03.2010).

8. Сусяев В.И. Влияние ионов  $\text{Fe}^{2+}$  на СВЧ спектры ферритов  $\text{CoZnW}$  / В.И. Сусяев, Е.П. Найден, В.А. Журавлев, Г.И. Рябцев // Электронная техника. Сер. «Материалы». 1990. № 5/250/ДСП. С. 28–29.

9. Доценко О.А. Температурные зависимости СВЧ-спектров магнитной проницаемости наноразмерных порошков гексаферрита W-типа / О.А. Доценко, Е.Ю. Коровин, В.И. Сусяев, Г.Е. Кулешов // Известия вузов. Физика, 2006. – №9. – С. 35-39.

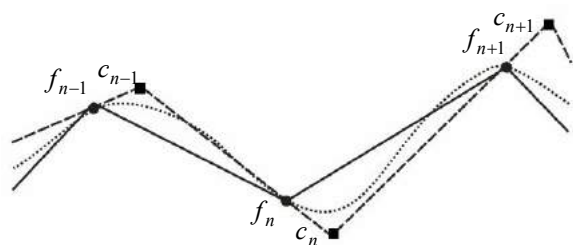
## FPGA ИНТЕРПОЛЯТОР ДВУМЕРНЫХ СИГНАЛОВ

*Пономарев О.Г., Мальшиев В.Н.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36  
E-mail: time\_traveller@mail.ru

Аннотация: Рассмотрена модификация линейной интерполяции, где увеличение качества интерполяционного алгоритма осуществляется с помощью предварительной фильтрации сдвигающим фильтром. Предложена упрощенная конструкция фильтра предварительной фильтрации. Создана аппаратная модель интерполятора на языке VHDL. Приведены результаты имплементации в различные семейства FPGA фирмы Xilinx.

В качестве алгоритма для основы интерполятора была взята «линейная интерполяция», осуществляющая интерполяцию не через исходные узловые точки  $f_n$ , а через вновь рассчитанные  $c_n$  сдвинутые относительно исходных.



- ..... Аналоговый сигнал
- Стандарт
- Модификация

Рис.1. Линейная интерполяция

$$c_n = -\frac{\tau}{1-\tau} c_{n-1} + \frac{1}{1-\tau} f_n, \quad (1)$$

где  $c_n$  - сдвинутые узловые точки,  $f_n$  - исходные узловые точки,  $\tau$  - величина сдвига. Оптимальное значение величины  $\tau$ , обеспечивающее наилучшее качество интерполяции по критерию минимума среднеквадратической ошибки, как показано в [1] составляет  $\tau_{opt} = 0.21$ .

Теоретические расчеты показывают, что при устремлении шага интерполяции к нулю модифицированный алгоритм дает выигрыш по метрике PSNR около 6-8 дБ относительно стандартной линейной интерполяции (рис.2).

Сдвиг легко реализуем с помощью рекурсивного фильтра, с выхода которого поступают значения  $c_n$ . Для оптимизации фильтра берется близкое к оптимальному значение сдвига  $\tau = 0.2$ , При этом пропадает необходимость в «дорогой» в вычислительном отношении операции умножения:

$$c_n = -2^{-2} c_{n-1} + 2^{-1} f_n + f_n, \quad (2)$$

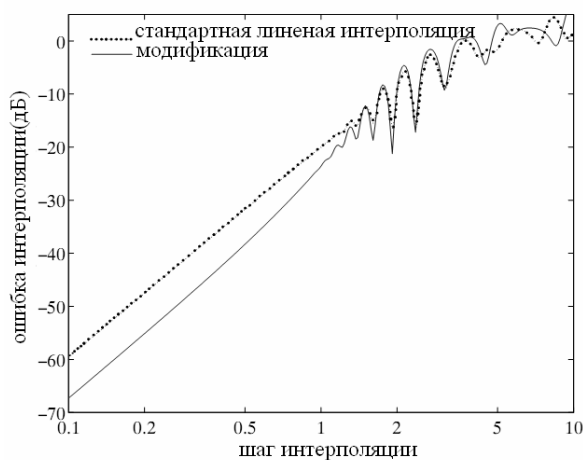


Рис.2. Ошибка интерполяции

Далее к последовательности  $\{c_n\}$  применяется стандартная линейная интерполяция. Введение сдвигающего фильтра корректирует амплитудно-частотную характеристику линейного интерполятора приближая ее к идеальной при интерполяции прямоугольной АЧХ sinc-фильтра (рис.3).

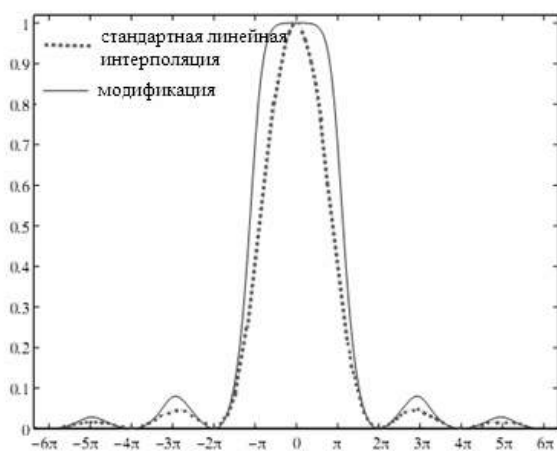


Рис.3. АЧХ интерполяционного фильтра

Предложенный метод интерполяции был обобщен на двумерные сигналы (изображения). Аппаратная реализация двумерного интерполятора проводилась в среде Xilinx ISE Design Suite 12.3. Для описания цифрового устройства использовался язык описания цифровой аппаратуры VHDL. Блок-схема интерполятора приведена на рис.5.

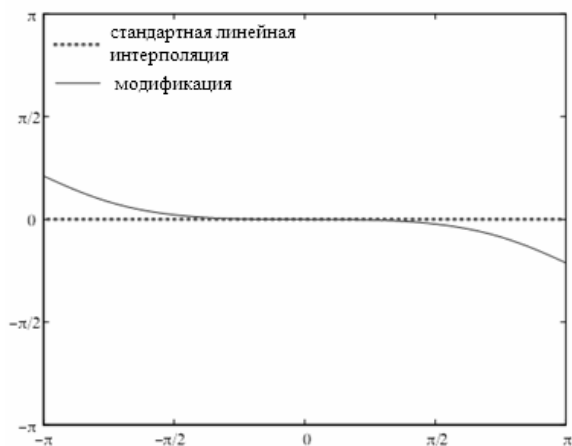


Рис.4. ФЧХ интерполяционного фильтра

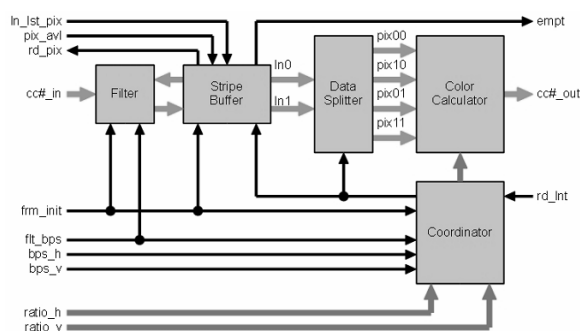


Рис.5. Блок схема интерполятора

Модель состоит из 5 основных блоков:

- сдвигающий фильтр(Filter);
- буфер полосы(Stripe Buffer);
- вычислитель значения синтезируемого «пикселя» (Color Calculator);
- генератор координат синтезируемого «пикселя» (Coordinator).

Матрица значений двумерного сигнала подается построчно, сверху вниз, слева направо на вход блока Filter, который осуществляет двумерный сдвиг. При наличии сигнала доступности данных на входе системы начинает заполняться буфер полосы.

Для вычисления значения синтезируемого «пикселя» используются четыре опорных «пикселя», хранящихся в буфере: два – из текущей строки, два – из следующей. Выборку опорных значений, а также определение координаты синтезируемого пикселя относительно четырех опорных осуществляет Coordinator. Разделение строк на пиксели происходит в Data Splitter. Дабы устройство не простаивало, данные строки можно с соответствующей скоростью подгружать в буфер в процессе интерполяции. Непосредственное вычисление значения синтезируемого пикселя происходит в блоке Color Calculator, в соответствии с его координатами относительно четырех опорных.

Результаты имплементации данной модели в различные FPGA от фирмы Xilinx сведены в таб.1.

Семейство	Spartan3	Virtex4	Virtex5
Кристалл	XC3S2000-4FG676	XC4VLX25-10FF668	XC5VLX30-1FF676
Тактовая частота, МГц	92	142	160
Flip Flops	350	184	184
LUTs	708	540	535
RAMB16, RAMB36	8	8	4
MULT18x18, DSP48, DSP48E	10	10	10
Occupied Slices, LUT, Flip Flop pairs	381	294	628

Таб.1. Результаты имплементации

Можно выделить следующие основные особенности разработанного интерполятора.

- Качество по метрике PSNR при интерполяции более чем в 2 раза на 6-8 дБ лучше билинейной интерполяции и на 0,5-1 дБ – бикубической.
- Возможность обрабатывать до 60 изображений размера 1920x1080 в секунду.
- Предельное выходное разрешение по горизонтали и вертикали не ограничено;
- Предельное входное разрешение по горизонтали определяется объёмом внутреннего буфера и задаётся через параметры синтеза;
- Предельное входное разрешение по вертикали не ограничено;
- Произвольные, динамически изменяемые, независимые коэффициенты масштабирования по горизонтали и вертикали.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blu T., Thevenaz T., Unser M. How a simple shift can significantly improve performance of linear interpolation, IEEE ICIP, no. 3, pp.377-380, 2002.
2. Maxfield C., The design warrior's guide to FPGAs. Mentor Graphics Corporation and Xilinx, Inc., 2004. –542p.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАДИОДИАПАЗОНА

Якубов В.П., Мироньчев А.С.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36.  
E-mail: yvlp@mail.tsu.ru

Термин «метаматериал» предложил в 2000 году руководитель Центра электромагнитных материалов и устройств в Остине (штат Техас, США) Роджер Уолсер [1]. В том же году появилось сообщение о реальном создании экзотической композитной среды с отрицательными значениями как диэлектрической, так и магнитной проницаемости (исследовательская группа Давида Смита из университета Дьюка в Дареме, штат Северная Каролина США) [2-3]. Необычные свойства такой воображаемой среды - метаматериала ранее были описаны в статье советского физика Виктора Веселаго, опубликованной в журнале «Успехи физических наук» ещё в 1967 году [4], т.е. почти за три десятилетия до появления самого понятия метаматериалов. Факт экспериментального подтверждения возможности существования таких сред стимулировал огромный интерес к исследованию новых подходов по конструированию искусственных электромагнитных материалов и по реализации волновых проявлений в них.

В настоящей работе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования возможности создания метаматериала для радиодиапазона как искусственной композиционной среды, составленной из определенным образом ориентированных прямолинейных и кольцевых проводников (рис. 1). Диэлектрическая и магнитная проницаемости такой среды получаются как макропараметры объединяющие поляризуемость и намагничиваемость отдельных проводников.

В основе электродинамической модели метаматериалов лежит уравнение Поклингтона для тока  $I$ , наводимого на проводнике падающей электромагнитной волной с напряженностью поля  $E_0$ . В случае прямолинейного идеально проводящего проводника это уравнение имеет вид:

$$\frac{1}{-i\omega\epsilon_0 - d} \int I(z')g(z-z')dz' = -E_0.$$

Ядро этого интегрального уравнения определенным образом зависит от конфигурации проводника. Дипольный момент проводника тока

$$(p = \int_{-d}^d I(z)dz / -i\omega = \epsilon_0 E_0 v_0 \gamma)$$

определяет удельную поляризуемость проводника  $\gamma$  и эффективную диэлектрическую проницаемость композита из них  $\epsilon = 1 + Nv_0\gamma$ . Здесь  $v_0 = 2d\pi r_0^2$  - объём отдельного проводника,  $N$  - их концентрация.

На рис. 2 показана зависимость величины  $\gamma$  от длины проводника. Видно, что с увеличением длины проводника возможно появление отрицательной вещественной части  $\gamma$ , а значит и  $\epsilon$ . Аналогичные результаты имеют место для удельной намагничиваемости кольцевых проводников и эффективной магнитной проницаемости  $\mu$ . Показатель преломления композитной среды  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$  при этом может иметь отрицательное значение, что и является признаком свойств метаматериала.

Для экспериментальной проверки возможности создания метаматериала для радиодиапазона была собрана экспериментальная установка (рис. 3), в которой для зондирования было использовано импульсное сверхширокополосное (СШП) излучение, а в качестве образцов метаматериала использовались тонкие слои вспененного полистирола, в которые были помещены кольцевые и прямолинейные проводники. Длительность зондирующего импульса имела порядок 150 пс. Регистрация отраженных импульсов производилась с помощью стробоскопического осциллографа TMR8140. Для калибровки измерений использовался металлический эк-

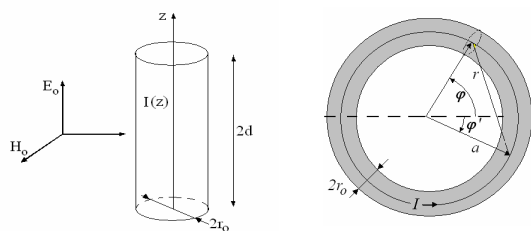


Рис. 1. Падение плоской волны на прямолинейный и кольцевой проводники

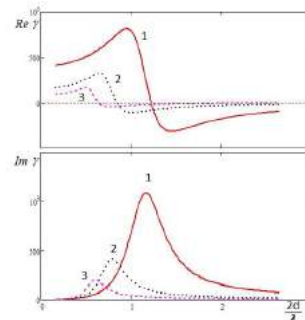


Рис. 2. Коэффициент удельной поляризуемости прямолинейного проводника при изменении его сечения (1-3)



ран, помещаемый перед исследуемой средой (см. рис. 4). Обработка результатов производилась в спектральной области с использованием Фурье преобразования. Комплексный коэффициент отражения  $R$  оценивался на каждой частоте как отношение спектров сигналов отраженных от исследуемого материала и от металла. Комплексный коэффициент прохождения находился как  $T = 1 + R$ . Для обнаружения свойств метаматериала оценивалась фаза коэффициента прохождения (рис. 5 - 6).

Видно, что композит из линейных проводников практически не меняет фазу прошедшего излучения, в то время как добавление кольцевых проводников заметно меняет картину – фаза убывает с ростом частоты. Поскольку фаза прошедшего излучения определяется как

$$\Phi = 2\pi \operatorname{Re}(n) L f / c ,$$

то это говорит об отрицательном знаке у вещественной части показателя преломления композитной среды с добавлением кольцевых проводников. Полученное свойство метаматериала (отрицательный набег фазы) может быть использовано для фокусировки излучения в радиотомографии, например, на границе метаматериала как плоской сверх-линзы. Работа выполнена при поддержке АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» мероприятие 2, проект № 2.1.2/3339, а также Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы в рамках мероприятий 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6).

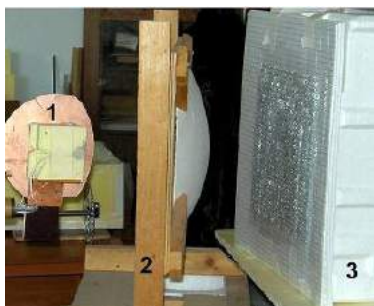


Рис. 3. Экспериментальная установка: 1 – СШП антенна, 2 – линза, 3 – метаматериал

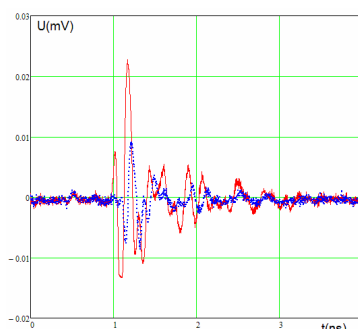


Рис. 4. СШП сигнал, отраженный от металлического экрана и от метаматериала (пунктир)

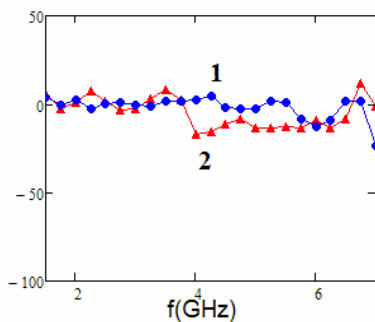


Рис. 5. Изменение фазы от композита линейных малых линейных проводников (1), линейных больших проводников (2)

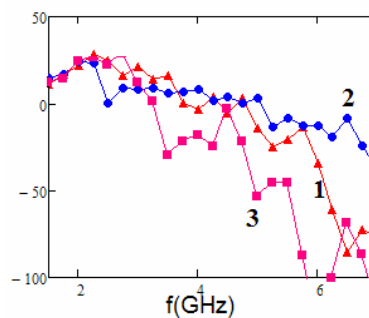


Рис. 6. Изменение фазы от композита колец (1), от композита колец и малых линейных проводников (2), от композита колец и больших проводников (3)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walser Rodger. Metamaterials What are they and what are they good for? // Meeting of the American Physical Society, March 20–24, 2000.
2. Walser R.W., Bene R.W. First phase nucleation in Silicon transilicon metal planar interfaces // Appl. Phys. Lett. 1976. Vol. 28, № 10. P. 624-625.

3. John B. Pendry and David R. Smith. Reversing Light with Negative Refraction // Physics Today. Vol. 57. No. 6. P. 37–43. June 2004.

4. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // Успехи физических наук, 1967, т.92, №7, с. 517–526.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ АНТЕНН В ЛОКАЦИОННОЙ ТОМОГРАФИИ

*Разинкевич А.К., Шипилов С.Э., Якубов В.П.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36.  
E-mail: [shipilov@webmail.tsu.ru](mailto:shipilov@webmail.tsu.ru)

В настоящее время в мире ведется активное исследование способов восстановления изображения различных предметов с помощью сверхширокополосной (СШП) радиолокации. Для решения поставленных задач восстановления изображения объектов требуется высокое пространственное продольное и поперечное разрешение, а также при необходимости сканирования объектов, находящихся за препятствием, достаточное проникновение сигнала. В связи с этими требованиями в качестве зондирующего сигнала выбран СШП импульсный сигнал. Широкая полоса частот позволяет получить высокое продольное разрешение объектов.

В настоящее время в радиолокационных системах широкое применение получил радар с синтезированной апертурой. Это может быть один приемо-передатчик, меняющий положение в пространстве с определенным шагом и по заданной траектории. Синтез апертуры осуществляется после накопления информации, полученной со всех положений приемо-передатчика. Эта схема позволяет заменить решетку из множества приемо-передатчиков на один движущийся. Радар с синтезированной апертурой отличается простотой исполнения, но сканирование занимает длительное время.

В работе использовалась комбинация радара с синтезированной апертурой, представляющего собой сверхширокополосный приемо-передатчик, меняющий положение в пространстве с определенным шагом и параболического зеркала. Синтезированная квадратная решетка приемо-передатчиков помещалась вблизи фокуса параболического зеркала. Комбинированная антенна, построенная таким образом, дает возможность концентрировать излучение в заданную область пространства при вынесении антенной решетки из фокуса параболического зеркала.

Ране были получены результаты с использованием метода, основанного на фокусировке отраженных СШП сигналов (метод пространственно-временной импульсной фокусировки) [1]. Но основным требованием для использования этого метода является помещение исследуемого объекта в волновой (ближней) зоне антенной решетки, граница которой находится на расстоянии порядка размера апертуры (рисунок 1).

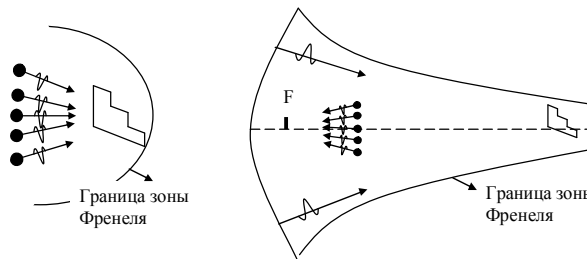


Рисунок 1 Граница зоны Френеля для антенной решетки

Рисунок 2 Граница зоны Френеля для комбинированной антенны

Предложенная нами комбинированная антенна подходит для решения задачи восстановления изображения удаленных объектов, так как позволяет отдалить границу зоны Френеля (рисунок 2).

Для схемы, содержащей зеркало, применение метода пространственно-временной импульсной фокусировки затруднено, так как источники вынесены из фокуса зеркала, а это означает, что в любой точке пространства форма импульса разная. На рисунке 3 слева серым изображен фронт волны, амплитуда определяется в зависимости от интенсивности серого цвета, справа вынесены срезы фронта в разных его сечениях.

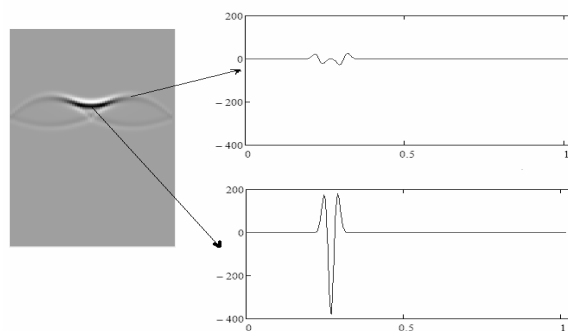


Рисунок 3 – Фронт волны, отраженной параболическим зеркалом

Поэтому для решения обратной задачи восстановления изображения объекта по рассеянному полю использовался метод аппаратных функций. Данный метод учитывает некоторую априорную информацию, в качестве которой служит отклик зондирующей системы на точечную неоднородность.

Во избежание затенения отраженного зеркалом сигнала решеткой приемо-передатчиков, в работе использовалось несимметричное параболическое зеркало (офсетная параболическая антенна).

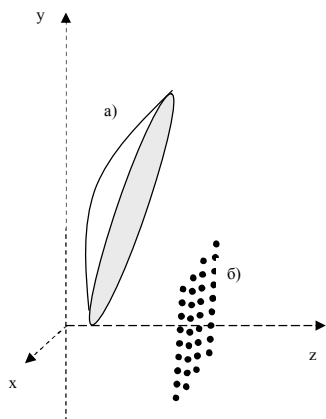


Рисунок 4 Элементы комбинированной антенны а) офсетное параболическое зеркало, б) решетка приемо-передатчиков

Еще одним преимуществом использования комбинированной антенны является возможность сканирования пространства лучом сигнала при переходе от одной позиции передатчика в решетке к следующей при неподвижной общей конструкции. На рисунке 5 изображен принцип такого сканирования в двумерном случае с линейной решеткой излучателей. Квадратная решетка позволяет сканировать в большом телесном угле (по двум координатам).

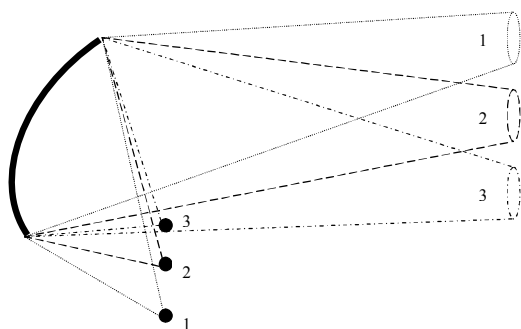


Рисунок 5 Позиционное сканирование комбинированной антенной

Обратная задача восстановления изображения удаленного объекта численно решалась при следующих условиях: синтезированная апертура выбиралась в виде квадрата со сторонами 70 см с шагом 1 см; офсетное параболическое зеркало радиуса 0,4 м, с фокусным расстоянием 0,6 м; решетка приемо-передатчиков выносилась из фокуса зеркала на 5 см. В качестве исследуемого образца выбирались четыре точечных объекта, помещенные на расстояние 2 м от комбинированной антенны.

На рисунке 6 представлены результаты численного эксперимента восстановления изображения четырех точечных объектов, удаленных от комбинированной антенны на расстояние 2 метров и отстоящих друг от друга на 10 см.

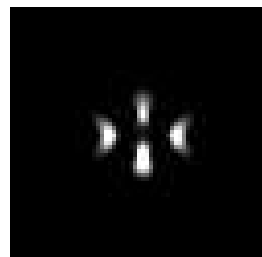


Рисунок 6 Результаты численного моделирования эксперимента.

На рисунке 7б представлен результат натурного эксперимента, задачей которого являлось построение радиоволнового изображения объекта в форме ступенчатого треугольника (рисунок 7а). Объект находился на расстоянии двух метров от лабораторного образца комбинированной антенны. На радиоизображении можно угадать очертания исходного объекта. Дальнейшие исследования будут вестись в направлении улучшения качества изображения.

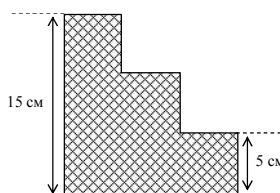


Рисунок 7а Экспериментальный объект - зубчатый треугольник

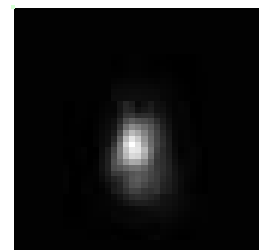


Рисунок 7б Радиоволновое изображение зубчатого треугольника

По итогам численного моделирования и эксперимента можно сказать, что предложенная схема комбинированной антенны может быть использована для задач радиолокационной томографии удаленных объектов.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы в рамках мероприятия 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6), а также при поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» мероприятие 2, проект № 2.1.2/3339, и при поддержке ФЦП мероприятие 1.1 «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров», ГК № 14.740.11.0076 от 06.09.2010 (2010-2012).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В., Суханов Д.Я., Булавинов А.Н., Бевецкий А.Д. Радиоволновая томография скрытых объектов для систем безопасности // Известия высших учебных заведений. Физика. 2008, № 10. - С. 63-79

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СШП ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОИСКА ЖИВЫХ ЛЮДЕЙ СКРЫТЫХ ЗА ПРЕПЯТСТВИЯМИ

*Сатаров Р.Н., Шупилов С.Э., Якубов В.П.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36.

E-mail: [sat.rail@sibmail.ru](mailto:sat.rail@sibmail.ru)

Аннотация: В работе рассматривается подход для поиска живых людей за диэлектрическими преградами. В основе подхода лежит метод математической фокусировки отраженных сверхширокополосных сигналов. Зондирующая система представляет собой радар с синтезированием апертуры. Показана возможность нахождения параметров диэлектрических преград при многопозиционном одностороннем зондировании. В подтверждение работоспособности метода представлены результаты эксперимента.

Основная идея обработки данных восходит к технологии синтезирования апертуры с фокусировкой [1-2], при которой все зарегистрированные в различных точках решетки СШП сигналы суммируются в фазе для каждой задаваемой точки фокусировки с коррекцией существующего запаздывания. При этом следует учитывать и временную задержку, вносимую препятствием. Для ее расчета необходимо знать параметры преграды, а именно: толщину и диэлектрическую проницаемость. Авторами работы была разработана методика нахождения этих параметров при многопозиционном сканировании с односторонним доступом (рис.1).

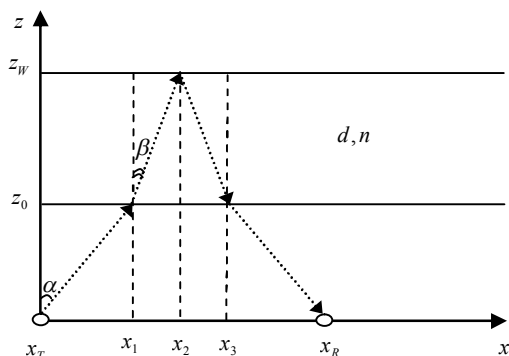


Рис.1 -Схема проведения численного эксперимента для определения параметров преграды

Рассмотрим систему уравнений [3]:

$$\begin{cases} \tau_1 = 2 \left( \frac{z_0}{c \cos(\alpha)} + \frac{dn}{c \cos(\beta)} \right) \\ \tau_2 = 2 \left( \frac{z_0 + dn}{c} \right), \end{cases}$$

где  $\tau$  - время регистрации, отраженного от задней стенки преграды, сигнала. Первое уравнение записано для случая разнесенных приемника и передатчика, второе - для совмещенных.

Для решения данной системы уравнений необходимо найти угол падения. Для этого требуется решить уравнение четвертой степени:

$$\begin{aligned} & (x_2^2 - 2x_2z_0tg(\alpha) + z_0^2tg^2(\alpha)) \times \\ & \times (n^2 + (n^2 - 1)tg^2(\alpha)) - d^2tg^2(\alpha) = 0 \end{aligned}$$

В ходе имитационного моделирования в CST Studio решалась прямая задача по зондированию стены СШП сигналами. Используя разработанную методику, искомые параметры были найдены с высокой точностью. В дальнейшем планируется экспериментальное подтверждение полученных результатов.

В большинстве случаев задача зондирования за преградами сводится к обнаружению подвижных объектов. Такие задачи возникают при отыскании людей под завалами или получении информации о местоположении и количестве террористов в соседнем помещении за стеной. В этом случае сигналы, отраженные от неподвижных объектов будут являться помехой и их нужно отфильтровать. Авторами использовался дифференциальный подход, в котором фильтрация сигналов от неподвижных объектов проводилась на основе разностных данных о регистрации сигналов в соседние периоды времени. Проведенная работа по оптимизации расположения приемопередающих элементов, показала, что для решения задачи об обнаружении движения достаточно использования линейной антенной решетки.

Для проверки предложенного подхода проводился натурный эксперимент (рис.2). Зондирование осуществлялось с использованием синтезирования апертуры (рис.2-1). За диэлектрической преградой (рис.2-2) перемещался цилиндр вдоль направления, указанного стрелкой (рис.2-7).

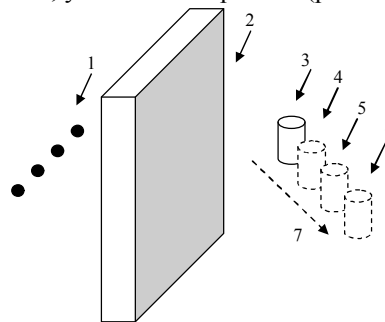


Рис.2 -Схема проведения натурального эксперимента с движущимся тестовым объектом

При положении 4 (рис.2), объект удалился от первоначального на 6 см и одновременно сдвинулся

вправо на 7.5 см. При перемещении в положения 5 и 6 (рис.2), смещение составило 5 см. Рассчитанные результаты эксперимента представлены на рисунке 3. Размер каждой клетки данной томограммы равен 5см.

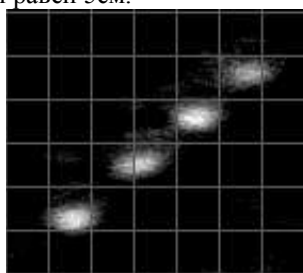


Рис.3 –Визуализация движения объекта

Таким образом, положение движущегося тестового объекта определяется вполне достоверно, а сигналы, отраженные от неподвижных объектов успешно фильтруются.

Авторами проводился эксперимент по определению дыхания человека. Стена, выполненная из газобетонных блоков, толщиной 10 см., находилась на расстоянии 20 см. от приемопередающей системы. За стеной неподвижно сидел человек и дышал, сначала нормально, затем часто. В результате обработки экспериментальных данных были получены следующие результаты:

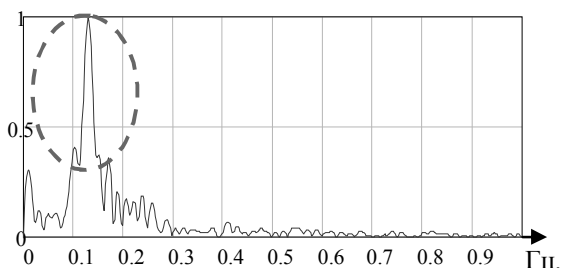


Рисунок 4-Выделение нормального дыхания человека при зондировании через преграду

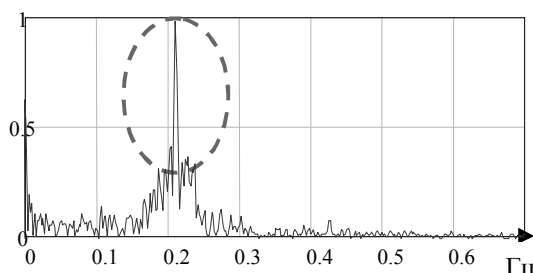


Рисунок 5- Выделение учащенного дыхания человека при зондировании через преграду

Результаты исследований позволяют использовать разработанные алгоритмы в работе по созданию действующей модели томографа, которая займет свою нишу на рынке и составит реальную конкуренцию существующим аналогам. При этом, ожидаемое разрешение системы должно быть сравнимо с зарубежными, а себестоимость будет существенно ниже.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы в рамках мероприятия 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6), а также при поддержке АВИЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» мероприятия 2, проект № 2.1.2/3339, и при поддержке ФЦП мероприятие 1.1 «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров», ГК № 14.740.11.0076 от 06.09.2010 (2010-2012).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н. Сверхширокополосное зондирование за диэлектрическими преградами // Известия высших учебных заведений. Физика.2010,№9.
2. Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В., Суханов Д.Я., Булавинов А.Н., Бевецкий А.Д. Радиоволновая томография скрытых объектов для систем безопасности // Известия высших учебных заведений. Физика. 2008, № 10. - С. 63-79.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.. Изд-во Академии наук СССР, 1957. – 503с.

## ДОПЛЕРОВСКОЕ РАДИОВИДЕНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОДВИЖНОГО ПЕРЕИЗЛУЧАТЕЛЯ

*Рубаненко А.С., Суханов Д.Я.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36.

E-mail: [sdv@mail.tsu.ru](mailto:sdv@mail.tsu.ru)

Системы радиоволнового видения [1] ближнего радиуса действия находят применение в системах контроля качества, системах обеспечения безопасности для бесконтактного досмотра людей, в медицинской диагностике. Наиболее качественные радиоизображения, с разрешением близким к дифракционному пределу, можно получить, применяя технологию радара с синтезированной апертуры (РСА) [2] использующую данные измерения рассеянного объектами среды амплитудно-фазового распределения поля в некоторой поверхности. Измерение амплитудно-фазового распределения на плоскости с шагом в пол длины волны (как требует технология РСА) в реальном масштабе времени, является сложной задачей с дорогой аппаратной реализацией. В данной работе предлагается схема измерений амплитудно-фазового распределения поля на основе подвижного переизлучателя и неподвижной линейной решётки из 32 доплеровских радиолокаторов (рисунок 1). Преимуществом данной системы, является не высокая стоимость конструкции, а также возможность измерения поля в реальном масштабе времени, благодаря быстрому движению переизлучателя.

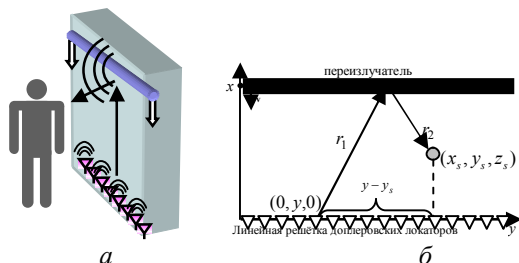


Рисунок 1 - Схема радиозондирования с использованием переизлучателя

(а – система радиоволнового видения с переизлучателем, б – вид в плоскости ХОУ)

По сигналам, поступающим с доплеровских локаторов необходимо восстановить плоское изображение объекта на некотором заданном расстоянии. Рассчитаем сигнал на выходе доплеровского локатора в случае наличия точечного рассеивателя в среде в точке  $(x_s, y_s, z_s)$ . Сигнал на выходе смесителя доплеровского локатора приближённо можно записать в виде:

$$U_0(x, y) \cong A \frac{e^{ik2r}}{r^3}, \quad (1)$$

где  $r = \sqrt{x^2 + (x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + z_s^2}$  - расстояние, проходимое сигналом от источника до приёмника локатора через переизлучатель и исследуемый объект,  $x$  - координата переизлучате-

ля,  $y$  - координата доплеровского локатора,  $x = x_0 - vt$  - зависимость положения переизлучателя от времени. В формуле (1) не учитывается смещение переизлучателя в процессе распространения радиоволн от исследуемого объекта до переизлучателя, поскольку скорость переизлучателя намного меньше скорости света. Сигнал для произвольного объекта можно сформировать в виде суммы реакция на точечные рассеиватели из которых составлен этот объект:

$$U(x, y) \cong \iiint_V \rho(x', y', z') A \frac{e^{ik2r'}}{r'^3} dx' dy' dz', \quad (2)$$

где  $r' = \sqrt{x^2 + (x - x')^2 + (y - y')^2 + z'^2}$ ,  $\rho(x', y', z')$  - распределение рассеивающих неоднородностей в среде.

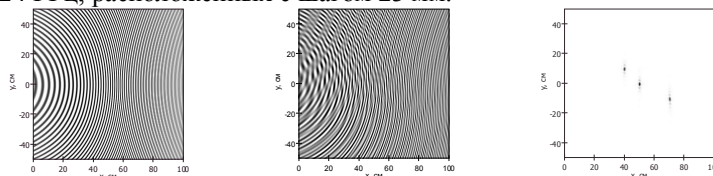
Решение обратной задачи, то есть задачи определения распределения рассеивателей по измеренным данным предлагается с помощью согласованной фильтрации:

$$\rho(x, y, z) \cong \iint_S U(x', y') \frac{e^{-ik2r'}}{r'^3} dx' dy'. \quad (3)$$

Если в формуле (3)  $z$  совпадает с дальностью до объекта, то функция фильтра будет согласована с измеренными данными и будет получено изображение объекта.

На рисунке 2 представлены результаты численного моделирования сигналов на выходе доплеровских локаторов для одного точечного рассеивателя  $U_0(x, y)$  (рисунок 2а) по формуле (1), результат измерений для трёх точечных рассеивателей вычисленный по формуле (2) (рисунок 2б), и результат восстановления изображения вычисленный по формуле (3) (рисунок 2в). Численное моделирование для рисунка 2 производилось для доплеровского локатора с несущей частотой 10 ГГц.

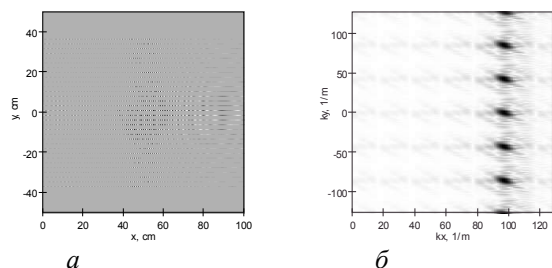
Следует учесть, что, как правило, доплеровские локаторы невозможно разместить на линии с шагом меньше пол длины волны, поскольку геометрические размеры антенны и самого локатора больше длины волны, поэтому линейная решётка локаторов является разреженной. Было проведено численное моделирование для локаторов с частотой 24 ГГц, расположенных с шагом 23 мм.





*а* *б*  
 Рисунок 2 – Численное моделирование точечных рассеивателей на расстоянии 50 см от плоскости перемещения переизлучателя (а – изображение реакции на единственный точечный рассеиватель; б – реакция на три точечных рассеивателя; в – восстановленное изображение трёх точечных рассеивателей)

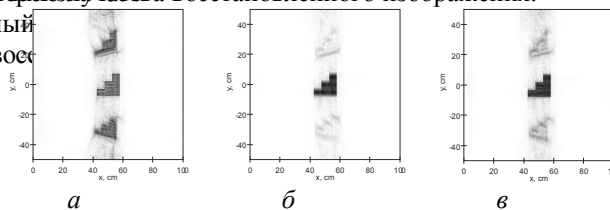
На рисунке 3 представлен результат численного моделирования для объекта сложной формы расположенного на расстоянии 50 см от плоскости движения переизлучателя. На рисунке 3б можно видеть пространственный спектр измеренных данных, который обладает периодичностью в следствии разреженности решётки доплеровских локаторов.



*а* *б*  
 Рисунок 3 – Численное моделирование для сложного объекта (а – изображение сигналов на выходе 32 локаторов; б – пространственный спектр сигнала а)

Разреженность данных измерений может породить боковые изображения объекта, которые, по сути, являются артефактами (рисунок 4а). Для устранения боковых изображений предлагается обеднить пространственный спектр измеренных данных (Рисунок 3б), то есть применить низкочастотную фильтрацию и обнулить все повторения в пространственном спектре. В результате такой операции боковые изображения исчезают (Рисунок 4б), однако снижается разрешение восстановленного изображения. Для получения высокого разрешения и устранения неоднозначности возможна нелинейная обработка результатов восстановления. Вычисление геометрического среднего рисунка 4а и 4б позволяет получить изображение

*в* высокого разрешения без боковых лепестков, однако этот подход не всегда приведёт к улучшению качества восстановленного изображения.



*а* *б* *в*  
 Рисунок 4 – Результат восстановления изображения плоского объекта сложной формы (а – восстановление методом согласованной фильтрации; б – восстановление методом согласованной фильтрации с обеднением пространственного спектра данных измерений; в – геометрическое среднее изображений а и б)

Таким образом, на численной модели показана возможность двумерного радиовидения с применением линейного подвижного переизлучателя и линейной разреженной решётки доплеровских локаторов.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы в рамках мероприятия 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6), а также при поддержке АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» мероприятие 2, проект № 2.1.2/3339, и при поддержке ФЦП мероприятие 1.1 «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров», ГК № 14.740.11.0076 от 06.09.2010 (2010-2012).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов/ Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: «Радиотехника», 2005. – 368 с.
2. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь. 1993. – 416 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В ОБЛАСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

*Павлова А.А., Сусляев В.И.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36.

E-mail: [Ray\\_of\\_light@sibmail.com](mailto:Ray_of_light@sibmail.com)

Радиофизический метод зарекомендовал себя как удобный инструмент для исследования фазовых переходов, которые происходят, например, при перестройке магнитной структуры при изменении температуры или химического состава [1-3] в оксидных ферромагнетиках. Этот переход сопровождается значительными изменениями величин комплексной магнитной проницаемости и смещением области естественного магнитного резонанса. Подобный эффект наблюдается для диэлектрической проницаемости (ДП)  $\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega)$  воды в области фазового перехода плавление-заморозание, поскольку величины  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  жидкой воды и льда существенно разнятся, а области аномальной дисперсии находятся в различных областях частотного диапазона электромагнитного излучения: для льда в диапазонах ОНЧ и НЧ, для воды – в СВЧ и КВЧ.

Фазовый переход типа плавление-заморозание относится к фазовым переходом первого рода, в которых агрегатное состояние вещества от жидкого к твердому меняется скачком. Это означает, что величина диэлектрической проницаемости в окрестности температуры перехода должна резко измениться на выбранной частоте измерения в промежутке между ОНЧ и КВЧ. Электромагнитное излучение в данном случае играет роль индикатора, фиксирующего изменение комплексной ДП. С другой стороны электромагнитное поле может способствовать возникновению зародышей новой фазы, вызывая турбулентные движения полярных молекул и их ассоциатов [4].

Измерения ДП проводились на радиоспектроскопе (рисунок 1), который состоит из: 1) анализатора цепей Agilent Technologies PNA E8363B, 2) датчика в виде открытого конца волновода. Для проведения температурных исследований использовалась микроклиматическая камера МККЗ.

Температура определяется по изменению сопротивления терморезистора, который подключен к измерителю LCR. Радиоспектроскоп позволяет исследовать диэлектрическую проницаемость жидкостей в диапазоне частот от 500 МГц до 40 ГГц и интервале температур – 30...+ 60 °С.

Исследования ДП водопроводной воды проводились компаративным методом, т.е. сравнивались спектры охлажденной водопроводной воды и воды, которая получалась при таянии льда.

В результате обработки данных были построены графики, на которых представлена температурная зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon'(T)$  и диэлектрических потерь  $\epsilon''(T)$  при охлаждении и нагревании водопроводной воды. На

рисунок отчетливо наблюдается различие в значениях ДП для размороженной и охлажденной воды.

Вода, полученная при таянии льда, получила название «талой» воды, которая, по мнению ряда исследователей, обладает свойствами, отличающимися от свойств охлажденной воды.

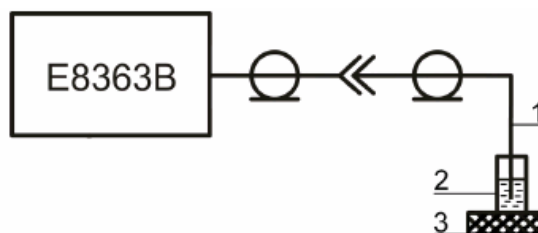


Рис. 1. Автоматизированный СВЧ - радиоспектроскоп: 1 – датчик; 2 – сосуд с водой; 3 – диэлектрическая подставка

Распространено мнение, что талая вода некоторое время обладает свойствами, отличными от свойств воды обычной, по крайней мере, по отношению к биологическим объектам: растениям, животным, человеку.

«Талая» вода является особым состоянием воды, при котором сохраняется часть свойств, присущих льду, т.к. в ней присутствуют льдоподобные кластеры. Наблюдается отличие физических и химических свойств «талой» воды от «неталой»: ДП, pH, окислительно-восстановительный потенциал, удельная проводимость и др.

Вода, полученная при размораживании, активно используется для приготовления косметических и фармакологических средств. Рекламируется питьевая вода, полученная размораживанием льда.

Известно также, что «талая» вода сохраняет биологическую активность ограниченное время, однако величина этого времени у разных авторов колеблется в широких пределах от 15 минут до 2-х суток. Отсюда следует, что необходим контроль за состоянием размороженной воды, чтобы не потерять потребительских качеств, определяющих ценность исходного продукта.

Постоянное производство «талой воды» требует дополнительных затрат и замедляет процесс производства конечного продукта. В связи с этим необходим контроль за состоянием подготовленной для производства воды.

Эффект, обнаруженный нами, мы предлагаем в качестве контрольного теста. Измерение спектров диэлектрической проницаемости можно осуществ-

влять с помощью лабораторных установок, либо специально изготовленными мобильными приборами, на основе микроволновых датчиков (рис. 2, 3).

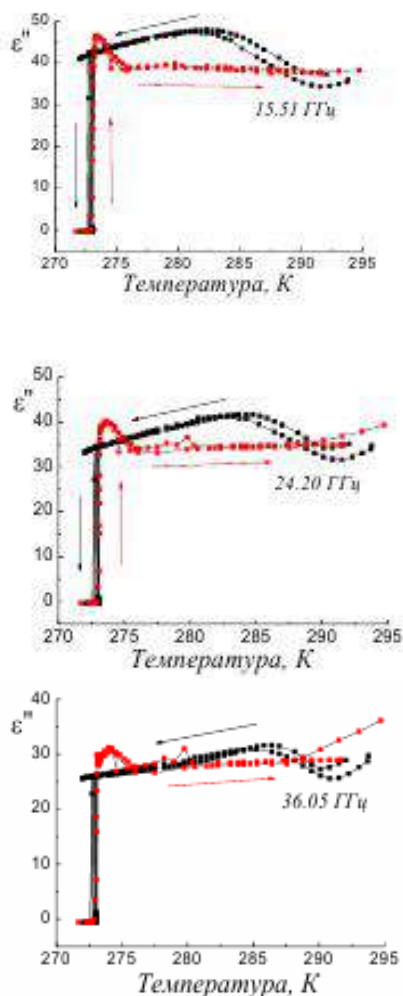


Рис. 2. Температурная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости речной воды в диапазоне частот от 5.24 – 40 ГГц (■ – охлаждение, ■ - нагревание)

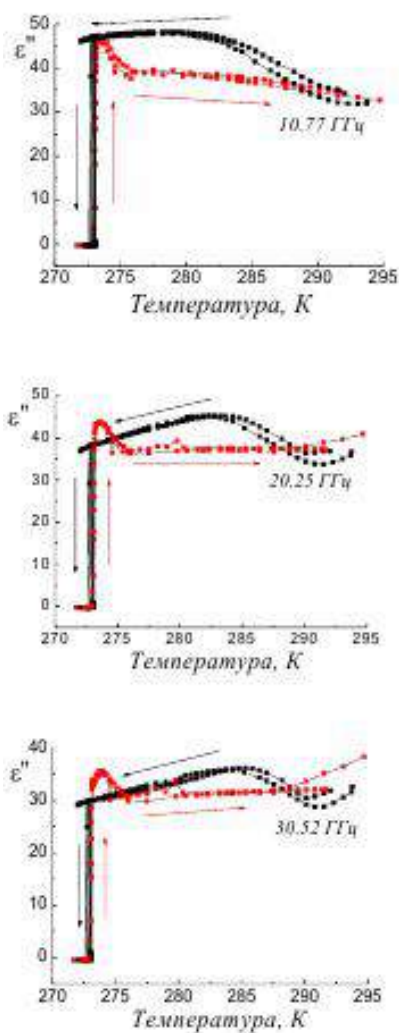


Рис. 3. Температурная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости речной воды в диапазоне частот от 5.24 – 40 ГГц (■ – охлаждение, ■ - нагревание)

#### Литература

10. Найден Е.П., Сусяев В.И., Бир А.В., Политов М.В. Спектры магнитной проницаемости наноразмерных порошков гексаферритов // Журнал структурной химии. 2004. Т. 45. С.102 – 105.
  11. Доценко О.А. Температурные зависимости СВЧ-спектров магнитной проницаемости наноразмерных порошков гексаферрита W-типа / О.А. Доценко, Е.Ю. Коровин, В.И. Сусяев, Г.Е. Кулешов // Известия вузов. Физика. 2006. № 9. С. 35 – 39.
  12. Сусяев В.И. Влияние ионов  $Fe^{2+}$  на СВЧ спектры ферритов  $CoZnW$  / В.И. Сусяев, Е.П. Найден, В.А. Журавлев, Г.И. Рябцев // Электронная техника. Сер. «Материалы». 1990. № 5/250/ДСП. С. 28 – 29.
- Сусяев В.И., Ютлин М.А. Исследование диэлектрической проницаемости воды на СВЧ в области фазового перехода типа плавление-замерзание // Известия ВУЗов. Физика. 2008 № 9/2. С. 218 – 219.

## ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ ПОДХОД В ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

*Мариунин В. М., Мещеряков В. А., Жуков А. А.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36.

E-mail: [mva@re.tsu.ru](mailto:mva@re.tsu.ru)

В настоящее время для нужд СВЧ и терагерцевой электроники освоен синтез электромагнитных материалов обладающих одновременно отрицательными диэлектрическими и магнитным проницаемостями, так называемых метаматериалов [1,2]. Обладая рядом уникальных свойств они, находят применение для формирования диаграмм направленности антенных систем, неотражающих покрытий, частотных фильтров, линий задержки, линейными устройств обработки аналоговой информации, фазовращателей и т.д. Будучи трехмерными структурами (рисунок 1), состоящими из изотропных слоев диэлектриков с нанесенными на них проводящими элементами различной формы, эти материалы в макроскопическом электродинамическом приближении чаще всего описываются скалярными отрицательными электрическими и магнитным проницаемостями. Такой подход дает возможности для формулировок и решений ряда краевых задач электродинамики. Однако трудности в установлении структуры синтезированной среды с её электромагнитными параметрами остаются.

Способы установления соответствия основаны на решении задач дифракции электромагнитных волн на рассматриваемых структурах. Однако они сложны из-за наличия разрывных областей и ребер.

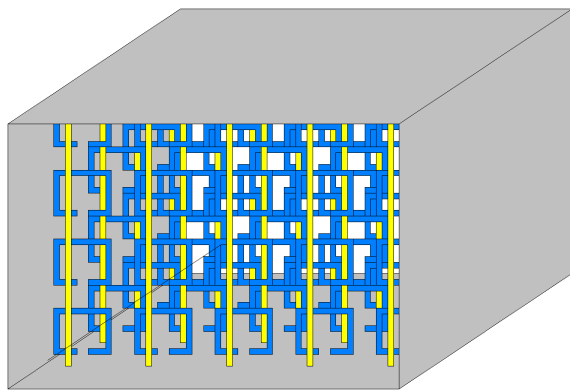


Рис. 1. Отрезок волновода, заполнен средой, электромагнитные параметры которой, обладают отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями.

Существуют различные другие подходы к решению этой задачи, основанные на вычислительных процедурах интегрирования систем дифференциальных уравнений, однако они усложнены необходимостью задания граничных условий. Анализ структуры синтезируемых метаматериалов

позволяет сделать вывод о том, что для решения поставленной задачи более адекватным будет декомпозиционный подход. Декомпозиция (разделение) объекта исследования на независимо анализируемые части - блоки один из наиболее мощных и широко используемых подходов при построении математических моделей сложных систем [3]. Декомпозиционный подход предполагает знание дескрипторов (описателей) всех блоков объекта исследования и не затрагивает проблем связанных с их построением. Этот факт позволяет исследователю на первом этапе построения общей математической модели объекта основное внимание уделить вопросам, связанным с формированием блоков, выбором типов дескрипторов, установлением связей между блоками и применением алгоритмов позволяющих произвести рекомпозицию (объединение) дескрипторов в некоторый обобщенный описатель всего объекта в целом (рисунок 2).

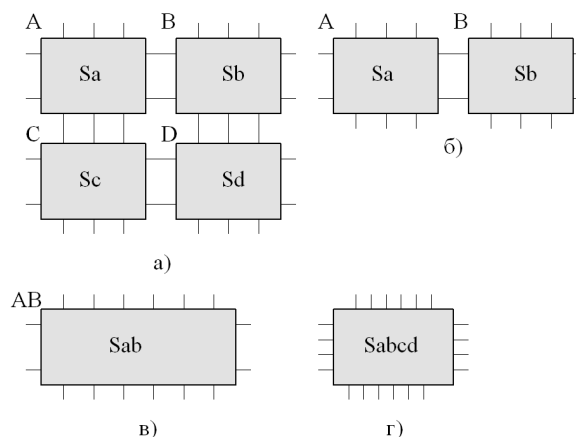


Рис. 2. Построение математической модели: декомпозиционная схема (а); два произвольных блока схемы А и В с дескрипторами Sa и Sb показаны отдельно (б), рекомпозиция в блок АВ с дескриптором Sab (в); полная модель объекта исследования с дескриптором S, полученная путем поэтапного применения процедуры рекомпозиции (г).

При получении математических моделей электродинамических систем в качестве дескрипторов блоков и полной модели используют матрицы рассеяния S или передачи A. Процедура рекомпозиции двух связанных блоков А и В с матрицами Sa и Sb позволяет построить матрицу рассеяния Sab блока АВ, а многократное применение этой процедуры к блокам всей декомпозиционной схемы - обобщенную матрицу рассеяния всего анализируемого объекта.

Приведенная схема построения математической модели объекта реализуема только при условии знания дескрипторов всех блоков. Поэтому важным моментом процесса декомпозиции является такое разделение объекта на блоки, которое позволило бы привести их к относительно простому виду с известными дескрипторами.

Может оказаться, что дескриптор отдельного блока неизвестен, приходится применять различные методы его определения. И в этом случае декомпозиционный подход (вторичная декомпозиция) позволяет упростить процесс формирования модели. Пространственно-распределенный блок можно разделить ортогональными плоскостями на однородные по структуре фрагменты, для которых формальная сторона получения дескриптора связана с решением дифракционной задачи рассеяния электромагнитных волн на однородном трехмерном объекте.

Решением дифракционной задачи является матрица рассеяния, параметрами элементов которой являются материальные характеристики и геометрические размеры. В связи с этим, можно, используя процедуру рекомпозиции получить дескриптор отдельного блока. Такой подход является мощным инструментом в решении проблемы автоматизированного проектирования сложных электродинамических систем.

В используемом методе блок имеет форму однородного параллелепипеда, волновые процессы в котором, отображаются двумя ортогональными полевыми векторными константами [3]. Дескриптор блока представляет собой матрицу рассеяния двенадцатого порядка. Коэффициенты матрицы определяются только размерами блока, его проницаемостью и частотой электромагнитного процесса.

Разработан программный комплекс, направленный на решение задачи декомпозиции объекта исследования, формирование параметров всех блоков, осуществление рекомпозиции, а, следовательно, построение математической модели объекта в целом. Программный комплекс позволяет проводить модельные эксперименты в различных электродинамических системах, определять структуру электромагнитного поля и коэффициенты матрицы рассеяния в дальней зоне.

В состав программного комплекса входит база известных материалов с описанием их электромагнитных характеристик. Помимо зафиксированных в базе материалов, пользователь может объявить набор материалов с необходимыми ему материальными свойствами.

Интерфейс программы визуально-событийный. С его помощью можно задавать основных характеристик моделируемого объекта (геометрические

и материальные) в ручном или автоматическом режимах, перемещать отдельные элементы (блоки) и устанавливать их в необходимые места, отображать моделируемый трехмерный объект и его элементы, сохранять трехмерные изображения и результаты вычислений.

В процессе моделирования трехмерных структур решаются следующие задачи:

- получение матрицы рассеяния (S) и передачи (T) для нерегулярных участков линий передачи в дальней зоне (в данной версии реализован вариант, когда нерегулярный участок линии передачи соединен с одномодовым прямоугольным волноводом и коэффициенты матриц вычисляются относительно этой моды, для согласования регулярного и нерегулярного участков пользователь должен в плоскости стыка установить согласующий трансформатор);
- постоянные распространения и структуры полей в поперечном сечении регулярного волновода (прямые, обратные, прямые и обратные волны, Н-волны, гибридные волны).

В тестовых модельных экспериментах был рассмотрен ряд известных неоднородностей волноводного типа, таких как волноводные диафрагмы, переходы на волноводы другого сеченния, стержни в различных плоскостях сечения. Проведенные сравнения полученных результатов с известными результатами, взятыми из литературных источников, показали приемлемую применимость программы. Априорная погрешность метода определяется третьей степенью размера максимальной грани параллелепипеда, являющегося базовым блоком.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 47, p. 2075, 1999.
2. R. Marques, F. Martin and M. Sorolla, Metamaterials with negative parameters. Wiley series in microwave and optical engineering, Kia Chang Series editor, Wiley-Intersciences, John Wiley and sons Inc., New Jersey 2008.
3. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ/ Никольский В.В., Орлов В.П., Феоктистов В.Г. и др.; Под ред. Никольского В.В. -М.: Радио и связь, 1982.

Работа выполнялась в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 год». Государственный контракт № 14.740.11.0335

## РАДИОВОЛНОВОЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО МНОГОСЛОЙНОГО КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ И СРЕД

*Маришунин В. М., Мещеряков В. А., Жуков А. А.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36.

E-mail: [mva@re.tsu.ru](mailto:mva@re.tsu.ru)

Перспективность радиоволновых методов контроля обусловлена их совместимостью с современными методами обработки, сбора и передачи информации, возможностями организации измерений в труднодоступных, опасных и удаленных условиях. Существенный интерес представляют волноводные методы для непрерывного контроля состава текучей продукции в трубопроводах. В этом случае отрезок реального трубопровода замещается волноводом, в котором возбуждается заданный спектр электромагнитных типов волн. Информативным параметром будет постоянная распространения выбранного типа волны и ее зависимость от комплексной диэлектрической проницаемости контролируемого материала. Определение компонентного состава продукции производится по вычисленным значениям действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости по заданной математической модели исследуемой среды или путем сравнения с экспериментальными результатами, полученными независимыми прямыми методами.

Измерительное устройство представляет собой отрезок металлической трубы большего сечения по сравнению с технологическим трубопроводом. Внутри этого отрезка трубы располагается полый цилиндрический диэлектрический вкладыш, внутренний диаметр которого равен диаметру контролируемого трубопровода. Эскиз волноводной секции, при использовании центрального слоя волновода в качестве исследуемого материала, изображен на рис. 1. Центральное сечение волновода, обозначено на рис. 1 как слой 1 радиуса  $r_1$ . Слои 2, 3, 4 являются концентрическими цилиндрами с внешними радиусами  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $R_a$  и разными значениями диэлектрической проницаемости. Последний слой ограничен металлическим экраном 5.

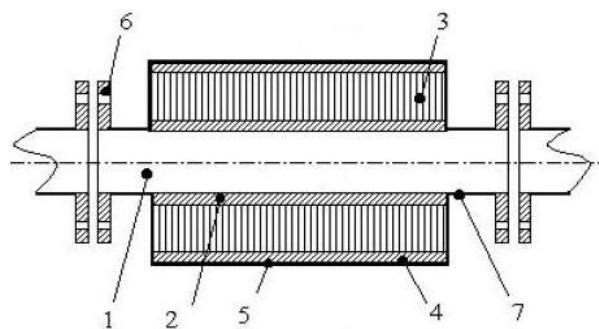


Рис. 1. Эскиз волноводной секции

Центральное сечение волновода заполняется исследуемым материалом. Для измерения параметров текучих сред слой 2 выполнен из твердотельного диэлектрика. При измерении параметров твердотельных материалов слой 2 образуется воздушным зазором. Такие конструктивные решения позволяют исключить проблему несовершенства контактов поверхностей, сводя ее к операции измерения размеров.

В зависимости от частоты зондирующего сигнала рассматриваемая структура может проявлять свойства: отрезка волноводной линии передачи переменного сечения, резонатора или реактивного аттенюатора. Резонансные свойства структура проявляет на частоте, равной критической для порождающего  $E_{01}$  типа колебаний регулярного волновода. Физически это означает, что при обращении в нуль постоянной распространения ( $k_0\Gamma' = 0$ ) волны  $E_{01}$  электромагнитные процессы не зависят от направления распространения  $z$ . Стоячая волна при этом образуется только по радиальной координате.

В качестве математической модели радиоволнового датчика выбран регулярный круглый многослойный волновод. Такие структуры допускают строгое решение граничной задачи [1, 2]. Решение проводится численно для допустимых физических реализаций электромагнитного поля и заданных граничных условий. Дисперсионное уравнение получено в неявном виде после удовлетворения граничных условий для составляющих поля на границе последнего слоя, примыкающего к металлической стенке волновода. Алгоритмы реализованы в виде пакета прикладных программ, позволяющих вычислять полный спектр собственных волн и структуры составляющих их электромагнитных полей в заданном частотном диапазоне для комплексных значений материальных параметров слоев.

Возможность использования отрезка волноводной линии передачи на предельных частотах как реактивного аттенюатора можно оценить из результатов, приведенных на рис. 2. Соотношения радиусов двухслойного волновода выбраны из условия обеспечения максимальной чувствительности к изменению свойств исследуемого материала ( $r_1/R_a=0.56$ ,  $k_0R_a=0.09$ ,  $\mu_1=\mu_2=1$ ). Линии 1, 2, 3, 4, 5 получены для диэлектрической проницаемости  $\epsilon_2$  внешнего слоя равной соответственно 1, 10, 50, 100 и 200. Линия А на рисунке соответствует зависимости мнимой части постоянной распространения волны  $E_{01}$  однородного волновода радиуса  $R_a$  от диэлектрической проницаемости



среды  $\epsilon$ . Видно, что имеется возможность оптимального выбора вида зависимости  $k_0\Gamma''(\epsilon)$ .

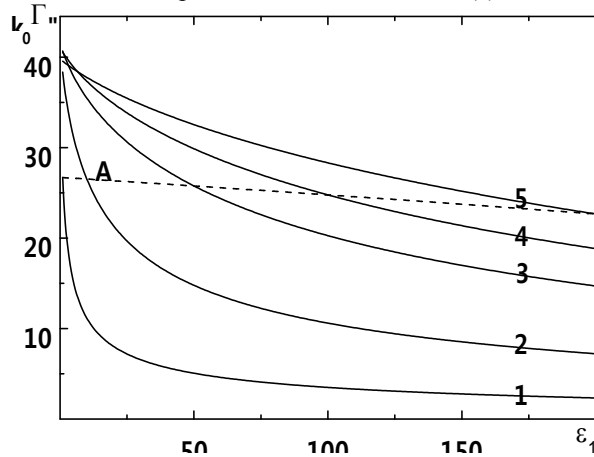


Рис. 2. Зависимость мнимой части постоянной распространения волны  $E_{01}$  двухслойного круглого волновода от диэлектрической проницаемости  $\epsilon_1$  внутреннего слоя

На рис. 3 представлены зависимости постоянной распространения волны  $E_{01}$  двухслойного волновода от волнового числа ( $r_1/R_a=0.56$ ,  $\epsilon_2=\mu_1=\mu_2=1$ ). Линии 1, 2, 3, 4, 5 получены для диэлектрической проницаемости  $\epsilon_1$  внутреннего слоя равной соответственно 100, 50, 10, 4 и 1. Пунктирными кривыми изображены действительные части постоянной распространения. Видно, что при различных диэлектрических заполнениях затухание  $k_0\Gamma''$  очень слабо зависит от частоты. Поэтому в качестве бездисперсионной измерительной ячейки отрезки таких волноводов могут быть использованы, по крайней мере, при десятикратном изменении частоты.

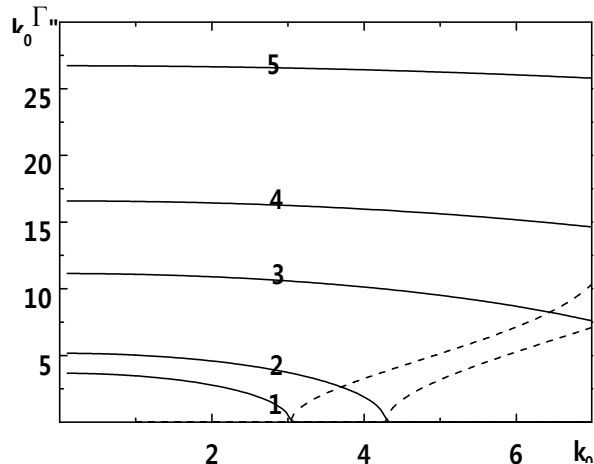


Рис. 3. Зависимость постоянной распространения волны  $E_{01}$  от волнового числа

Влияние диссипативных потерь на постоянную распространения волны  $E_{01}$  (сплошная линия – мнимая часть, пунктирная – действительная часть постоянной распространения) двухслойного вол-

новода показано на рис. 4. Тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg } \delta$ ) материала внутреннего слоя равен 0-0.1 – кривая 1, 0.5 – кривая 2 и 1 – кривая 3. Из рисунка видно, что кривые затухания совпадают в интервале  $\text{tg } \delta = 0-0.1$ .

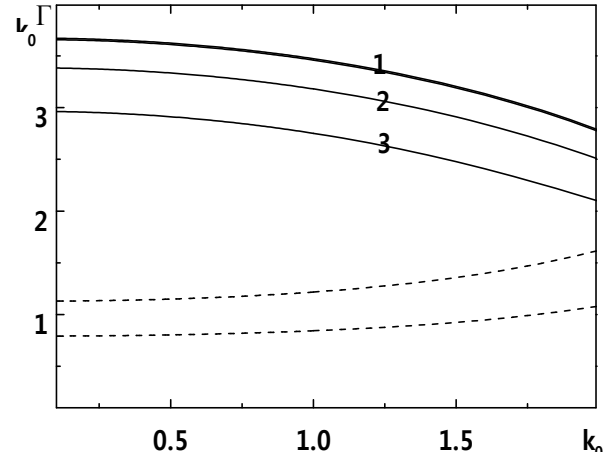


Рис. 4. Зависимость постоянной распространения волны  $E_{01}$  от волнового числа при различных значениях тангенса угла потерь исследуемой среды

Представленные результаты показывают возможность и перспективность разработки на основе отрезков запердельных круглых металлодиэлектрических волноводов, проявляющих свойства реактивных аттенуаторов, комплекса измерительных широкодиапазонных датчиков для исследования и контроля диэлектрической проницаемости различных материалов и сред.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков А.А., Редькин Г.А., Мудров А.Е., Хасанов В.Я. Контроль электрофизических параметров текучих сред радиоволновыми методами на запердельных волноводах. // Дефектоскопия. – 1998. – № 10. – с. 47–58
2. Редькин Г. А., Мещеряков В.А., Жуков А.А. Собственные электромагнитные волны в неоднородно-слоистых круглых волноводах // Изв. вузов. Физика. – 2006. – №9. – С. 15–19

Работа выполнялась в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 год». Государственный контракт № 14.740.11.0335

## МЕТОД ИТЕРИРОВАННЫХ ЯДЕР В ТЕОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

*Бардашов Д.С., Лосев Д.В.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: [ldm@elefot.tsu.ru](mailto:ldm@elefot.tsu.ru)

Предложено приближенное решение задачи распространения волн в плавно-неоднородной среде в скалярном приближении на основе использования метода итерированных ядер. Предложенное решение объединяет в себе достоинства методов борновского рассеяния и геометрической оптики и справедливо в случаях, когда характерные размеры неоднородностей много больше длины волны. Достоинством предложенного решения является его применимость для любого вида падающей волны и профиля неоднородности

Большинство сред, которые представляют интерес для изучения, являются неоднородными. Задача о распространении радиоволн в неоднородной среде не имеет точных решений, поэтому приходится использовать приближенные методы. Существующие подходы в описании поля, прошедшего через неоднородную среду, можно разделить на две группы: методы, учитывающие многолучевое распространение, например, метод Борна, и методы с многократным взаимодействием, например, метод геометрической оптики [1]. Эти подходы имеют разные области применения: первый эффективно описывает рассеяние волн сосредоточенными объектами, второй – изменение характеристик излучения при прохождении волны через плавно-неоднородную среду. В данной работе делается попытка объединения достоинств этих подходов.

Идея предлагаемого метода состоит в сведении уравнения Гельмгольца для неоднородной среды к эквивалентному интегральному уравнению, решение которого ищется методом последовательных приближений. Этот подход также позволяет учесть процессы ослабления излучения в поглощающей среде.

Будем рассматривать задачу распространения радиоволн в неоднородной безграничной среде в скалярном приближении. Излучатель и приемник расположены непосредственно в этой среде. Для нахождения рассеянного поля будем исходить из уравнения Гельмгольца

$$\Delta E(\mathbf{r}) + k^2(\varepsilon_1(\mathbf{r}) + i\varepsilon_2(\mathbf{r}))E(\mathbf{r}) = -f(\mathbf{r}).$$

Применяя метод функций Грина, рассмотрим вспомогательное уравнение

$$\Delta G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) + \kappa^2 G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) = -\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0),$$

где  $\kappa$  – произвольное число.

С помощью стандартных преобразований система этих двух уравнений сводится к неоднородному интегральному уравнению Фредгольма второго рода

$$E(\mathbf{r}_0) = E_0(\mathbf{r}_0) + \kappa^2 \int_V G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) E(\mathbf{r}) \Delta \varepsilon(\mathbf{r}) d\mathbf{r},$$

где  $G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) = \frac{e^{i\kappa|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}$  – функция Грина,

$\Delta \varepsilon = [k^2(\varepsilon_1 + i\varepsilon_2) - \kappa^2] / \kappa^2$  характеризует неоднородности среды. Поле  $E_0(\mathbf{r}_0)$  представляет собой напряженность поля первичной волны, а интеграл в правой части описывает рассеянное неоднородностями поле. Это уравнение известно в литературе как уравнение Липпмана-Швингера [2].

Полученное интегральное уравнение будем решать методом последовательных приближений [3]. Решение в этом случае можно представить в виде

$$E(\mathbf{r}_0) = E_0(\mathbf{r}_0) + \kappa^2 \int_V E_0(\mathbf{r}) \Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) d\mathbf{r}.$$

В данном равенстве  $\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$  представляет собой резольвенту, которая может быть найдена посредством суммирования повторных ядер

$$\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \sum_{n=0}^{\infty} (\kappa^2)^n W_{n+1}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0).$$

Здесь  $W_n(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$  – n-ое повторное ядро, которое находится с помощью следующего рекуррентного соотношения

$$W_{n+1}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \int W_n(\mathbf{r}, \mathbf{r}') W(\mathbf{r}', \mathbf{r}_0) d\mathbf{r}',$$

в котором  $W_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = W(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$ .

Первое ядро в нашем случае равняется

$$W_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = G(R) \Delta \varepsilon(\mathbf{r}_0), \quad R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|.$$

Второе повторное ядро имеет вид

$$W_2(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \Delta \varepsilon(\mathbf{r}) \int_V \Delta \varepsilon(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0) G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') d\mathbf{r}'. \quad (1)$$

В предположении достаточно плавного изменения  $\Delta \varepsilon(\mathbf{r})$ , первый множитель в подынтегральном выражении можно приближенно вынести за знак интеграла:

$$W_2(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) \approx (\Delta \varepsilon(\mathbf{r}))^2 \int_V G(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0) G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') d\mathbf{r}'.$$

Метод вычисления такого типа интегралов известен и указан в [4]. Приведем несколько вычисленных ядер

$$W_2(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = -G(R) (\Delta \varepsilon(\mathbf{r}))^2 \frac{iR}{2\kappa},$$

$$W_3(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = G(R)(\Delta\varepsilon(\mathbf{r}))^3 \frac{iR}{8\kappa^3} (1 - i\kappa R).$$

В итоге в общем случае выражение для  $(n+1)$ -ого повторного ядра можно представить в виде

$$W_{n+1}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = G(\mathbf{R})[\Delta\varepsilon(\mathbf{r})]^{n+1} \frac{-i\kappa R}{(2\kappa)^{2n}} \sum_{m=0}^n \frac{a_{m,n}(-2i\kappa R)^m}{(m+1)!}$$

где коэффициенты  $a_{m,n}$  можно определить с помощью следующих соотношений

$$a_{0,n} = \sum_{i=0}^{n-2} a_{i,n-1}, \quad a_{m,n} = \sum_{i=m-2}^{n-2} a_{i,n-1}, \quad a_{n-1,n} = 2.$$

В результате резольвента запишется в виде

$$\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \Delta\varepsilon(\mathbf{r})G(R) \left( 1 - i\kappa R \sum_{n=1}^{\infty} \Delta\varepsilon(\mathbf{r})^n \sum_{m=0}^{n-1} \frac{a_{m,n}(-2i\kappa R)^m}{(m+1)!} \right)$$

Меняя порядок суммирования и вычисляя внутренний ряд, приходим к виду

$$\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \Delta\varepsilon(\mathbf{r})G(R) \left( e^a + \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(x)^{-p-1}}{(p+1)!} (a^{2p+2} e^a)^{(p)} \right).$$

Для вычисления полученного ряда воспользуемся методом производящих функций. Предварительно преобразуем ряд к нужному нам виду, вводя новую переменную  $t = x^{-1}$  и проводя почленное дифференцирование по ней. Получим

$$F(a, t) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(t)^p}{(p)!} (a^{2p+2} e^a)^{(p)}.$$

Отождествим коэффициенты степенного ряда с ортогональным полиномом, вычисляемым по обобщенной формуле Родрига. Тогда для производящей функции этого ряда имеет место представление [5]

$$F(a, t) = \frac{\lambda^2}{1 - 2t\lambda},$$

где  $\lambda = \lambda(a, t)$  есть тот корень квадратного уравнения  $\zeta - a - t\zeta^2 = 0$ , который при малых  $|t|$  расположен ближе к точке  $a$ . После дальнейших упрощений приходим к следующему выражению для поля в неоднородной среде

$$E(\mathbf{r}_0) = E_0(\mathbf{r}_0) + \kappa^2 \int_V E_0(\mathbf{r}) \Delta\varepsilon(\mathbf{r}) \frac{e^{i\kappa R \sqrt{\varepsilon}}}{4\pi R} d\mathbf{r}.$$

Если в выражении (1) провести разложение вплоть до линейных членов, то можно получить более точное выражение

$$E(\mathbf{r}_0) = E_0(\mathbf{r}_0) + \kappa^2 \int_V E_0(\mathbf{r}) \Delta\varepsilon(\mathbf{r}) \left( \frac{e^{i\kappa R \sqrt{\varepsilon}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)}}{4\pi R} + \frac{(\nabla \tilde{\varepsilon}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0))^2}{4\tilde{\varepsilon}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)} \right) \cdot \int_V \frac{e^{i\kappa R' \sqrt{\varepsilon}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}}{4\pi R'} \frac{e^{i\kappa R'_0}}{4\pi R'_0} \left[ (\kappa R')^2 + \frac{i\kappa R'}{\sqrt{\varepsilon}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')} \right] d\mathbf{r}' d\mathbf{r},$$

где  $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon + \nabla \varepsilon \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)/2$ ,  $R' = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}|$ ,

$$R'_0 = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0|.$$

Таким образом, получено решение интегрального уравнения, описывающего распространение излучения в неоднородной среде. Единственное сделанное приближение состоит в неточном учете зависимости  $\Delta\varepsilon(\mathbf{r})$  от координат, позволяющем вынести ее из-под знака интеграла. Данное приближение справедливо в случаях, когда зависимость  $\Delta\varepsilon(\mathbf{r})$  от координат достаточно плавная и когда имеет место сильная осцилляция экспоненты, т.е. характерные размеры неоднородностей много больше длины волны. Кроме того, введенный нами достаточно произвольно параметр  $\kappa$  может быть использован для расширения области применимости этого подхода.

Предложенное решение объединяет в себе достоинства методов борновского рассеяния и геометрической оптики. Действительно, в случаях малых флуктуаций диэлектрической проницаемости, когда влиянием  $\Delta\varepsilon(\mathbf{r})$  в показателе экспоненты можно пренебречь, наше решение совпадает с борновским. С другой стороны, показатель экспоненты, описывающий искажение волны, прошедшей неоднородную среду, можно отождествить с оптической длиной, составляющей основу метода геометрической оптики.

Достоинством предложенного решения является его применимость для любого вида падающей волны и профиля неоднородности. В дальнейшем предполагается на основе разработанного подхода решение обратной задачи восстановления пространственной структуры неоднородностей среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. – 464 с.
2. Еремин Ю.А., Ивахненко В.И., Рязанов М.В. Математические модели дифракционной томографии // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43, № 2. – С. 133-143.
3. Трикоми Ф. Интегральные уравнения. – М.: ИЛ, 1960. – 300 с.
4. Бардашов Д.С., Лосев Д.В. Метод резольвенты в теории распространения волн в неоднородных средах // Известия Вузов. Физика, 2006, № 9. – С. 19-22.
5. Суетин П.К. Классические ортогональные многочлены. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 416 с.

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТОУПОРЯДОЧЕННЫХ ВЕЩЕСТВ

*Политов М.В., Найден Е.П.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: [pmv@sibmail.com](mailto:pmv@sibmail.com)

Создан автоматизированный комплекс для исследования характеристик магнитоупорядоченных материалов в импульсных магнитных полях до 5 Т.. Разработано программное обеспечение, позволяющее получать кривую намагничивания и получение информации о намагниченности насыщения, остаточной намагниченности, эффективного поля магнитной анизотропии и определение критических полей ВТСП.

Для исследования магнитомягких материалов разработан автоматизированный комплекс для записи полной петли гистерезиса в полях до 0.5Т.. Комплекс включает: блок развертки магнитного поля, электромагнит либо катушки Гельмгольца, индукционный датчик для измерения отклика на внешнее воздействие магнитного поля на образец.

В основе работы первого прибора «**МАГНИТОМЕТР Н-04**» лежит возможность одновременной регистрации временных зависимостей напряженности импульсного магнитного поля и магнитной восприимчивости образца исследуемого магнитного соединения. Импульсное магнитное поле создается разрядом батарей конденсаторов через соленоид. Величина намагничивающего поля пропорциональна напряжению заряда батареи конденсаторов. Источник питания соленоида и устройство регулирования уровня заряда расположены в блоке управления. Исследуемый образец располагается на держателе образца внутри индукционного датчика, помещенного в область максимально однородного поля внутри соленоида. Сигнал, снимаемый с датчика при изменении поля пропорционален магнитной восприимчивости образца в данном поле  $\chi = dM/dH$ . Полевая зависимость намагниченности вычисляется при численном интегрировании полевой зависимости восприимчивости (операция предусмотрена программным обеспечением комплекса). Данные о величине поля анизотропии могут быть получены при обработке кривых намагничивания с использованием закона приближения намагниченности к насыщению, либо определены непосредственно по положению сингулярной точки производных намагниченности по полю высших порядков. Операция дифференцирования  $d^2M/dH^2$  также предусмотрена программным обеспечением комплекса. Комплекс позволяет проводить измерения на поликристаллических, монокристаллических, порошковых материалах и тонких пленках.

Технические характеристики:

- Диапазон намагничивающих полей - 0,05-6Т;
- Длительность импульса – 16ms;
- Частота дискретизации – до 200 kHz (до 8000 точек на кривые намагничивания и размагничивания);
- Чувствительность по уровню сигнала -6,25 mkV;
- Обмен данных через COM – порт;
- Минимальные требования к компьютеру: процессор -433MHz, память – 64 MB);
- Время на одно измерение с обработкой данных – 1min;
- Экспорт данных в программы обработки (Origin, Excel и т.д.)
- Требование к образцам – вес в пределах 10-100 мг

В основе работы второго прибора «**МАГНИТО**» лежит возможность одновременной регистрации временных зависимостей напряженности магнитного поля, подаваемого на катушки электромагнита или кольца Гельмгольца, и изменения намагниченности образца исследуемого магнитного соединения. Магнитное поле формируется на электромагните в виде синусоиды с периодом 90 секунд и регулируемой амплитудой до 100В и фиксируется с помощью датчика Холла. Исследуемый образец располагается на держателе образца внутри индукционного датчика, помещенного в область максимально однородного поля внутри электромагнита. Сигнал, снимаемый с датчика при изменении поля пропорционален изменению намагниченности исследуемого образца  $dM/dt$ . Полевая зависимость намагниченности вычисляется при численном интегрировании (операция предусмотрена программным обеспечением комплекса). Данные о коэрцитивной силе, остаточной намагниченности и других параметрах могут быть получены при обработке временных зависимостей с помощью программного комплекса. Предусмотрена возможность выгрузки экспериментальных данных и обработка сторонними программами (Origin, Excel и т.д.).

Технические характеристики:

- Диапазон намагничивающих полей - до 0,5Т;
- Длительность периода изменения поля – до 60s;
- Частота дискретизации – до 20 точек в секунду;
- Чувствительность по уровню сигнала -0,15 mkV (24-разрядное АЦП);
- Обмен данных через USB – порт;

- Минимальные требования к компьютеру:  
процессор – 1GHz, память – 512 MB);  
Время на одно измерение с обработкой  
данных – 3min;

На рисунках 1 и 2 представлены внешний вид прибора «МАГНИТОМЕТР Н-04» и обработанный результат работы комплекса.



Рис.1 Внешний вид комплекса «Магнитометр Н-04»

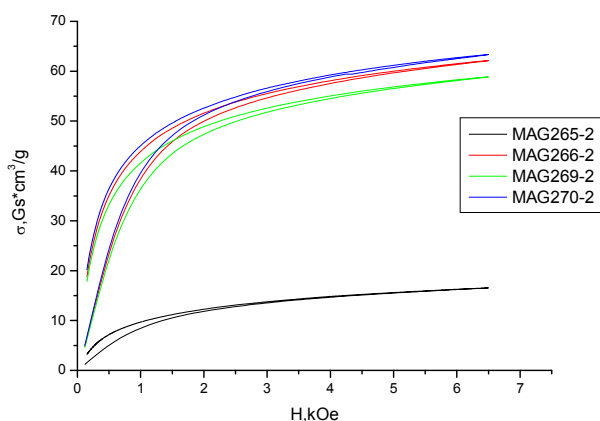


Рис.2 Результат работы

На рисунках 3 и 4 представлены внешний вид второго прибора «МАГНИТО» и интерфейс программы сбора данных.

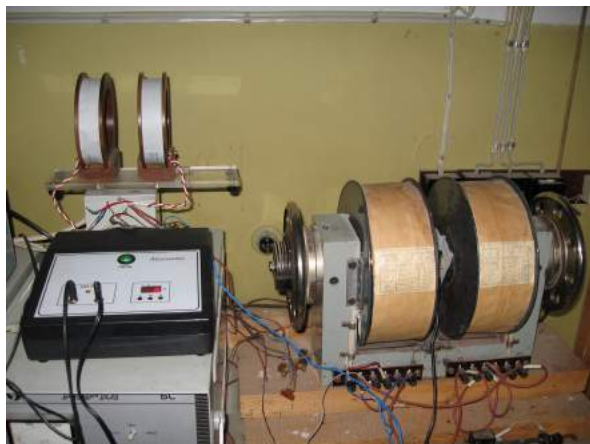


Рис.3 Внешний вид комплекса «Магнито»

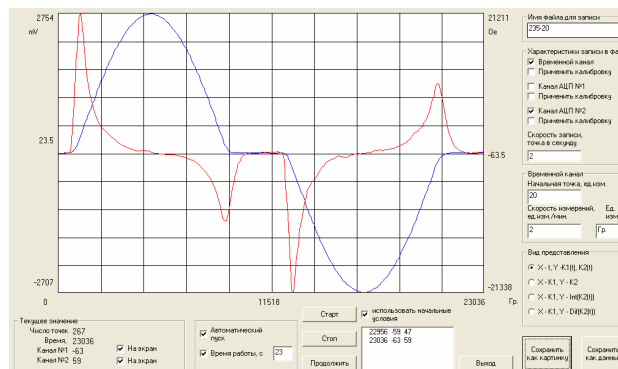


Рис.4 Интерфейс программы

На рисунках 5 и 6 показаны полученные результаты после обработки измерений намагниченности и его производной от внешнего магнитного поля для образца  $\text{Co}_2\text{Z}$

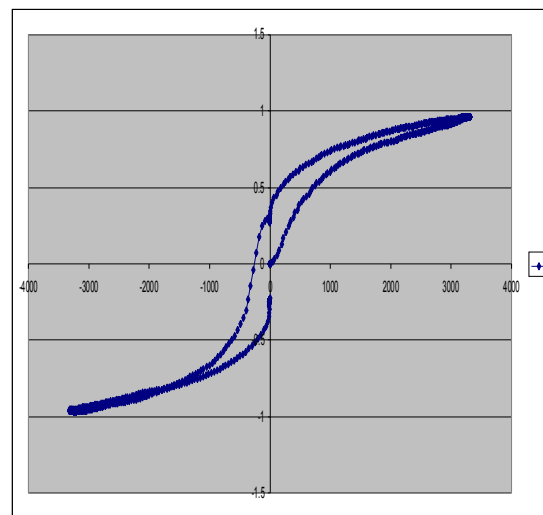


Рис.5 Полная петля гистерезиса для  $\text{Co}_2\text{Z}$

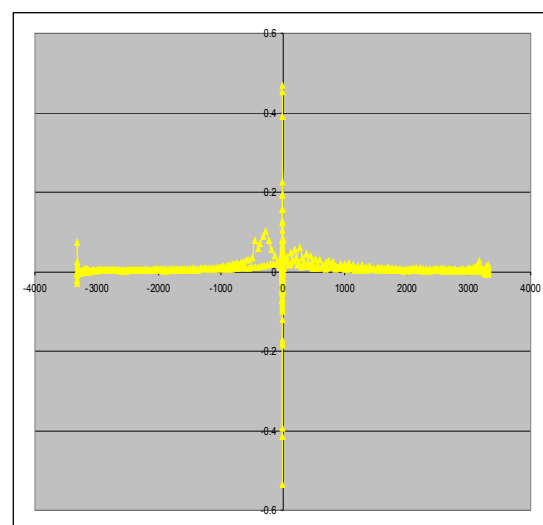


Рис.6 Изменение производной намагниченности от внешнего магнитного поля для  $\text{Co}_2\text{Z}$

***СЕКЦИЯ 4***  
***СВЧ И ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА***



## ИНФОРМАЦИОННО- АНАЛИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОАО НИИПП

*Пономарев А.А., Юрченко В.И., Яук Э.Ф.*

ОАО НИИПП

E-mail: yur\_med@mail.ru

ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» с момента основания предприятия (1964 год) [8] и по настоящее время (рис.1) специализируется на разработке и выпуске изделий **СВЧ техники и оптоэлектроники**, выполненных на основе сложных полупроводниковых соединений  $A_3B_5$ . На предприятии имеется полный цикл изготовления изделий, включая производство исходных эпитаксиальных структур, монокристаллов и гибридно-монокристаллов интегральных схем на их основе, оптоэлектронных полупроводниковых приборов и сверхвысо-

кочастотных (СВЧ) полупроводниковых приборов. Оба направления деятельности ОАО «НИИПП» совпадают с ключевыми направлениями развития мировой техники в области разработки и производства монокристаллов полупроводниковых источников излучения и приемопередающих модулей СВЧ диапазона, в том числе миллиметрового диапазона длин волн. Значительный прогресс обеспечивается в области оптоэлектроники, в связи с нарастающей потребностью в твердотельных источниках света


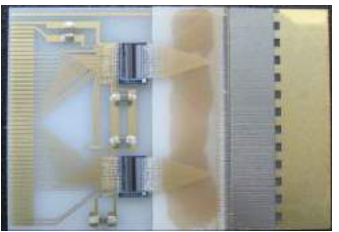

<p>С 1964 г. Размеры 5-10 мкм Слои 0,2-1 мкм</p>		<p>•разработка и производство дискретных полупроводниковых приборов СВЧ (диоды Ганна, смесительные, умножительные и др.), светодиодов и транзисторов</p>
<p>С 1980 г. Размеры 1- 2 мкм Слои 1- 0,5 мкм</p>		<p>•разработка и производство гибридных и монокристалльных интегральных схем СВЧ и отдельных модулей на их основе (генераторы, смесители, умножители, детекторы и т.д.)</p>
<p>С 1995 г. Размеры 0,8- 0,07 мкм Слои 0,4- 0,01 мкм</p>		<p>•разработка и производство многофункциональных модулей и устройств, функционально законченных изделий (ППМ для ближней локации, возбудители для станций помех РЭБ, синтезаторы частоты, многоканальные приемники для РЛС, линии связи, и т.д.)</p>

Рис 1 Этапы развития разработки и производства НИИПП

Технологической основой деятельности предприятия (рис.2) являются технологии, базирующиеся на результатах фундаментальных исследований материалов, проводимых специалистами предприятия с участием ученых ВУЗов и РАН [7]. ОАО НИИПП производит эпитаксиальный материал на основе арсенида галлия индия и их твердых растворов методами жидкостной и газофазовой эпитаксии. В отделе

материаловедения поставлен полный цикл изготовления эпитаксиальной структуры включая рентгеновскую ориентацию, проволочную и дисковую резку монокристаллов. Шлифовка и полировка подложек с контролируемыми параметрами: толщина, плоскостность, ориентация. На изготовленных подложках производится наращивание эпитаксиальных слоев в соответствии с требованиями параметров прибора.

			
Задачи технологической модернизации	Развитие существующей системы производства	Организация новых разработок	Создания перспективных изделий
Направления реализации	Рентабельность	Создание критически важной номенклатуры	Задел нанотехнологий
Критерии реализации	Учет потребностей	Сроки разработки	Системы в кристалле
	Импортозамещение	Поставка на стадии разработки	Субмодули
	Расширение номенклатуры	Новые методы проектирования	Освоение новых диапазонов длин волн
	Повышение качества		

Рис.2 Направления развития

Газофазной эпитаксией производятся структуры для широкого диапазона диодов Ганна, варикапов, смесительных, детекторных, умножительных диодов. На предприятии разработана технология выращивания многослойных структур GaAs разного типа проводимости. Исследования и разработки проводятся на установках двух типов, различающихся конструктивно:

1) промышленная установка ЭТР-100 с реактором вертикального типа и многоместным (6 позиций) пьедесталом для подложечных пластин, модернизированная для реализации хлоридного метода;

2) установка горизонтального типа на две позиции со шлюзовым устройством и с электромагнитной системой перемещения подставки, что позволяет исключить разгерметизацию кварцевого реактора между процессами.

Основные особенности базового технологического процесса:

- двухбарботерная газовая система;
- автоматическое управление параметрами;
- подложка с разориентацией  $(2-3)^\circ$  от  $(100)$  к  $(110)$ ;

- легирующие примеси: донорная – сера ( $SF_6 + He$ ), акцепторная – цинк;

- формирование примесного профиля в структурах n-типа осуществляется в автоматическом режиме регулированием концентрации легирующего компонента ( $SF_6$ ) в газовой фазе с помощью ретроdiffузионной ячейки, обеспечивающей изменение концентрации электронов в пленке более 5 порядков (от  $10^{13}$  до  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ );

- легирование акцепторной примесью осуществляется путем использования ячейки с цинком, встроенной в реактор, или паров металлоорганических соединений;

- основные измеряемые параметры пленок: толщина, поверхностная концентрация свободных носителей тока, профиль распределения концентрации носителей тока по толщине и их подвижность.

Жидкофазной эпитаксией изготавливают высоконадежные и высокоэффективные полупроводниковые источники излучения, светодиоды для приборов ЗЛ-107, ЗЛ-153, ЗЛ-119, ЗЛ-129 с различной длиной волны и мощностью. Разработаны одиночные и двойные гетероструктуры со сложным легированием активной области, для достижения внутреннего квантового выхода близкого к единице.

#### Роль и место ЭКБ в современной технике

Развитие технологии приборов на новых материалах происходит в высоком темпе с учетом развития технологической модернизации (рис.3) и качественным изменением военной техники (рис2).

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ПЕРИОДА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ		
1	Возрастание доли нанотехнологий	+
2	Широкое внедрение информационных технологий	++
3	Большой поток идей высокого технологического уровня	+++
4	Необходимость новых подходов к обеспечению критическими важными технологиями и материалами	+
5	Необходимость проработки новых технических и схемотехнических решения для формирования перспективных изделий электроники	++

Рис.3 Особенности формирования

ОАО «НИИПП» обладает наиболее значимым результатом, отличающим это предприятие от других отечественных фирм в области создания сложнофункциональных интегральных модулей, как в СВЧ (**субмодулей АФАР**), так и в полупроводниковой светотехнике (**матрицы светодиодные**). Предприятие изготовило и поставило значительное количество коммутационных интегральных схем на основе отечественных исходных полупроводниковых материалов. Данные схемы предназначены для создания приемопередающих модулей активной фазированной антенной решетки S и X диапазона длин волн для бортовых радиолокаторов отечественных истребителей 5-го поколения.

Активная позиция предприятия по развитию инновационного процесса существенно изменяет структуру бизнеса ОАО НИИПП в сторону полупроводниковой светотехники, МИС СВЧ и сложнофункциональным блокам на их основе, автономным источникам электроэнергии на основе солнечных элементов. Эти проекты входят в число шести инновационных проектов наиболее продвинутых предприятием.

Современные электронные элементы, как преобразователи физических величин в измеряемые сигналы определяют уровень и качество информационных и управляющих систем в авиации, энергетике, ракетно-космической и военной технике. Ранее в статьях [3] показано состояние и пути развития на период до 2015 года. Дан анализ отставания нашей страны по основным критически важным технологиям. Для предприятия специализирующегося в СВЧ микроэлектронике и оптоэлектронике важно активно участвовать в создании электронной компонентной базы (ЭКБ) для новых систем [5-10]. В НИИПП разрабатываются и выпускаются базовые элементы [2] используемые в различных системах: СВЧ полупроводниковые приборы и модули (генераторные диоды Ганна [4], диоды с барьерами Шоттки и транзисторы [1]), оптоэлектронные приборы (светодиоды ИК и видимого диапазона, цифрозночные индикаторы), светотехника [6] (светодиодные матрицы, лампы и устройства на их основе), фотоэлектрические преобразователи и солнечные батареи на их основе [9]. На рис.1 пред-

ставлена этапы развития выпускаемой продукции предприятием, в том числе сложнофункциональные устройства и медицинская электроника на вышеуказанной элементной базе.

Новым на данном этапе является необходимость создания радиоэлектронных аппаратуры (РЭА) одновременно с разработкой всех необходимых ИС, входящих в их состав. Такая постановка задачи требует владения в равной степени проектированием твердотельных ИС и одновременно проектированием РЭА в целом. Использование задела в разработке технологии GaAs схем, СВЧ и оптоэлектронных дискретных приборов и новая организационная структура позволили институту сделать в предыдущем веке прорыв в области создания РЭА. Ниже представлены методы проектирования, конструктивно - технологические подходы, и результаты создания ЭКБ и сложнофункциональных устройств (СФУ) различного диапазона длин волн, в том числе СВЧ ППМ и приборов на их основе.

#### Методы проектирования современной ЭКБ

Предприятие исторически развилось таким образом, что от дискретных приборов микроэлектроника перешла к необходимости создания систем РЭА, в том числе на кристалле. На первом этапе, а по ряду устройств и при сегодняшней разработке работу по созданию РЭА разделяют на отдельные фрагменты и поручают их выполнение группам различных специалистов. Аппаратура в целом проектировалась специалистами радиотехнического профиля, а ИС проектировались разработчиками полупроводниковых приборов. Работа над каждой конкретной ИС выливалась в отдельную работу с выполнением ее группой из всех необходимых специалистов. Такой менеджмент превращал работу по созданию РЭА, включающую в себя несколько проектируемых ИС, в сложную организационную систему - с действующими одновременно главным конструктором РЭА и разработчиками отдельных ИС. Это неизбежно приводило к естественным противоречиям между частными и общим интересом и затягивало выполнение работы в целом, но вовсе не устраня-

ло от неизбежных ошибок на всех уровнях проектирования.

Такой этап развития СВЧ микроэлектроники, встроенной в проектирование РЭА, завершался большим количеством макетных и опытных образцов ИС и модулей на их основе, которые не всегда удавалось объединить в единую, эффективно функционирующую аппаратуру. В настоящее время главный конструктор РЭА проводит сквозное проектирование, включая схемотехническое проектирование аппаратуры, топологическое проектирование всех ИС и ГИС, определяет работу над созданием вспомогательных функциональных узлов, сборкой, настройкой РЭА в целом. Метод сквозного проектирования дает возможность создания РЭА, обладающей высокими техническими параметрами и делать десятки вариантов ИС без изменения проектируемой системы. Не нужно забывать, что у электронных предприятий такая работа имеет большую технологическую глубину, чем у радиотехнических предприятий.

Именно задел по созданию ЭКБ СВЧ, ИК и видимого диапазона и сквозное проектирование ГИС, МИС и РЭА в целом позволяет войти в рынок современных радиоэлектронных систем.

#### Конструктивно-технологические принципы создания МИС

Основные особенности конструкций и технологии монолитных схем мм диапазона, предназначенных для монтажа в Е-плоскости волновода, наиболее полно описаны Божковым В.Г. [1]. Принципиальной особенностью техно-

логии и конструкции МИС подобного типа является то, что при разделении пластины на отдельные чипы - схемы, удаляется большая часть подложки вместе с n+-n-слоями. Несущей конструкцией МИС является не подложка, как в обычных МИС, а металлизация. Толщина металлизации порядка 10 мкм позволяет осуществлять монтаж схем в волновод. Малая толщина металлизации исключает необходимость создания специальной выемки в корпусе под схему. Схема закрепляется сжатием двух половин волноводного корпуса.

МИС изготавливается с выводами для подачи питания и других сигналов, которые при монтаже легко отгибаются благодаря специальной форме. В конструкции корпуса предусмотрены выемки для размещения кристаллофильтров, выходящих за пределы волноводного канала для исключения возможности закорачивания выводов на корпус.

Для модулей и устройств, предназначенных для работы в жестких условиях, предусмотрено заполнение волноводного канала диэлектриком - эпоксипенопластом с низкой (<1,5) диэлектрической проницаемостью и малыми потерями. При этом механическая прочность модулей увеличивается настолько, что они выдерживают ударные нагрузки более 20000г. СВЧ модули с заполнением выдерживают длительные испытания на влагустойчивость. С использованием этих решений разработан сверхмалогобаритный (<7см<sup>3</sup>), ударопрочный 3-канальный датчик 3 мм диапазона рис.3.

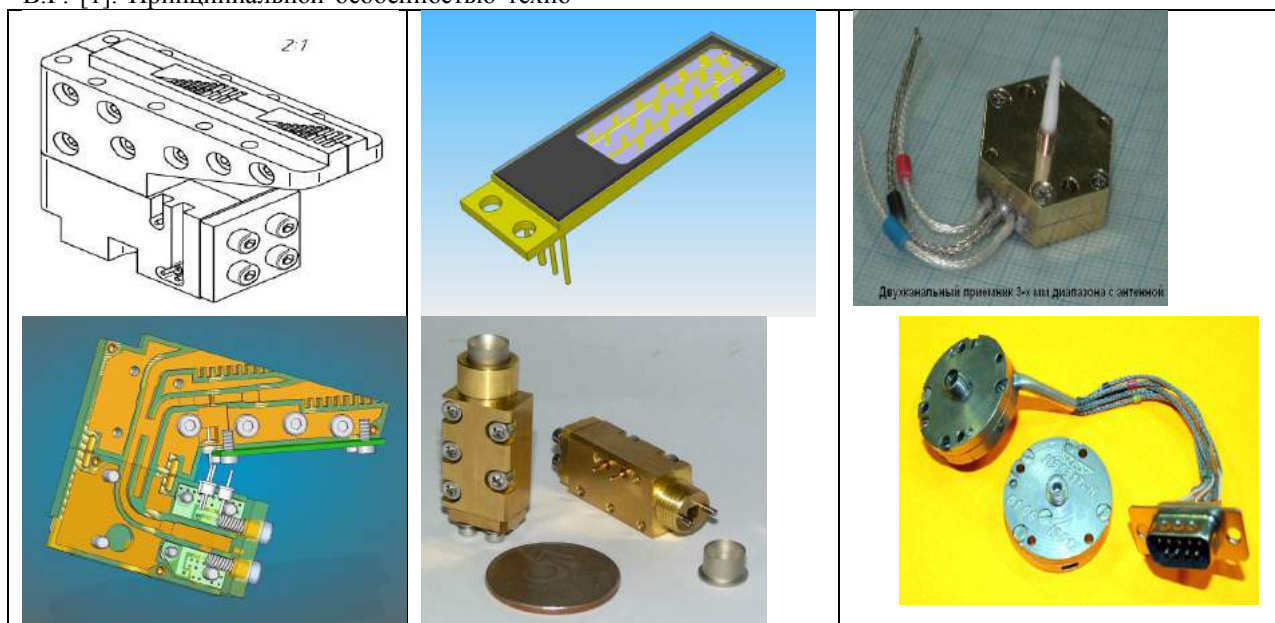


Рис. 4. Внешний вид и топология 1, 2 и 3х канального датчика цели  
Основные конструктивные особенности и технология планарных ППМ АФАР сантиметрового диапазона длин волн наиболее полно описано в отчете по НИР Зеркало и базируется на технологии низкотемпературной керамики рис.5



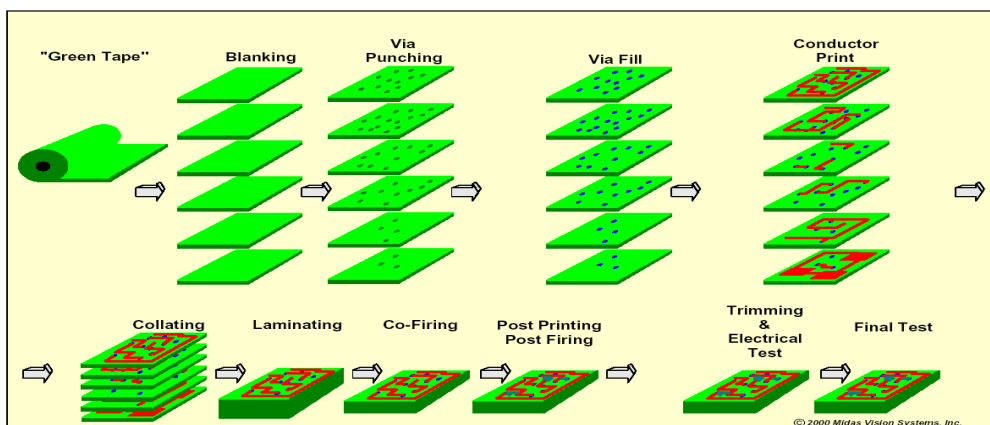


Рис.5 Технологический маршрут с использованием LTCC керамики

Технологический маршрут включает следующие основные операции: пробивка переходных и реперных отверстий, заполнение пастой переходных отверстий, трафаретная печать, выполнение отверстий и окон, пакетирование, изостатическое прессование, обжиг, разделение на подложки.

#### Системы и модули

В настоящее время в ОАО «НИИПП» обобщен накопленный опыт разработки СВЧ субмодулей для планарных АФАР и проработан новый конструктив полноценного планарного приемопередающего модуля X диапазона с выходной мощностью до 10 Вт в котором решаются все

Наивысшие технические параметры с использованием новых элементов можно получить там, где требуется обеспечивать многофункциональный и быстрый анализ обстановки. Из всех областей можно выделить три направления, где важнейшей проблемой является сверхточная сверхскоростная цифровая обработка сигналов. Это - радиолокация, космическая техника и техника телекоммуникаций.

проблемы теплоотвода, разводки силового питания, СВЧ и управляющих сигналов (рис.6,7). Общая толщина решетки АФАР с такими модулями – менее 20 мм. Удельный вес – не более 20 г/канал.

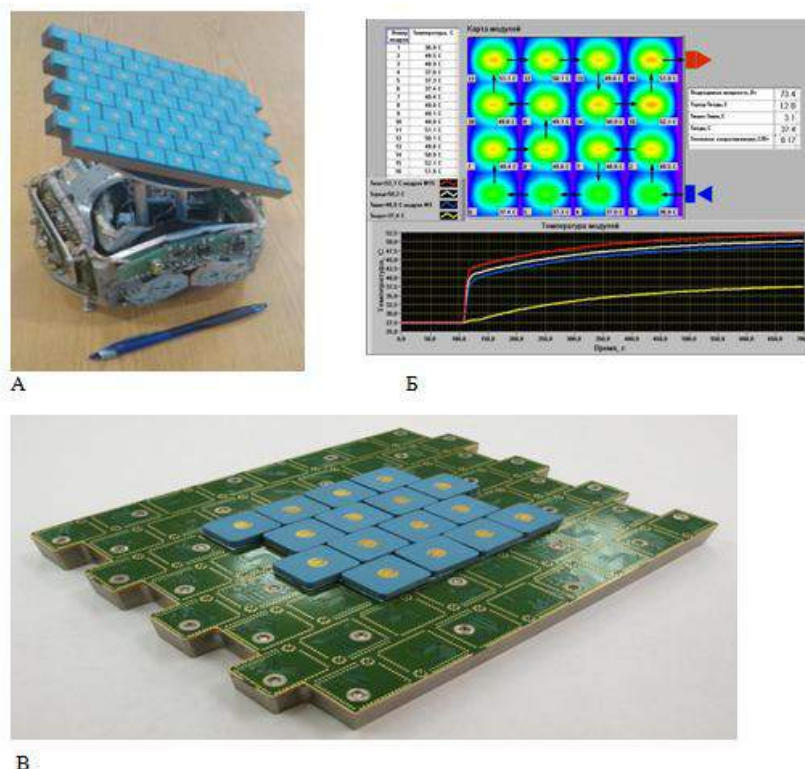


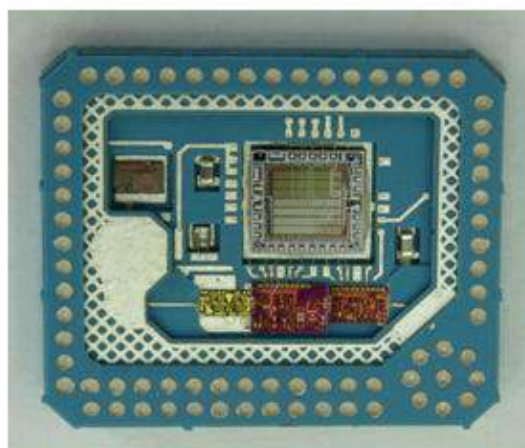
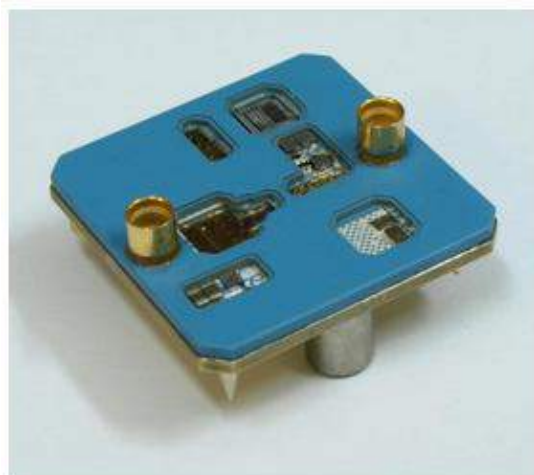
Рис.6 А - Экспериментальный образец полотна приемной АФАР на 64 модуля, Б – результаты исследования теплового макета кластера, В - установлено 16 модулей.

В радиолокации широко используются ППМ с линейно - частотно - модулированными (ЛЧМ) сигналами с очень большой частотной базой. Поэтому в составе радиолокационной техники необходимо иметь широкополосные высокочастотные тракты, позволяющие синтезировать, преобразовывать, принимать и анализировать широкополосные сигналы. Второй областью, в которой ЭКБ СВЧ определяет основные тактико-технические характеристики, является аппаратура радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Ее задачей является быстрое обнаруже-

ние, распознавание, анализ радиочастотных сигналов.

В настоящее время в ОАО «НИИПП» обобщен накопленный опыт разработки СВЧ субмодулей для планарных АФАР и проработан новый конструктив полноценного планарного приемо-передающего модуля X диапазона с выходной мощностью до 10 Вт в котором решаются все проблемы теплоотвода, разводки силового питания, СВЧ и управляющих сигналов (рис.6,7). Общая толщина решетки АФАР с такими модулями – менее 20 мм. Удельный вес – не более 20 г/канал.

Рис.7 Одноканальный планарный приемный СВЧ-субмодуль X-диапазона



Производство ППМ кроме радиолокации имеет значение на отечественном рынке радиокомпонентов для систем микросотовой связи и сотового цифрового телевидения. Российский рынок в настоящее время потребляет значительное количество современных средств. В настоящее время в ОАО НИИПП развивается производство СВЧ устройств в диапазоне частот от 2 до 96 ГГц. Оценка объема поставок ППМ различных типов может вырасти до величины 80 миллиардов рублей в год.

Используемая технология GaAs ИС обеспечивает получение плотности элементов на уровне 200 000 элементов/см<sup>2</sup>. Оптимальные размеры транзистора в ИС находятся в диапазоне от 5x5 до 5x2000 мкм<sup>2</sup>. Длина затвора ПТШ в цифровых многоэлементных ИС составляет 0,8-1,2 мкм, в усилителях в пределах от 0,2 до 0,4

мкм. Ширина токоведущих дорожек доведена до 3,0 мкм, минимальный диаметр переходных отверстий в межслойной изоляции равен также 3,0 мкм. Постоянная и целенаправленная работа по уменьшению размеров кристалла ИС дает нам возможность изготавливать кристаллы GaAs ИС квантовочувствительных рентгеновских датчиков

#### **Солнечная энергетика**

Рассмотрим достижения предприятия в развитие солнечной энергетике [9]. Солнечно-ветровая электрическая станция (СВЭС) оборудована на плоской крыше административного блока НИИПП и энергии солнца и ветра определяется из показаний малогабаритной автоматической метеостанции рис.8



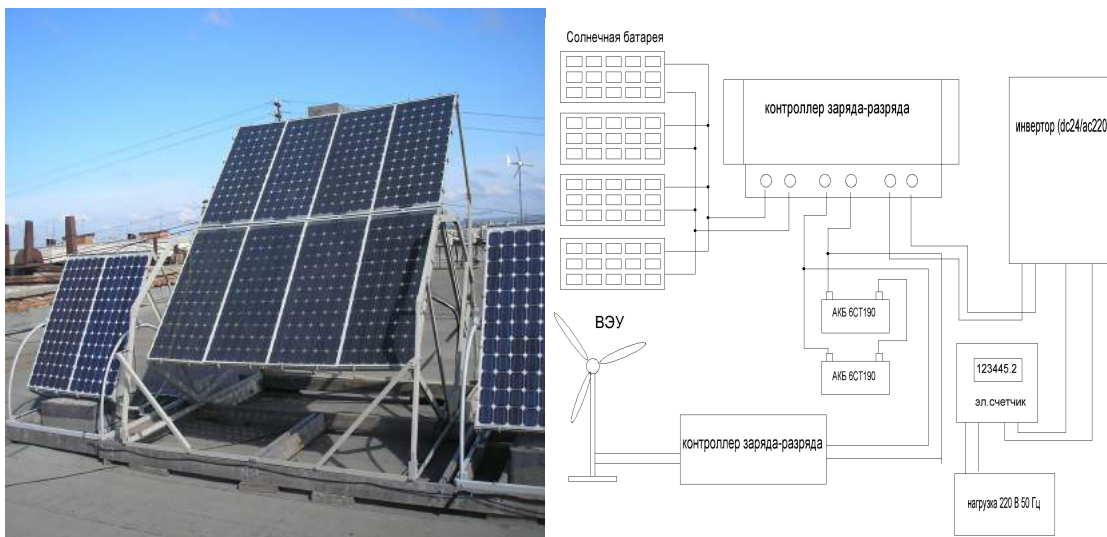


Рис. 8 Образец АИЭП (солнце + ветер)

Электростанция включает в свой состав электрогенераторы - солнечную батарею (СБ) мощностью 650 Вт (при плотности потока солнечной радиации 1000 Вт/м<sup>2</sup>) и ветроэлектрическую установку (ВЭУ) мощностью 200 Вт (при скорости ветра 8 м/с). На рис 1 представлена принципиальная схема СВЭС. Максимально допустимая мощность нагрузки данной электростанции составляет 1 кВт. Суточная выработка электроэнергии зависит от скорости и продолжительности ветра и длительности солнечного сияния и может колебаться от 5 до 10 кВт·ч/сутки.

кВт·ч/сутки. СБ составлена из 4-х параллельно включенных солнечных модулей, ориентированных по азимуту на юг. Нами было также экспериментально установлено, что для максимальной выработки электроэнергии в течении года солнечные батареи в **вертикальной** плоскости должны быть ориентированы под углом 45 - 50° к плоскости Земли, а зимой под углом 80°. В таблице 1 приведены среднемесячные значения поступающей солнечной и ветровой энергии.

Табл.1 Поступление суммарной солнечной и ветровой энергии (кВт·ч/м<sup>2</sup>)

Месяц	1	11	111	1Y	Y	Y1	Y11	Y111	1X	X	X1	X11	год
Солнце	20,3	45,4	104,5	108,3	111	115,8	217,7	110	92,3	75,2	57,7	15,8	1074
Ветер	15,3	27,8	14,7	30,9	25,5	8,3	15,1	20,4	31,6	49	61,4	55,2	355,2

Из таблицы 1 видно, что ветровой энергии за год поступило на единицу площади в 2,75 раза меньше, чем солнечной. Существенный вклад ветроэнергетическая установка вносит в зимние месяцы, когда поступление солнечной энергии минимально. В ясные дни освещенность за счет рассеяния снегом возрастает до 2-х раз по сравнению с освещением СБ только прямыми лучами. **Это означает, что в течение почти полугода сьем электроэнергии с еди-**

**ницы поверхности СБ в Сибири в 2 раза выше, чем в Европе.** Существенным положительным качеством АИЭП является их высокая заводская готовность. Если площадка для монтажа АИЭП подготовлена, то бригада из 2-3 человек может ее смонтировать за 6-8 часов

В ОАО «НИИПП» разработан модельный ряд АИЭП установленной мощностью от 20 Вт до 20 кВт (рис.9-11).



Рис.9 Солнечные фотоэлектрические батареи



Рис.10. Автономный источник электропитания на основе фотоэлектрических преобразователей АИЭП-5000



Рис.11 Гелиос 1 Автономный источник питания с солнечной батареей.  
**Полупроводниковая светотехника**

Разработка технологии и промышленное производство излучающих элементов, матриц излучающих элементов и гибридно-монокристаллических излучающих модулей на основе эпитаксиальных квантоворазмерных гетероструктур базируется на опыте разработчиков ИЭТ по созданию интегральных и гибридно-интегральных схем, выпускаемых в ОАО НИИПП [6]. Базовые технологические операции, используемые при производстве интегральных схем, полностью применимы к решению задач проекта производства светотехники (рис.12).

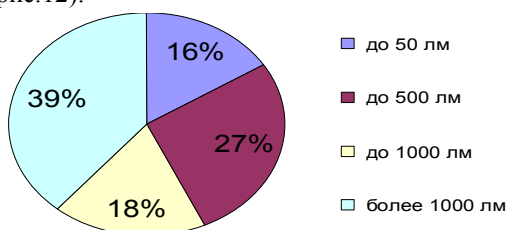


Рис 12 Объемы выпуска по проекту производства светотехники

ОАО «НИИПП» имеет технологические линии по выпуску светодиодов и светотехнических изделий. Выпуск светодиодов осуществляется на покупном материале и собственном (ИК-диапазон). Производственная линейка позволяет довести объем выпуска светодиодов до 20 млн. шт. Объем выпуска светотехнических изделий различного назначения (рис13) последние 3 года увеличивался ежегодно удваивается. Основным преимуществом выпускаемых светотехнических изделий является высокая надежность и низкое энергопотребление, что обусловлено применением в них световых модулей, изготовленных на основе светодиодных кристаллов в виде матриц

**Серийно-выпускаемые светотехнические изделия с полупроводниковыми источниками света.**



Рис13 Номенклатура светотехнических изделий

Основным преимуществом выпускаемых светотехнических изделий является высокая надежность и низкое энергопотребление, что обусловлено применением в них световых модулей, изготовленных на основе светодиодных кристаллов в виде матриц. Типовая светоизлучающая матрица (рис. 14) используется при производстве светотехнических изделий промышленных светильников.

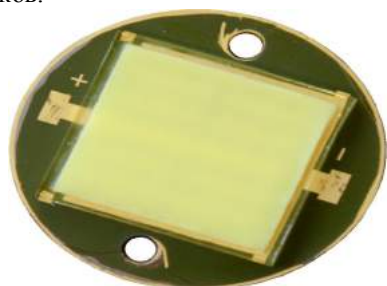


Рис14 Матрица

Для изготовления матриц используются дюралюминиевые подложки. Для обеспечения контактирования и разводки использовали металлические слои на основе меди с защитным

покрытием никеля и золота. Для создания заданной конфигурации элементов (металлизированного рисунка) используется фотолитография с последующей гравировкой металла по полю. Далее производится сборка светоизлучающей матрицы. Этот этап включает монтаж кристаллов на контактные площадки посредством токопроводящего клея и сушки. Методом термокомпрессионной сварки золотой проволокой привариваются кристаллы светодиодов и присоединяются к соответствующим шинам. После проверки электрических световых параметров матрицы приклеивается рамка для ограничения растекания люминофорного покрытия. Внутренняя область рамки заливаются люминофором композитом (порошок люминофора, разведенный в оптически прозрачном геле).

На основе светодиодных систем реализуются различные системы подсветки [10], в том числе в медицинских аппаратах видеоскопов типа «Викомед» рис.10.





Рис.15 Видеокольпоскоп «Викомед»

В результате совместной работы специалистов ОАО «НИИПП» и ООО «Диагностика +» разработан оригинальный современный прибор для кольпоскопии, отличающийся от известных аналогов следующим:

1. Совместным использованием миниатюрного кольцевого источника света с параболической линзой и цветной телевизионной камеры. Разработанный ОАО «НИИПП» миниатюрный источник света холодного свечения безопасен для пациентов в эксплуатации, а по техническим параметрам совмещен с цветными телевизионными камерами (создается равномерное освещение исследуемой поверхности органа человека, исключающее геометрические искажения, блики и ложные участки считываемого телевизионного изображения).

2. Конструктивным расположением на медицинском инструменте светодиодного кольцевого источника света и цветной телевизионной камеры в той части медицинского инструмента, которая непосредственно приближается к исследуемому органу человека. Это позволяет соблюдать условия асептики и антисептики. Кроме того, «Викомед» эффективно использует свои распознающие возможности и исключает потерю и искажение информации на этапе её передачи.

3. Структурной реализацией видеокольпоскопа, позволяющей комплектовать видеокольпоскоп «Викомед», запитанный через USB-порт, персональным компьютером или ноутбуком, подключаемым к информационной сети клиники. «Викомед», укомплектованный ноутбуком, можно использовать для диагностики заболеваний человека вне лечебного учреждения (медицина катастроф, военно-полевая медицина и т.д.). Кроме того, использование в работе ви-

деокольпоскопа сверхнизких напряжений обеспечивает высочайший уровень безопасности прибора для персонала и пациентов.

4. Программным обеспечением, обеспечивающим неискаженную запись и хранение цветных телевизионных изображений патологий органов человека, а также информации о пациенте, защищенной специальной системой ограничения доступа.

5. Наличием специализированного диагностического программного модуля на основе расчёта текстурных характеристик, векторов смещений элементарных участков и фрактальных размерностей поверхности органов человека, позволяющим в автоматизированном режиме, реальном времени и с высокой вероятностью обнаруживать наличие заболевания на исследуемом участке изображения.

#### Выводы

Информационно-аналитический анализ показывает, что стратегическими целями технологической модернизации являются:

развитие электронной компонентной базы широкого частотного диапазона длин волн, обеспечивающей потребности корпорации и отраслей промышленности в изделиях, необходимых для модернизации и обновления продукции оборонных отраслей промышленности, транспорта, связи, бытовой радиоэлектроники, медицинской техники, телекоммуникационной и навигационной аппаратуры;

обеспечение экономической независимости от зарубежных поставок материалов и кристаллов для полупроводниковой светотехники;

создание развития электронных систем ближней локации миллиметрового диапазона длин волн в области систем вооружений и транспорта.

Для достижения целей будет решен комплекс научно-технических, экономических,

производственных, организационных и других задач:

**в научно-технической области** – технологическая модернизация по приоритетным направлениям СВЧ и оптоэлектроники на основе существующего технологического базиса;

организация работ направленных на создание и развертывание перспективных фундаментальных и поисковых работ, в том числе новых материалов и нанотехнологий;

создание Дизайн центра проектирования функционально сложных конкурентоспособных электронных СВЧ компонентов на уровне субмодулей, ориентированных на топологические нормы 0,5; 0,25; 0,18 мкм;

создание Центра проектирования светотехнических полупроводниковых изделий на кооперации с ВУЗми, что обеспечит эффективную ценовую и техническую политику.

**в экономической области** - обеспечение достижения рентабельности капитальных вложений на уровне не ниже 200%;

**в области промышленного производства** - увеличение объема выпуска конкурентоспособных электронных изделий в 5 – 10 раз

– строительство завода полупроводниковой светотехники на передовых базовых производственных технологиях;

- освоение выпуска субмодулей АФАР на базе технологий низкотемпературной керамики и модулей ближней локации миллиметрового диапазона длин волн.

**в социальной области** - и увеличения зарплаты более, чем 2 раза, подготовка и вовлечение в сферу научно-технической и производственной деятельности отрасли широкого круга ученых и специалистов институтов Академии наук и ВУЗов страны, а также молодых специалистов, создание дополнительных рабочих мест.

Реализация модернизации состоит из двух взаимосвязанных этапов,

**Первый этап (2009 – 2012 годы)** – мониторинг состояния и разработка методологии проектирования и производства современной элементной базы. Разработка информационной базы библиотечных элементов, макроблоков, системных блоков. Модернизация существующего технологического базиса, прежде всего материаловедения и изготовления кристаллов и матриц.

**Второй этап (2013-2015 годы)** – поэтапное переоснащение всего существующего технологического базиса, развитие производственной базы (объем выпуска 5 миллиард руб.) новой перспективной электронной компонентной ба-

зы, отвечающей современному мировому уровню, разработка конкурентоспособных изделий мирового уровня бытовой и специальной техники.

#### Литература

1. Божков В.Г., Генеберг В.А., Куркан К.И., Перфильев В.И. Монолитные и квазимонолитные модули и устройства миллиметрового диапазона длин волн. Электронная промышленность. 2001г, №5, стр. 77-97.
2. Сайт [www.niipp.ru](http://www.niipp.ru)
3. Яук Э.Ф., Пономарев А.А. Арсенидгаллиевая технология и разработки изделий электронной техники на ее основе. Материалы 8-ой отраслевой научно-технической конференции «Радиоэлектронные технологии: состояние и перспективы развития» Воронеж. 17-19 сентября 2009 г. Стр.35-40.
4. Берест В.Н., Лукаш В.С., Шаповал Л.Г., Юрченко В.И., Юрченко Н.М.. Диоды Ганна. Электронная промышленность №2-3, 2002 г., стр.90-92.
5. Пономарев А.А, Юрченко В.И., Яук Э.Ф. Возможности использования и перспективы развития СВЧ датчиков в ОАО НИИПП Материалы конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» 25-26 февраля 2010 г. г Томск. Стр. 21-25.
6. Бакин Н.Н., Гончаров А.В. и др. Современный подход к освещению. Полупроводниковая светотехника. №5, 2010, стр. 58-59.
7. Пономарев А.А., Юрченко В.И., Юрченко А.В. Научные направления в ФГУП НИИПП по развитию материалов  $A^3B^5$  и изделий на их основе. Восьмая Российская конференция «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы 3-5» GaAs-2002, Материалы конференции, Томск1-4 октября 2002 года, стр.41-43.
8. История становления и развития ОАО НИИПП. Под общей редакцией Романовой И.Д. Томск. 2010 г. 350 стр.
9. Саврасов В.Ф., Юрченко А.В., Юрченко В.И. Информационно-аналитические аспекты использования солнечной энергии. Материалы 1 научно-практической конференции Информационно-измерительная техника и технологии Томск, 25-26 февраля 2010 г. стр.64-70
10. Буреев А.Ш., Д.С. Жданов, В.И. Сырямкин, В.И. Юрченко Современные технологии в медицинских приборах для визуализирующей диагностики Полупроводниковая светотехника №3, 2011 г. С.10-11.

## ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНЫХ АВТОДИННЫХ КВЧ АНТЕНН ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ

*Трубачев А.А., Юрченко В.И.*

ОАО НИИ Полупроводниковых Приборов, г. Томск

E-mail: *yur\_med@mail.ru*

Системы ближней радиолокации (СБРЛ), работающие в диапазоне малых дальностей (от сантиметра до одного метра), находят широкое применение как в военных, так и в гражданских системах, например системах охранной сигнализации и кодированного пропуска, устройствах сближения и стыковки, в том числе для создания интеллектуальных систем безопасности на транспорте [1 — 4, 6, 7]. В последние годы уверенный рост интереса к таким системам связан не только с развитием принципов построения и новых схемотехнических решений таких систем, но и с развитием микроэлектронных миллиметровых устройств, вплоть до комбинирования микроэлектронного приемо-передатчика со специфическими *patch*-антеннами, а также существенным снижением стоимости СВЧ узлов таких систем. Успехи на пути разработки и активного использования таких систем лежат на пути грамотного использования последних результатов и объединения усилий специалистов локационных радиотехников, ориентированных на разработку СБРЛ, и специалистов по микроэлектронным технологиям устройств миллиметрового диапазона.

СБРЛ - специфические радиолокационные устройства, отличительными особенностями которых являются соизмеримость дальности действия с геометрическими размерами взаимодействующих объектов и требование предельной компактности устройства. Это приводит в большинстве случаев к совмещению функций формирования диаграммы зондирующего и обработки отраженного сигналов в одном устройстве - специфической автоколебательной системе (АКС) – автодине рис. 1.

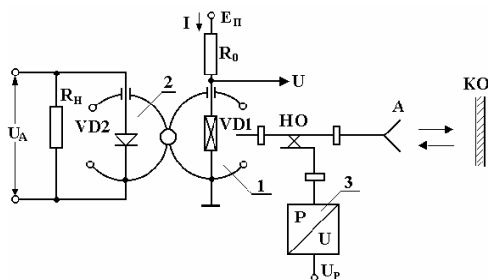
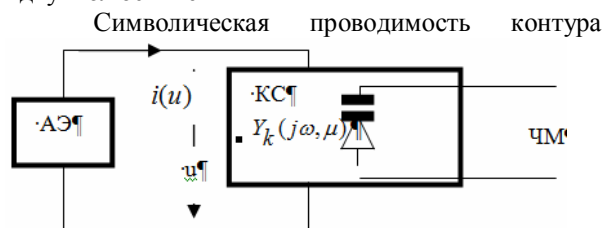


Рис. 1 Функциональная схема автодина на диоде Ганна с регистрацией сигналов в цепи автосмещения ( $U$ ), по изменению амплитуды колебаний ( $U_A$ ) и выходной мощности ( $U_P$ ).

Применение в автодинных локаторах ЧМ существенно улучшает характеристики автодинов. В частности, удается измерять расстояние до объекта при очень низких скоростях и даже при неподвижном объекте, когда доплеровский эффект

отсутствует. Анализ автоколебательных систем (АКС) посвящено громадное количество научных и технических исследований: начиная от классиков и кончая современными учеными [1,5,8.]. Воторопин С.Д [5] приводит результаты применения общей методики анализа стационарных и переходных процессов для автодинов СБРЛ с частотной модуляцией колебаний, основанной на методе символических укороченных уравнений, распространенном на динамические системы с переменными во времени параметрами. При анализе ЧМ АКС используются следующие допущения, выполняющиеся в большинстве практических случаев [1,4]: колебательная система является высокочастотной, что позволяет использовать метод медленно-меняющихся амплитуд и инерционные свойства активного элемента не меняются в полосе пропускания колебательной системы. Привлекательность математической модели АКС с переменными во времени параметрами, поскольку он позволяет использовать классический аппарат теории нелинейных колебаний, оперируя с привычными для инженера комплексными амплитудами. На рис. 2 показаны двухполюсный активный элемент (АЭ) и колебательная система (КС) с управляемым частоты.

Рис. 2 Эквивалентная схема ЧМ автодина на двухполюснике



$Y_k(j\omega, \mu)$  зависит не только от оператора дифференцирования  $j\omega$ , но и от модулируемого параметра (или совокупности параметров)  $\mu$  и является, как в обычных цепях, отношением полиномов:

$$Y_k(j\omega, \mu) = R(j\omega, \mu) / Q(j\omega, \mu).$$

Полное дифференциальное уравнение ЧМ-генератора имеет вид:  $R(j\omega, \mu)u(t) = Q(j\omega, \mu)i(t)$  и преобразуется в явное дифференциальное уравнение после замены  $j\omega \rightarrow d/dt$ :

Радиолокационные КВЧ датчики имеют небольшие размеры и могут монтироваться за стеклом или передней панелью автомобиля. К их

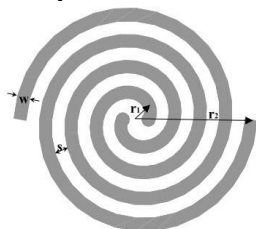


недостаткам относится плохое угловое разрешение.

Для обеспечения требуемого разрешения фазовые шумы датчиков должны быть не хуже - 80 дБ/Гц при отстройке 100 кГц. В настоящее время в прототипе используются генераторы на GaAs-диодах Ганна с волноводными резонаторами [5] и антеннами. Поскольку точность измерения при использовании непрерывного ЧМ-сигнала определяется линейностью характеристики датчика, то в его состав включают линеаризатор, благодаря которому отклонение от идеальной линейной характеристики не превышает 0,3 %. В цифровом процессоре обработки сигналов использован прибор с быстрым 1024-точечным преобразованием Фурье и тактовой частотой 1 МГц. Это обеспечивает точность измерения расстояний ±0,25 м.

Проанализировав известные решения, можно сделать вывод о том, что все элементы можно разместить на одном микрополосковом узле включая антенну. В исследование антенн для автодинного датчика диапазона КВЧ были включены: двухплечевая спиральная антенна, биконический диполь и четырехэлементная линейная антенная решетка с излучателями резонаторного типа. Ниже приведен расчет и результаты моделирования антенн в ПО CST Microwave Studio.

**Спиральная антенна**



**Рис. 3.** Геометрия спиральной антенны

Каждая спираль Архимеда линейно пропорциональна углу  $\phi$ , из этого следует выражение:

$$r = r_0\phi + r_1 \text{ и } r = r_0(\phi - \pi) + r_1$$

где  $r_1$  – внутренний радиус спирали.

Постоянная пропорциональности устанавливается значениями ширины каждого плеча  $w$  и расстояния между ними  $s$ , которые для самодополняющей структуры равны:

$$r_0 = \frac{s + w}{\pi} = \frac{2w}{\pi}$$

Ширина плеча может быть вычислена из:

$$s = \frac{r_2 - r_1}{2N} - w = w$$

При условии самодополнительности:

$$s = w = \frac{r_2 - r_1}{4N} = 0,025 \text{ мм}$$

где  $r_2$  – внешний радиус спирали;

$N$  – количество витков, равно 4.

Нижняя граничная частота излучения:

$$r_2 = \frac{c}{2\pi f_{low}} = \frac{3 \cdot 10^8}{6,28 \cdot 40 \cdot 10^9} = 1,2 \text{ мм}$$

Верхняя граничная частота излучения:

$$r_1 = \frac{c}{2\pi f_{high}} = \frac{3 \cdot 10^8}{6,28 \cdot 60 \cdot 10^9} = 0,8 \text{ мм}$$

Теперь можно вычислить:

$$r_1 = \frac{r_2}{4N + 1} = \frac{1,2}{4N + 1} = 0,08 \text{ мм}$$

Обязательным условием является равенство:

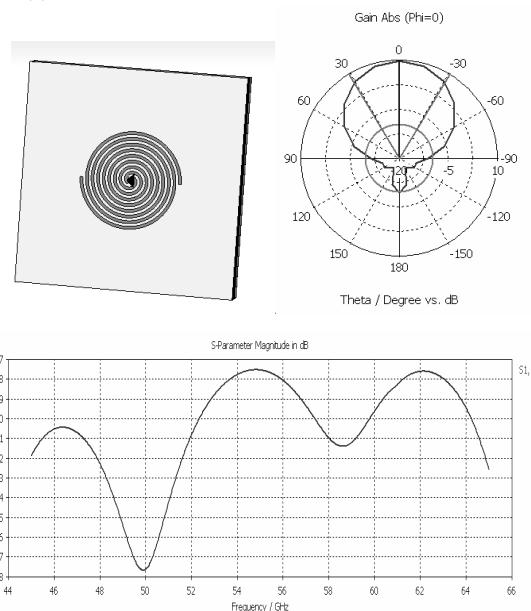
$$r_1 = w = s = 0,08 \text{ мм}$$

Толщину подложки выберем из условия существования в полосковой структуре волны типа Т [12]:

$$h < \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{6[\text{мм}]}{4\sqrt{3,78}} = 0,7 \text{ мм}$$

Толщина проводника  $t = 10$  мкм.

На рис. 4 представлены результаты моделирования данной антенны в ПО CST Microwave Studio.



**Рис.4.** Модель антенны, диаграмма направленности в Е-плоскости, зависимость  $S_{11}$  от частоты. Чем меньше ширина диаграммы направленности антенны, тем меньше пятно засветки и, соответственно, разрешающая способность.

$$D = 2tg(\Theta_1)R,$$

где  $D$  – пятно засвета на данной дистанции;  $R$  – расстояние, м;

$$\Theta_1 = \Theta/2,$$

где  $\Theta$  – ширина диаграммы направленности антенны.

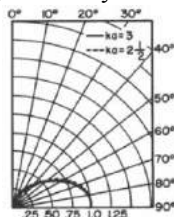
**Биконический модуль**

Эта антенна представляет из себя два треугольника, обращенные друг к другу вершинами и возбуждаемые в центре между ними. Что в свою очередь является симметричным вибратором, которые часто используются в миллиметровом диапазоне[15].



**Рис.5.** Геометрия биконического модуля

Предварительный расчет геометрических параметров взят из [12]. Принято брать угол  $2\theta = 60^\circ$ . Тогда выберем из перечня графиков диаграмм направленности для этого угла следующий:



**Рис.6.** Теоретическая диаграмма направленности антенны из [12]

Где  $k = 2\pi/l$ ,

$a = l$  – длина плеча.

Тогда вычислим  $l$ :

$$l = 3\lambda/2\pi = 2,86 \text{ мм.}$$

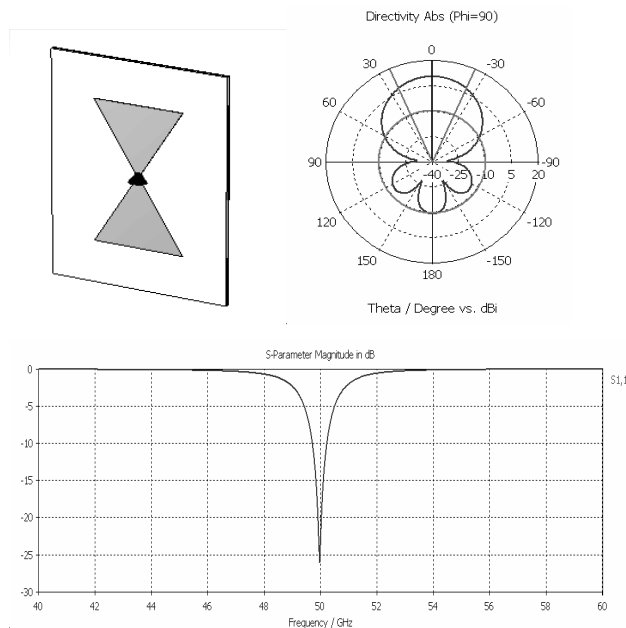
Толщина подложки:

$$h = 0.2 \text{ мм}$$

Толщина проводника:

$$t = 10 \text{ мкм}$$

Теперь введем полученные результаты в модель и посмотрим полученные характеристики в CST Microwave Studio.



**Рис.7.** Модель антенны, диаграмма направленности в E- и H-плоскостях, зависимость  $S_{11}$  от частоты

Ширина диаграммы направленности биконической антенны несколько уже спиральной и составляет  $47^\circ$ . Но, как говорилось ранее, это не является достаточным для поставленной задачи. Поэтому был продолжен расчет необходимой топологии печатной антенны с излучателями резонаторного типа[12].

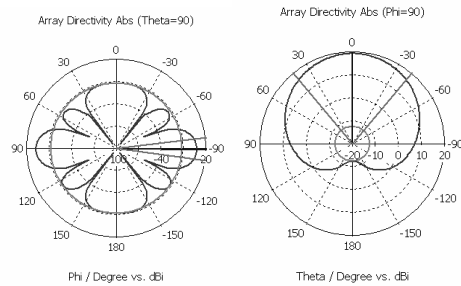
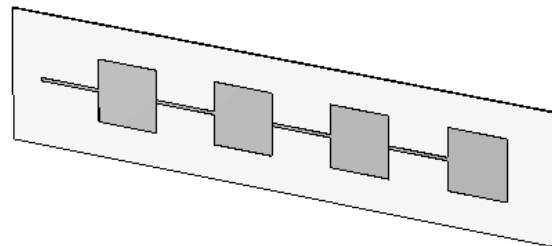
**Линейная антенная решетка с излучателями резонаторного типа.**

На рис. 8 показана простейшая печатная антенная решетка из излучателей резонаторного типа. Четырех элементная антенная решетка имеет коэффициент усиления около 13,5 дБ. Ширина диаграммы направленности в E- и H-плоскостях 20 и  $68^\circ$  соответственно.

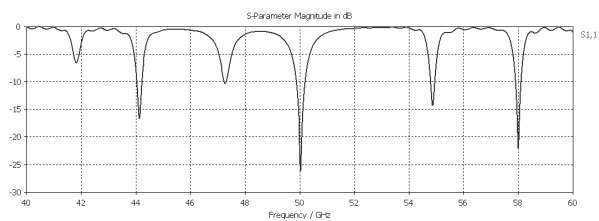
Материалом для подложки был выбран полиэтилен с  $\epsilon=2,3$ .

$$\text{Тогда } \Lambda = \lambda/\sqrt{\epsilon} = 6/\sqrt{2,3} = 3,95 \text{ мм}$$

На рис.9-11 представлены результаты моделирования



**Рис.9.** Модель антенны, диаграмма направленности в E- и H-плоскостях



**Рис.10.** Зависимость  $S_{11}$  от частоты

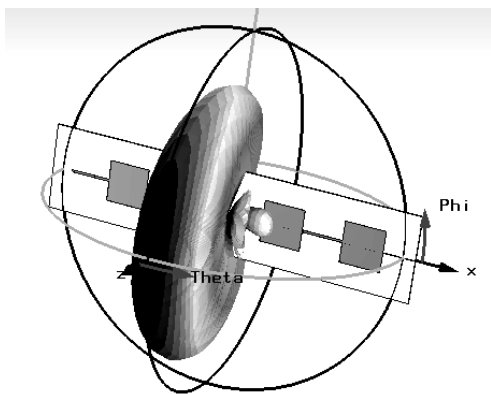


Рис.11. – Объемная диаграмма направленности антенны

Все результаты были проведены для частоты 50 ГГц и в обобщенном виде представлены в таблице 1, а на рис 12 показано размещение диода Ганна в печатном узле.

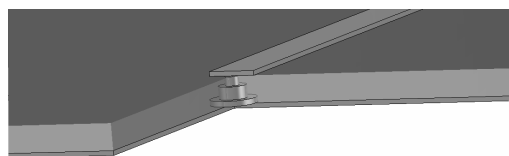
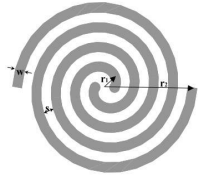
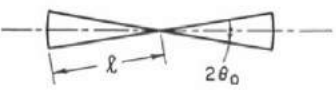
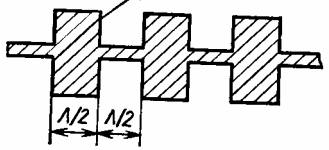


Рис.12. Объемное изображение модели антенны с ДГ

Таблица 1.

№	Тип антенны	Вид	Угол	КСВ на частоте сигнала	Габариты
1.	Спираль		61,8°	1,3	4x4 мм
2.	Биконический модуль		47,2°	1,1	6,7x7,8 мм
3.	Линейная решетка		15°	1,1	17x4 мм

Привлекательность печатных технологий [13] для изготовления электроники связана главным образом с возможностью подготовить послойные микроструктурированные заготовки (и тем самым изготовить тонкопленочные устройства) гораздо более простым и экономически эффективным способом по сравнению с обычной электроникой. Кроме того, играет также роль возможность реализации новых или более совершенных функциональных возможностей (например, механическая гибкость). Выбор используемых печатных методов определяется требованиями, касающимися печатных слоёв, свойствами печатных материалов, а также экономическими и техническими соображениями

Струйные устройства печати являются гибким, универсальным оборудованием, которое можно перенастроить с относительно низкими усилиями. Видимо, поэтому они используются наиболее часто. Однако, струйные принтеры имеют производительность (порядка 100

м<sup>2</sup>/ч) и низкое разрешение (ок. 50 мкм). Они хорошо подходят для материалов с низкой вязкостью и хорошей растворимостью, таких как органические полупроводники. Для материалов с высокой вязкостью, таких как органические диэлектрики или дисперсные частицы типа неорганических металлических красок, возникают проблемы с засорением форсунок. Поскольку чернила хранятся в виде капелек, толщину слоя и дисперсную неоднородность можно снизить. Одновременное использование нескольких форсунок и предварительное структурирование подложки позволяют повысить производительность и разрешение, соответственно. Однако, в последнем случае приходится фактически использовать технологические шаги с непечатными методами. Печатные проводники обладают более низкой проводимостью и подвижностью носителей заряда. За некоторыми исключениями, материалы неорганических чернил являются дисперсией металлических микро- и нано-частиц

### Выводы

1. Максимальный коэффициент усиления (18,84 dB) имеет печатная антенная решетка. Минимальная ширина диаграммы направленности ( $15^\circ$ ) наблюдается у печатной антенной решетки. Минимальный коэффициент отражения ( $S_{11} = -26$  дБ) получен у биконического диполя и печатной решетки, но у решетки, в отличие от диполя, на частотной характеристике присутствуют побочные минимумы на других частотах.
2. Антенны могут быть изготовлены струйной печатью наноматериалов.
3. При всех положительных характеристиках антенной решетки, в ее диаграмме направленности присутствуют боковые лепестки, значение которых составляет -15 дБ, отклонение от главного лепестка  $30^\circ$ .

### Литература

1. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Успехи современной радиоэлектроники. – М. 2006, № 12, С.3-3
2. Воторопин С. Д., Юрченко В. И. Автодины на диодах Ганна и устройства на их основе // Электронная промышленность. – 1998. – вып. 1-2. – С. 110-115.
3. Бузыкин В.Т., Носков В.Я. Автодины. Области применения и перспективы развития // Радиотехнические системы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн. - Харьков: институт радиофизики и электроники АН Украины. - 1991. - С.38-47.
4. Юрченко В.И., Воторопин С.Д. Автодинные датчики КВЧ диапазона для создания систем безопасности железнодорожного транспорта. III Международный конгресс “Военная техника и конверсионные технологии” Омск, 2005. С. 259-260.
5. Воторопин С.Д., Носков В.Я. Сигналы автодинов КВЧ - диапазона длин волн при контроле параметров подвижных объектов // Известия вузов. Физика. - 2000. - Выпуск 7. - С. 54 - 60.
6. Воторопин С.Д., Егунов М.С., Пушкарёв В.П., Юрченко В.И. Радиолокационные КВЧ датчики на диодах Ганна для задач обнаружения, измерения и управления. Труды IX-ой конференции «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V», 3-5 октября 2006 г., Томск. С.92
7. Юрченко В.И., Воторопин С.Д. Автодинные датчики КВЧ диапазона для создания систем безопасности транспортных средств. IV-й Международный конгресс “Военная техника и конверсионные технологии” ВТТВ-2007, Омск. С.
8. Смольский С.М. Оптимизация автодинного режима генераторов СВЧ с учетом условий устойчивости // Труды МЭИ. –1979. – Вып.397. – С.69-73
9. Caswell E. D. 2001. Design and Analysis of Star Spiral with Application to Wideband Array with Variable Element Sizes. Doctor of Philosophy Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
10. Устройства СВЧ и антенны /Под ред. Д.И.Воскресенского, Радиотехника, 2006г, 376 с
11. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. Учеб. для радиотехнич. Спец. Вузов, Высш. Шк., 1988, 432 с Antenna Engineering Handbook Fourth Edition, Dr. John L. Volakis, 2007
12. Antenna Engineering Handbook Fourth Edition, Dr. John L. Volakis, 2007
13. Е. Коатанея, В. Кантола, Дж. Куловеси, Л. Лахти, Р. Лин, М. Заводчикова. Печатная электроника, настоящее и будущее. Университет технологии Хельсинки, Финляндия, 2009, ISBN 978-952-248-078-1

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОРПУСЕ УЛИЧНОГО СВЕТИЛЬНИКА

*Акимов Б.В., Гилева В.Н., Дениско С.В., Лукаш В.С., Сорокин В.Т., Юрченко В.И.*

ОАО НИИПП

E-mail: yur\_med@mail.ru

Одной из главных проблем светодиодных осветительных приборов (ОП), определяющих долговечность и эффективность работы светодиодов, является проблема отвода тепла от корпуса в окружающее пространство [1-3]. Традиционным способом решения проблемы является использование сильно развитой за счет ребристости поверхности корпуса-радиатора. Наибольшее количество ребер радиатора, как правило, расположено со стороны противоположной световому отверстию ОП. В идеале, такой подход обеспечивает хорошие массо-габаритные характеристики и простоту конструкции ОП. При наружном освещении (улицы, дороги) световое отверстие ОП ориентировано вниз, таким образом, ребристая поверхность корпуса-радиатора ориентирована вверх. В реальных уличных условиях эксплуатации, вероятность того, что в скором времени, межреберное пространство радиатора будет забито различным мусором: листьями, мелкими ветками, почками и семенами деревьев, насекомыми, перемешанными с липкой, несмываемой уличной пылью. Менее распространены конструкции ОП, у которых верхняя поверхность гладкая, а радиаторная часть вынесена на боковую поверхность и ребра радиа-

тора ориентированы горизонтально, что снижает возможность засорения. При такой ориентации, конвективный съем тепла с ребер радиатора, затруднен, что приводит к необходимости увеличения количества ребер и, как следствие, к увеличению массо-габаритных характеристик.

В настоящей работе была предпринята попытка расчета новой компоновки тепловой конструкции ОП для наружного освещения (рис.1). Данная конструкция должна иметь по сравнению с существующими конструкциями низкую способность к засорению (сохранению эксплуатационных характеристик) и иметь небольшой вес (возможность подвеса на тросах, сниженная материалоемкость – конечная стоимость). Очевидно, что простое объединение в конструкции вертикальных и горизонтальных ребер, не приведет к однозначному наследованию только положительных свойств. Следовательно, для максимального наследования положительных качеств и минимального наследования отрицательных, необходимо введение в конструкцию дополнительных элементов для существенного увеличения конвективного потока.

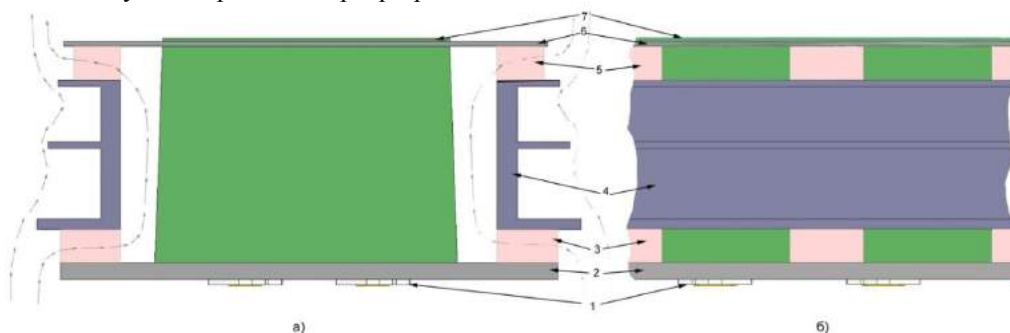


Рис.1. а) Характерное сечение предлагаемой конструкции; б) фрагмент вида сбоку. 1- светодиодная матрица, 2- основание-пластина, 3- нижняя вставка, 4- радиатор, 5-верхняя вставка, 6- крышка-пластина, 7- коробка под блок питания. Пунктирными стрелками обозначены предполагаемые воздушные конвективные

Конструкция представляет собой параллелепипед традиционных пропорций. Все детали в данной конструкции выполнены из материалов с высокой теплопроводностью, например – алюминия. Верхние и нижние вставки предназначены для:

1) образования зазора, по которому воздух проникает к тыльной стороне радиатора, коробке блока питания, основанию и крышке;

2) осуществления теплового контакта в цепочке: основание - нижняя вставка – радиатор – верхняя вставка – крышка.

Задачей для детального расчета конструкции являются определение форм поверхностей, зазоров и толщин.

Существующие инженерные методы расчета достаточно точны, но они дают усредненную картину по конструкции, т.е. не способны дать ответ о локальном перегреве конструкции (тепловой режим отдельного светодиода или светодиодной матрицы может быть превышен). При сложных конвективных потоках расчет усложняется и теряет точность. Для расчета конкретной конструкции по предлагаемой концепции было использовано приложение Flow Simulation CAD системы Solid Works. Flow Simula-

tion позволяет рассчитывать тепло-массообмен конструкции в газообразной и жидкой среде, при этом учитываются аэро-гидродинамические свойства поверхностей конструкции. Результатом расчетов являются, например, распределение температуры в любом сечении конструкции и среды, скорости и формы потоков среды (воздуха), коэффициент теплопередачи от любой поверхности конструкции в среду. Возможности Flow Simulation позволяют за некоторое количество итераций оптимизировать тепловую конструкцию ОП. Изменяя форму поверхностей, зазоры и толщины можно добиться компромиссного решения между массо-габаритными требованиями и тепловыми, при этом, не забывая о реальности конструкции.

В качестве конкретного примера для расчета был выбран ОП для наружного освещения, оснащенный 18 светодиодными матрицами Zenigata (SHARP) каждая электрической мощностью 6,2 Вт и световым потоком 500 лм. Данный пример выбран в связи с тем что, имелись аналогичные ОП выполненные с вертикальными и с горизонтальными ребрами радиаторов. Параметры светодиодных матриц определены теми технологическими запасами, которые заложены в двух других конструкциях светильника и потому несколько ниже заявляемых фирмой-изготовителем (потребляемая мощность 6.7 Вт, световой поток 540 лм).

Для расчетов были выбраны следующие данные: среда - воздух при давлении 101,3 кПа,

влажность 0%; температура окружающей среды - 20 °С; скорость ветра 0 м/с; материал конструкции - алюминий (200 Вт/м\*К); плафон - поликарбонат (1,3 Вт/м\*К), тепловые зазоры 20 мкм (2 Вт/м\*К); электрическая мощность -  $18 \cdot 6,2 = 112$  Вт; энергетический выход светодиодных матриц - 30%, т.е. тепловыделение светодиодных матриц -  $18 \cdot 6,2 \cdot 0,3 = 78$  Вт; КПД блока питания 87%. т.е. тепловыделение 15 Вт. Также было принято, что температура корпуса не должна превышать 55°С и иметь минимальные массовые характеристики. Была выбрана базовая длина корпуса, высота и ширина не ограничивались и определялись в ходе расчета.

В ходе многочисленных итераций перебирались различные варианты и параметры концептуальной конструкции: ширина и толщина основания, толщина крышки; длина, высота и расположение верхних и нижних вставок; толщина стенок коробки блока питания; количество, длина и форма ребер радиатора; высота радиатора. В задачу входил только тепловой расчет, и никаким образом не решалась задача художественного дизайна ОП. Результатом расчета стала конструкция, внешний вид которой представлен на рис.2-4. Вес рассчитанной конструкции без учета крепежа и блока питания составил 4,8 кг. Максимально достигнутая на корпусе светодиодных матриц температура составила 55,5°С.



Рис.2. Внешний вид расчетной конструкции ОП для наружного освещения.

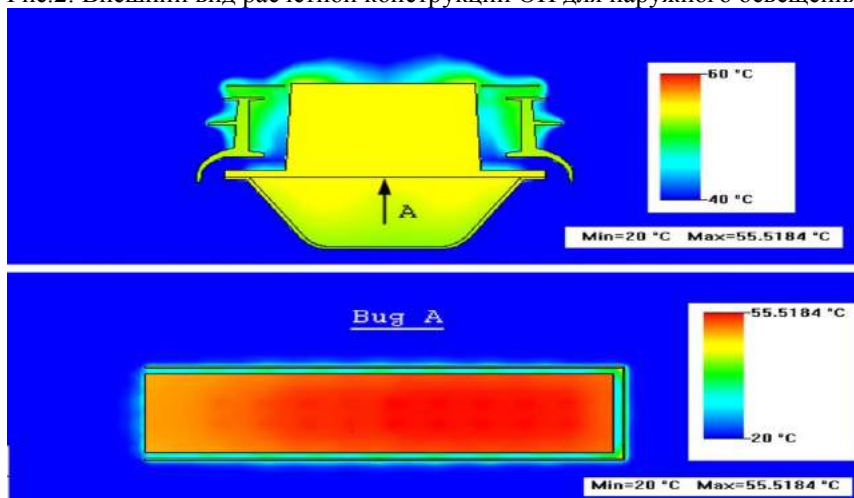


Рис.3. Расчетное распределение температур в характерном сечении ОП и на основании. Максимальная температура системы воздух - ОП равна 55,5°С.



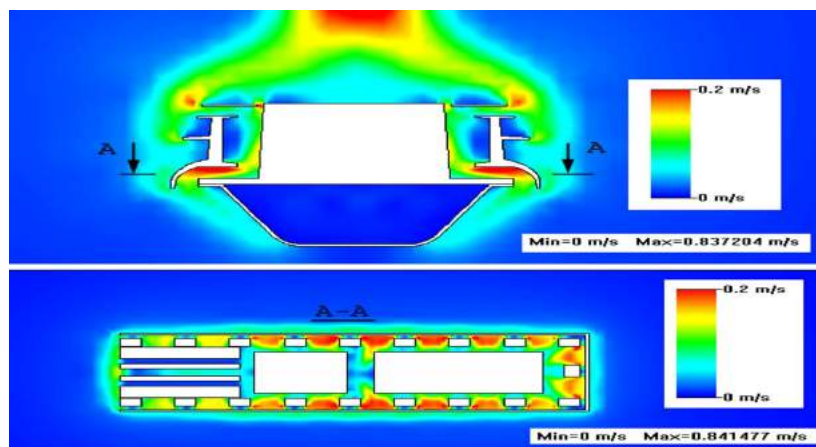


Рис.4. Расчетное распределение скорости конвективных потоков в характерном сечении ОП и в плоскости на уровне нижних вставок. Максимальная скорость - 0,83 м/с находится в конвективной струе выше ОП

В ходе расчетов подтвердились два предположения:

- увеличение количества и длины ребер далеко не всегда эффективно, с точки зрения экономии массы;
- наклон ОП к горизонту от 0 до 15 град приводит к увеличению градиента температуры, причем максимальная температура несколько возрастает.

Также было установлено, что размещение и конфигурация блока питания в коробке очень сильно влияет как на тепловой режим светодиодов, так и на собственный тепловой режим. Для выяснения оптимальных параметров блока питания проводятся дополнительные расчеты. Однако в настоящих расчетах было принято, что все тепловыделение блока питания было равномерно распределено по объему коробки.

#### Выводы

По сравнению с ребристыми радиаторами при тех же параметрах световых сборок предложенная конструкция имеет несравненные преимущества. Прежде всего, по массе корпуса ОП, которая для ребристого радиатора с распо-

ложением ребер вверх составляет 9 кг, а для корпуса с горизонтально расположенными ребрами составляет 11 кг. Вес рассмотренного корпуса светильника составляет 4.8 кг, тепловое сопротивление не превышает 0.3 К/Вт. При этом измеренные температуры на корпусе светодиодных сборок в рабочем положении ОП при внешней температуре среды, равной 20 °С, составляют 58 и 55 °С соответственно, а рассчитанные значения – 60 и 56 °С.

#### Литература

1. В.С.. Лукаш, В.И. Юрченко, Бакин Н.Н. Светотехнические изделия на основе полупроводниковых излучающих элементов. Программа Российской научной конференции “Субъекты федерации в условиях реформ” Томск, октябрь, 1994 г. С. 10.
2. Д. Николаев, А. Феопентов Основы теплового менеджмента при конструировании ПСП Полупроводниковая светотехника №1, 2010, С. 44-47
3. А.Задорожный 3D – разработка теплоотводящих систем Полупроводниковая светотехника №4, 2010, С. 38-40

## РАЗРАБОТКА КРУПНОФОРМАТНЫХ ЭКРАНОВ НА БАЗЕ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Васильев А.В., Юрченко В.И.*

ОАО НИИПП,

E-mail: *yur\_med@mail.ru*

В настоящее время технологиями экранов на основе органических материалов (OLED) занимаются несколько десятков компаний. Объёмы затрат на исследования и разработки технологий в этой сфере продолжают расти из года в год, а уровень зрелости технологии для того, чтобы конкурировать в той же ценовой категории с ЖК-дисплеями, пока не достигнут. Целью настоящего доклада является анализ возможностей технологии изготовления экрана на основе органического материала методом струйной печати.

Технология OLED (Organic Light Emitting Diode) начала своё развитие с публикации двумя учёными из исследовательской лаборатории Eastman Kodak статьи об органических люминофорах в 1987 году. Позже в 1989 году в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета были получены органические полимерные люминофоры. С этого времени начали независимо развиваться два направления OLED: SMOLED (микромолекулярное) и POLED (полимерное). Ключевые параметры,

определяющие оптические свойства OLED экранов, - это долговечность и эффективность светоотдачи. В настоящее время обе технологии достигли определённых успехов в совершенствовании этих параметров на начало 2007 года (Таблица 1).

В российской федерации исследованиями в области OLED технологий занимаются сравнительно недавно. Но уже несколько коллективов получили хорошие результаты (Таблица 2).



Рисунок 1

Таблица 1 – Сравнительные характеристики POLED и SMOLED органических экранов

Цвет	POLED		SMOLED	
	Эффективность Кд/А	Долговечность, часы (яркость 1500 Кд/м <sup>2</sup> )	Эффективность Кд/А	Долговечность, часы (яркость 1500 Кд/м <sup>2</sup> )
Красный	1-2	>20000	4-5	>40000
Зелёный	8-10	15000	8-9	>40000
Синий	4	3000	3	10000
Жёлтый	8-10	>30000	8	>30000
Белый	2-4	5000	6-8	20000

Таблица 2 – Ведущие коллективы в области OLED.

Коллектив.	Направления исследования.
Мальцев Е.И., Лыпенко Д.А. и др. (Институт электрохимии РАН, Московская государственная академия тонкой химической технологии, НИФХИ им. Л.Я. Карпова)	Разработка технологии производства новых электролюминесцентных органических материалов.
Витухновский А.Г., Бочкарев М.Н. и др. (ФИАН, Институт металлоорганических соединений, Нижний Новгород, полупроводниковая фирма «Волга»)	Органические преобразователи света и светоизлучающие диоды
Каплунов М.Г., Усов Н.Н. и др. (Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, полупроводниковая фирма «Циклон»)	Создание многослойных OLED, создан первый в России полноцветный дисплей, новые материалы, металлоорганические комплексы
Майер Г.В., Копылова Т.Н. и др. Томский государственный университет. ОАО НИИПП	Получение новых органических материалов и соединений.

В Томском государственном университете НОЦ получена генерация излучения всех основных цветов в орга-

нических соединениях различных материалов.

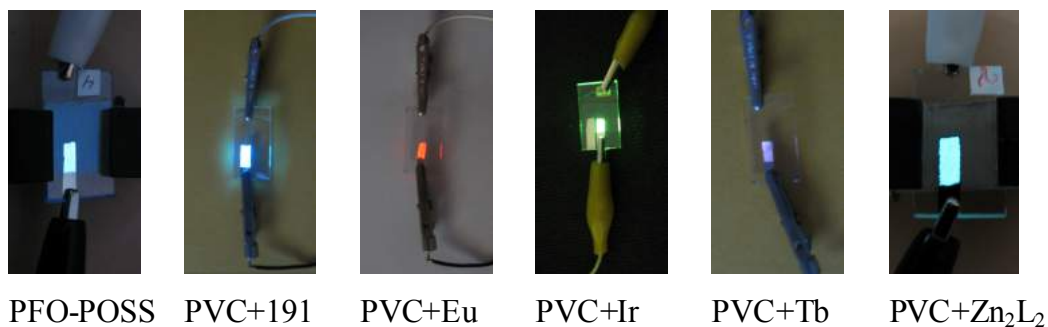


Рисунок 2 – Экспериментальные образцы OLED в ТГУ.

У органолюминофоров за люминесценцию ответственна структура индивидуальной молекулы, поэтому перевод вещества из твердокристаллического состояния в расплав или пар, либо растворение его не приводят во многих случаях к исчезновению люминесценции. К настоящему времени синтезировано много органических люминофоров и непрерывно ведется поиск новых соединений. Обсуждая вопрос о зависимости между строением и люминесценцией, обратим внимание в первую очередь на структурные фрагменты молекул, способствующие появлению люминесценции, повышению ее интенсивности, и параллельно рассмотрим на простых примерах влияние этих группировок на цвет свечения. К факторам, благоприятствующим появлению люминесценции и смещению ее в длинноволновую область спектра, следует, прежде всего, отнести развитую систему сопряженных связей.

Таблица 3 - Флуоресцентные характеристики растворов диарилзамещенных оксазола в толуоле

	, нм	$\eta$
2,5-дифенилоксазол	365	0,5
2-(4-бифенилил)-5-фенилоксазол	390	0,6
2,5-ди-(4бифенилил) оксазол	410	0,7

Из таблицы 3 видно, что появление дополнительного ароматического ядра на конце цепи сопряженных связей приводит к значительному смещению максимумов люминесценции в длинноволновую область спектра. С удлинением цепи сопряжения повышается интенсивность свечения.

Следует заметить, что квантовый выход с ростом цепи сопряжения увеличивается не всегда. По мере усложнения структуры молекул, особенно у соединений цепочечного строения, растут безызлучательные потери энергии, связанные с внутримолекулярными вращениями и колебаниями, что оказывает отрицательное влияние на интенсивность свечения. Поэтому при некоторой длине цепи, неодинаковой в разных рядах соединений, квантовый выход перестает увеличиваться и может даже уменьшаться, часто при наблюдаемом длинноволновом смещении спектров

поглощения и флуоресценции. Для появления люминесценции необходимо наряду с протяженными цепями сопряженных связей наличие других структурных факторов, прежде всего, достаточно жесткой структуры, уменьшающей безызлучательные потери поглощенной энергии и увеличивающей вероятность радиационных переходов. Такая жесткая структура может быть получена в результате образования новых циклов и/или внутримолекулярных водородных связей.

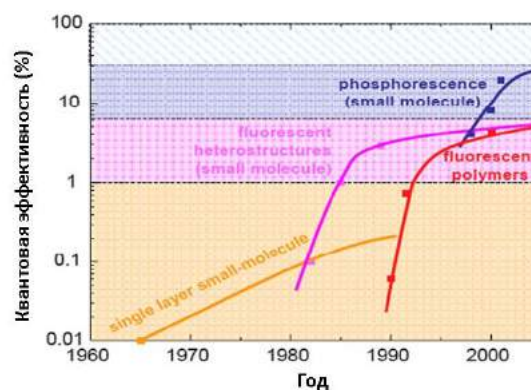


Рисунок 3 – Повышение эффективности OLED технологий

Большое влияние на цвет и яркость свечения оказывают заместители в ароматических и гетероциклических фрагментах. Как известно, электронодонорные и электроноакцепторные заместители, включенные в цепь сопряжения, создают некоторое постоянное смещение электронов, не зависящее от действия света. Вследствие этого уменьшается разность уровней энергии между основным и возбужденным состоянием и соответственно происходит сдвиг поглощения и флуоресценции в сторону длинных волн. Еще больший эффект достигается при согласованном действии электронодонорного и электроноакцепторного заместителей. Сдвиг флуоресценции в длинноволновую область часто сопровождается увеличением квантового выхода.

При введении диметиламиногруппы максимум флуоресценции толуольного раствора смещается батофлорно на 35 нм, а квантовый выход возрастает от 0,5 до 0,6. Диформетилсульфонильная группа смещает максимум флуоресцен-

ции в длинноволновую область на 40 нм и повышает квантовый выход до 0,8. В молекулах менее симметрично построенных соединений с неравномерным распределением электронной плотности влияние заместителей на цвет и интенсивность свечения в большой мере зависит от их положения. Особый интерес как заместитель представляет нитрогруппа, которую принято считать тушителем люминесценции. Действительно, ароматические углеводороды и их гетероциклические аналоги со сравнительно короткими цепями сопряжения при введении нитрогруппы теряют люминесцентные свойства. В то же время известно много интенсивно светящихся веществ, содержащих нитрогруппу. Обычно это люминофоры желто-зеленого и более длинноволнового свечения. Иногда тушащий эффект наблюдается при введении галогенов, причем повышение по-

рядкового номера галогена уменьшает интенсивность свечения. В то же время известно немало примеров, когда галогены повышают интенсивность (яркость) свечения.

Использование органических материалов в качестве люминесцирующего вещества в OLED с одной стороны позволяет добиться требуемых характеристик (цвет, контрастность и т.д.), снизить себестоимость светодиодов при серийном производстве, с другой стороны предъявляет повышенные требования к защите этих материалов от воздействия окружающей среды.

В настоящее время в целях раскрытия потенциала OLED технологии разработана группа разновидностей, каждая из которых предоставляет оригинальные преимущества.

Таблица 4 - Разновидности OLED технологий

Название технологии	Описание
SMOLED	Органические светодиоды на малых молекулах. Стартовая технология была разработана для придания свойства излучения света некоторым органическим веществам. В своё время она являлась основой большинства коммерческой продукции, но её недостатком является сложность и высокая стоимость производственных методов (например, вакуумного осаждения).
POLED/LEP/LEP-OLED/P-OLED/PLED/P-LED/P-Light/PolyLED	Полимерные органические светоизлучающие диоды. Бурно развивающаяся в настоящее время технология. Данная технология разработана после SMOLED.
TOLED	Прозрачные органические светодиоды. При производстве TOLED используются прозрачные контакты с целью создания экрана, который поддерживает различные варианты распространения света: только через анод, только через катод, через оба электрода.
SOLED	Сложенные органические светодиоды. При производстве SOLED используется новая архитектура организации пикселя, разработанная корпорацией Universal Display. Её отличительной её особенностью является расположение RGB подпикселей друг над другом, а не рядом друг с другом, что улучшает разрешающую способность экрана в три раза и повышает качество цветопередачи

Основное достоинство POLED заключается в применении более доступных простых и дешёвых технологий для их производства. Одна из самых привлекательных технологий нанесения слоя органического материала на подложку является технология струйной печати, разработанная компаниями Seiko Epson и CDT.

В настоящее время применяется три способа реализации цветных OLED:

1. Схема с отдельными цветными эмиттерами.
2. Схема с одинаковыми белыми эмиттерами и цветными фильтрами.
3. Схема с конверсией излучения.

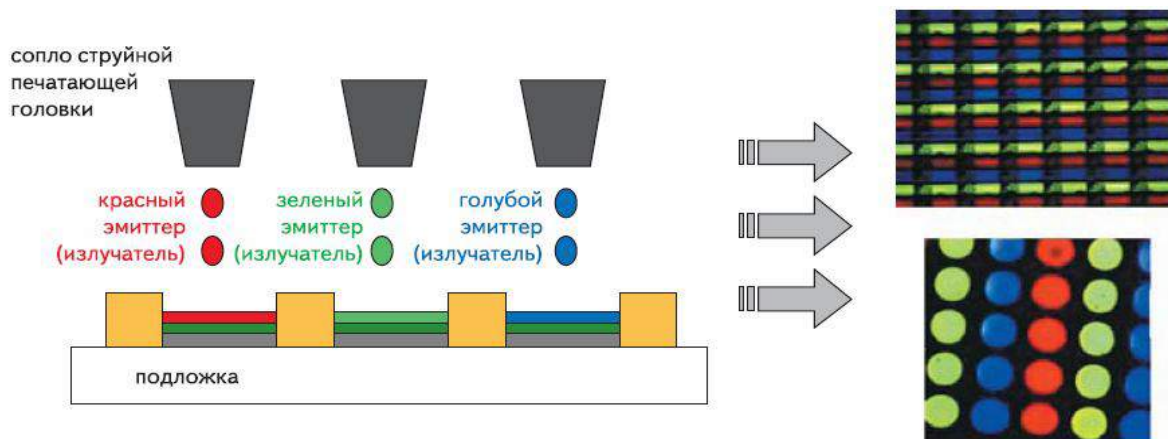


Рисунок 4 – Технология струйной печати органического материала на подложку

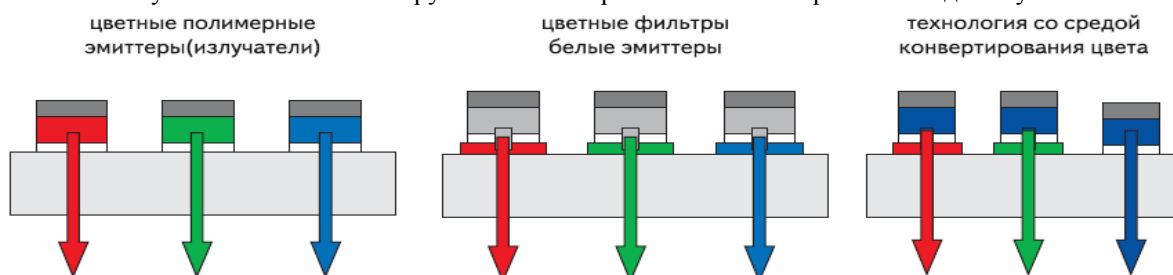


Рисунок 5 – Варианты формирования структур OLED

Самый первый вариант (с отдельными эмиттерами) – самый эффективный с позиции использования энергии, но он реализуется с определёнными технологическими трудностями. Второй вариант – наиболее простой в части создания одинаковых белых эмиттеров для всех компонент RGB матрицы. Однако, эффективность использования энергии в этом случае гораздо ниже, чем в первом. В третьем варианте применяются голубые эмиттеры и люминесцентные материалы для конверсии излучения из голубого в более длинноволновое.

#### Некоторые характеристики OLED экранов в сравнении с LCD:

- Максимальный угол обзора достигает  $160^\circ$ . В настоящее время угол обзора у TFT экранов колеблется в пределах  $140-170^\circ$
- Быстродействие 10-100 мкс. В разы больше, чем у LCD экранов
- Малая толщина модуля экрана. В настоящее время лишь малоформатные TFT экраны имеют аналогичную толщину.
- Малое потребление. В полной мере реализовать своё преимущество по данному параметру не удастся, т.к. в портативной аппаратуре, в которой на первом месте стоит потребление, а не качество изображения, OLED экраны проигрывают по потребляемой мощности
- Простота и дешевизна технологий изготовления. (Пока только теоретически, в перспективе. В данный момент затраты на произ-

водство OLED и аналогичного TFT экрана сопоставимы либо выше).

- Цветопередача. Правильная цветопередача в OLED даётся очень непросто. Это связано со свойствами органических материалов (окисление, гидролиз), используемых при производстве. Также естественно явление нарушения цветового баланса из-за неравномерного старения компонент RGB матрицы
- Высокий контраст (от 1000:1 до 5000:1 теоретически. Настоящие технологии не позволяют сделать такие экраны долговечными и дешёвыми)
- Температурный диапазон. OLED экраны могут стабильно работать при низких температурах (до  $-50^\circ\text{C}$ ).
- Цена. В настоящее время стоимость OLED экрана выше аналогичного TFT. Это связано с несовершенством технологий изготовления.



Рисунок 6 – Демонстрация углов обзора OLED дисплея.



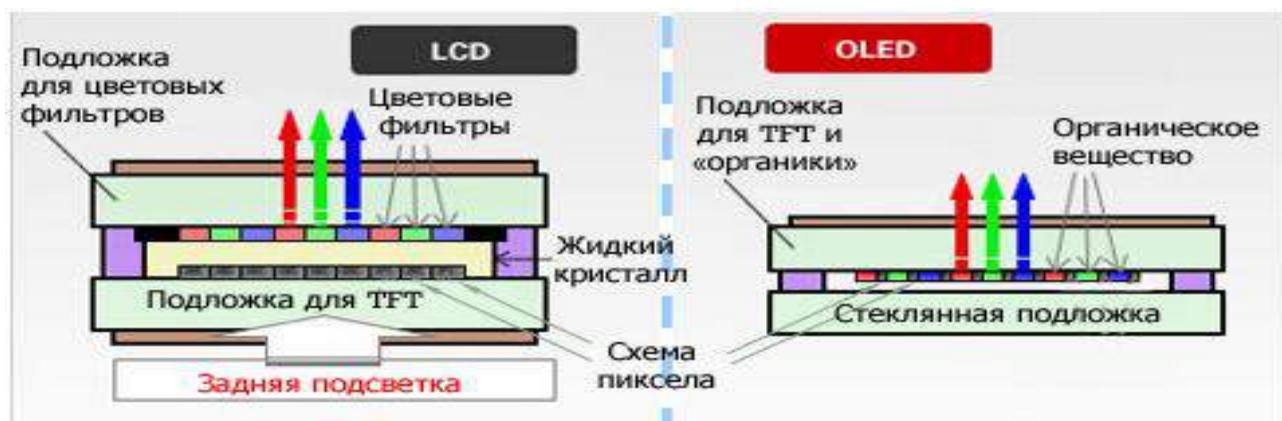


Рисунок 7 – Сравнение OLED и LCD экранов.

Согласно аналитическому обзору Display Search, объём рынка экранов OLED достиг в 2006 году \$1227 млн. В большинстве OLED экранов пока применяется более дешёвая и простая пассивная адресация. Активная адресация позволяет улучшить оптические характеристики дисплеев и увеличить размер экранов. Однако, согласно прогнозу Display Search пассивная адресация останется преобладающей на рынке до 2010 года.

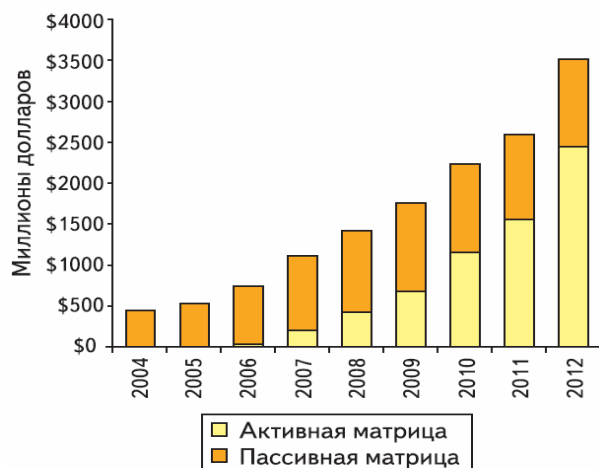


Рисунок 8 – Соотношение активной и пассивной адресации по данным Display Search

Цветное изображение представляет собой интегральную матрицу, представленную RGB элементами. Также у органического светодиода есть пороговое напряжение, ниже которого свечение не начинается и зависит от типа органического материала. Для адекватного управления яркостью каждого пикселя OLED экрана требуется дозировать ток. Это можно сделать двумя способами. В первом при выборке строки используется фиксированное время для активной подачи тока, а на выходе драйвера столбца используется программируемый видеосигналом генератор тока. Во втором методе применяется генератор тока фиксированного максимального значения и используется устройство для моду-

ляции этого тока. Первый способ обеспечивает более щадящие режимы для возбуждения светодиода, поскольку регулируется величина самого тока, но этот способ более дорогой в реализации и более капризный в работе. Второй способ более простой и надёжный, однако, в нём приходится использовать максимальные амплитудные токовые значения. Перегрузка по току приводит к стрессу органической структуры и к уменьшению срока службы дисплея.

В системах с пассивной адресацией каждая строка и каждый столбец дисплея имеет собственный драйвер, и для создания изображения выполняется быстрое сканирование с включением и выключением необходимых пикселей. В связи с возрастающими требованиями по увеличению яркости пикселей и размеров дисплеев данный метод становится затруднительным, поскольку через линии управления необходимо пропускать повышенные токи. Кроме того при включении светодиода в линии управления протекает максимальный ток, что предъявляет повышенные требования по сечению проводников этих линий. Как следствие экраны с пассивной адресацией используются при производстве недорогих и небольших СОИ.

Экраны с активной матрицей решают проблему эффективной адресации каждого пикселя за счёт интегрирования тонкоплёночного транзистора (TFT) последовательно с каждым пикселем. Задачей этого транзистора является управление током через светодиод, а, следовательно, и яркостью каждого пикселя. В данном случае через линии управления могут протекать и пониженные токи, если требуется снижение яркости пикселя, поскольку величина тока задаётся программируемым TFT драйвером. Таким образом, сечение проводников строк и столбцов в данном случае может быть меньше и регулировочный транзистор может длительно удерживать установленную величину тока вплоть до получения следующего управляющего сигнала.

В современных драйверах OLED экранов кроме функции управления развёрткой по стро-



кам и столбцам интегрированы и некоторые функции графического контроллера. Благодаря этому имеется возможность построения примитивных графических объектов, таких как отрезок прямой, прямоугольная область, круг. С помощью команд можно производить аппаратный скроллинг, стирание, перенос и копирование объектов на экране. Поддерживается также формирование курсоров нескольких типов. В большинстве драйверов-контроллеров имеется встроенный DC/DC-конвертор для формирования напряжений питания выходных каскадов схем управления строками и столбцами OLED. У драйверов-контроллеров, предназначенных для использования в цветных OLED дисплеях сотовых телефонов, имеется интерфейс для встроенной камеры. Видеосигнал изображения с камеры поступает непосредственно на OLED дисплей. Для предотвращения «прожигания» экрана в современных контроллерах-драйверах уже заложена функция скрин-сейвера. Программно можно выбрать режим этой функции, реализуемой посредством управляемой миграции рабочего изображения в поле всего экрана в пределах нескольких пикселей. Период смещения картинки составляет несколько минут, по-

этому действие скрин-сейвера практически незаметно для глаз.

#### **Выводы**

На сегодняшний день ни одна корпорация не выпускает серийных моделей полноцветных широкоформатных OLED дисплеев, активно ведутся поиски новых решений для совершенствования и удешевления технологии. За последние годы удалось достичь несомненного прогресса в области технологии OLED экранов. Расширяется рынок, растёт объём продаж изделий с OLED экранами. OLED технология впитывает не только все достоинства предшественников (например, обзорные характеристики ЭЛТ дисплеев, безопасность ЖК дисплеев), но и наследует технологические наработки (например, активная матрица на TFT транзисторах), да ещё и порождает новые качества дисплеев, такие как послойное составление полноцветных пикселей, экономичность, гибкость, двухсторонний обзор и т.д. Это позволяет производить оригинальные отображающие устройства, например, дисплеи на поверхности автомобильного стекла, дисплеи-наклейки, рулонные дисплеи.

## РЕЗОНАТОРНЫЙ СВЧ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЯ «СОЛНЕЧНОГО КАЧЕСТВА»

*Новиков А.Н., Юрченко А.В.*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: [niipp@inbox.ru](mailto:niipp@inbox.ru)

### Проблема измерения поликристаллических полупроводников

Одним из перспективных и дешевых материалов для изготовления солнечных батарей является мультикремний, производство, которого налаживается в Иркутске. Поэтому технология его изготовления требует детального измерения прежде всего: удельного сопротивления. Измерение этого параметра в поли-кристаллическом материале до сих пор является сложной задачей, вследствие наличия в кристалле межзеренных границ, что затрудняет для измерения на постоянном токе по известным методам, таким как четырехзондовый и его разновидности, Вандер-Пау, эффект Холла и других. В данной работе для измерения этих параметров рассматриваются бесконтактные СВЧ методы.

### Анализ бесконтактных методов измерения удельного сопротивления кремния

*Контактный метод*, основан на регистрации протекания тока через образец. Параметры полупроводника можно определить различными способами [5]. Путем измерения фотопроводимости, фототока, фото-ЭДС, ЭДС Холла, магнитосопротивления, фотолюминесценции и т.д. Достоинство контактных методов это простота реализации. Основным недостатком таких методов является необходимость создания омических контактов или p-n переходов. А это сопровождается нагревом материала, что приводит к изменению электрофизических и рекомбинационных характеристик полупроводников. Более того, подобные методы предусматривают протекание тока через образец, что делает невозможным осуществление измерений в поликристаллическом полупроводнике из-за наличия межзеренных границ в объеме кристалла.

*Бесконтактные методы* основаны на поглощении электромагнитной энергии свободными носителями. Бесконтактные методы, разделяются на оптические и радиоволновые методы [1-4]. *Оптический метод* предложен еще в 1956 году [6] когда возбужденные импульсом видимого света ННЗ зондировались лучом инфракрасного света. Инфракрасная диагностика пластин (томография) с использованием лазерных сканнеров и компьютеров достаточно дорога и их применение оправдано лишь в случае кремния высокого качества и однородности по всему объему. Кроме того оптические методы обладают меньшей чувствительностью чем радиоволновые методы.

Большую группу представляют радиоволновые методы, которые подразделяются на *резонаторный* и *волноводный*.

При волноводном методе, образец размещается в волноводе, регистрируется коэффициент отражения или пропускания. Такая установка имеет достоинство в простоте реализации, но она с низкой чувствительностью применяется для малых образцов.

Использование микроволновых методов для измерения электрофизических параметров полупроводников получило наиболее широкое распространение, ввиду низкой стоимости приборов и возможности быстрого сканирования по площади. Принцип действия этих методов основан на регистрации потерь СВЧ мощности, вносимых свободными носителями исследуемого образца в СВЧ поле измерительного датчика. При измерении удельного электрического сопротивления величина потерь СВЧ мощности напрямую определяет удельное сопротивление образца.

Приборы, построенные по такому принципу были сконструированы в Сибирском физико-техническом институте. В них в качестве измерительного датчика использовался резонатор квазистатического типа с концевым измерительным отверстием. Такие установки показывали хорошие результаты, но, тем не менее, слабо внедрялись на производство.

Нами была произведена модернизация конструкции квазистационарного резонатора, чтобы изучить возможность его применения для низкоомных материалов, таких как «солнечный» кремний. Увеличение частоты до 6.5 ГГц позволило на порядок уменьшить габариты резонатора. Это позволило минимизировать конструкцию установки, а использование генератора и детектора в виде интегральных микросхем позволило сократить число дополнительного оборудования.

Структура измерительной установки на основе автодинного датчика представлена на рисунке 1. Она содержит: генератор, управляемый напряжением, настроенный на частоту 6.5 ГГц; квазистационарный резонатор, обеспечивающий связь электрического поля с образцом; детектор-усилитель в виде одной интегральной микросхемы; микроконтроллер для цифровой обработки сигнала с детектора.

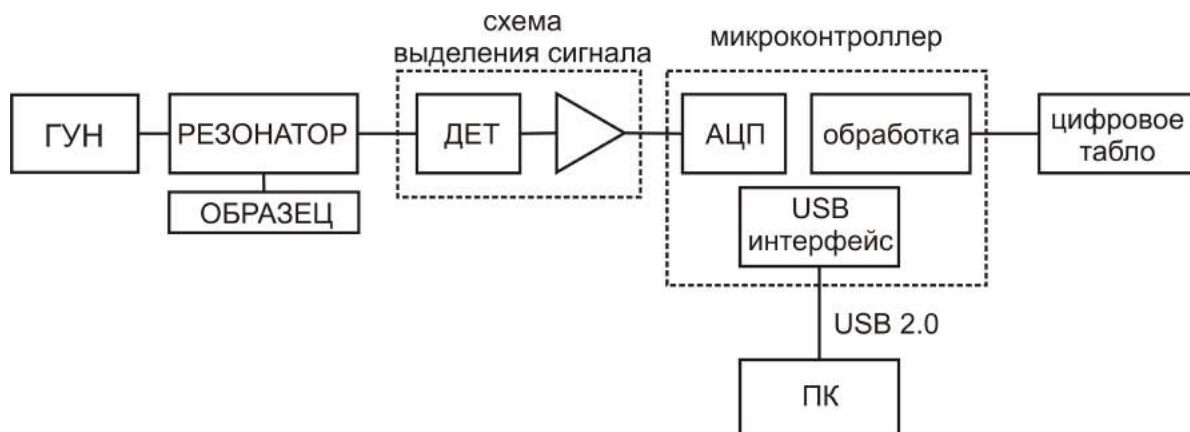


Рисунок 1 Структура измерительной установки на основе квазистационарного резонатора

Конструкция квазистационарного резонатора обеспечивает концентрацию электрического поля вблизи поверхности образца в области диаметром 1 мм. Такая локальность дает возможность проводить измерения не только в образцах монокристаллического кремния, но и в некоторых поликристаллических полупроводниках.

Связь электрического поля резонатора с образцом показана на рисунке 2, где красным цветом показана область максимальной концентрации электрического поля, зеленым цветом область нулевой концентрации.

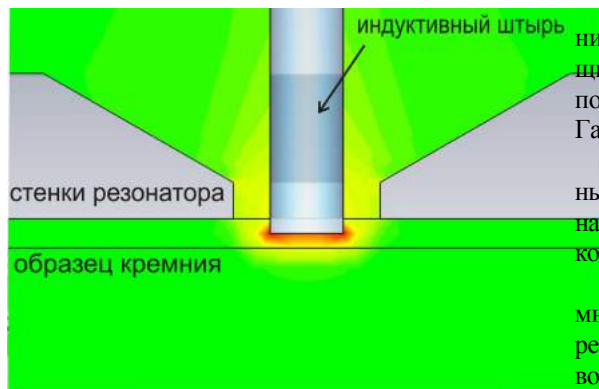


Рисунок 2 Концентрация электрического поля вблизи поверхности образца

Благодаря достоинствам рассматриваемого датчика – конструктивной простоте, малогабаритности, общедоступности комплектующих элементов, бесконтактности измерения и удобству эксплуатации – он может най-

ти широкое применение в полностью автоматизированных системах контроля изделий в полупроводниковой электронике, производстве материалов, в том числе кремния «солнечного качества» и других областях.

#### Список литературы

1. Чихман А.В., Мызгин В.С., Воторопин С.Д., Юрченко В.И., Крылов С.В. Автоматизированная установка на основе автодинных датчиков КВЧ-диапазона для контроля материалов. Электронная промышленность. №1-2, 1998 г.
2. Гордиенко Ю.Е., Старостенко В.В. Измерение толщины и удельного сопротивления с помощью техник СВЧ. Материалы Всесоюзного симпозиума «Генерация СВЧ колебаний на эффекте Ганна», Новосибирск, 1974, с.366.
3. Наливайко Б.А., Воторопин С.Д. Резонаторный метод контроля полупроводников. – Электронная техника, сер.12, Физико-химические методы контроля в электронике. 1971, вып.4(10), с.8-11.
4. Литвин С.В., Юрченко В.И. Исследование многослойных эпитаксиальных структур проходном резонаторе. – Электронная техника. Сер.2, Полупроводниковые приборы, 1981, вып.7(150), с.2-6.
5. Обзоры по электронной технике. Измерение удельного сопротивления полупроводниковых материалов методом сопротивления растекания. (Малышев В.А. – М. 1978 вып.6(204), сер. Полупроводниковые приборы).
6. N.Y Harrik, Y Appl. Phys 27(12), 1956.

## ЖИДКОСТНЫЙ АПЕРТУРНЫЙ СВЧ-КАЛОРИМЕТР

*Климов А.И., Климов Т.А., Цыганков Р.В.*

Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр-т Академический, 2/3

E-mail: klimov@lfe.hcei.tsc.ru

Энергия импульса СВЧ-излучения является важной характеристикой мощных релятивистских генераторов [1]. Измерение СВЧ-энергии совместно с измерением формы СВЧ-сигнала с помощью детектора позволяет надежно измерять амплитуду СВЧ-мощности. Для измерения энергии мощных импульсов СВЧ-излучения перспективно использование апертурных жидкостных калориметров [2]. Данная работа посвящена разработке апертурного калориметра восьмимиллиметрового диапазона. Блок-схема калориметра показана на рис. 1.

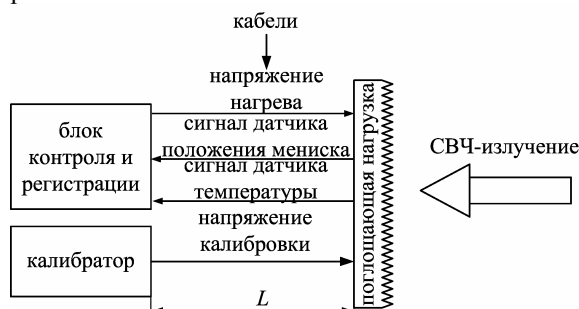


Рис. 1. Блок-схема калориметра

Калориметр состоит из широкоапертурной поглощающей СВЧ-нагрузки, блока контроля и регистрации, калибратора и набора соединительных кабелей. Схематический чертеж широкоапертурной поглощающей СВЧ-нагрузки представлен на рис. 2. Внешний вид нагрузки показан на рис. 3.

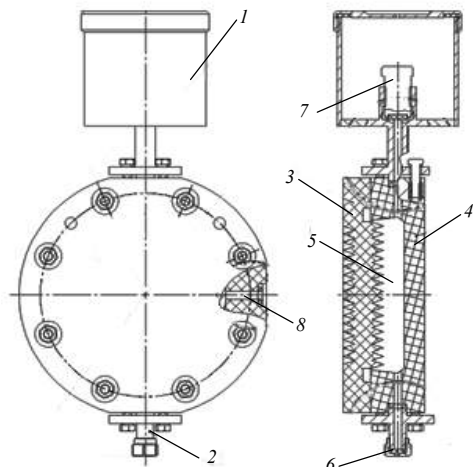


Рис. 2. Схематический чертеж широкоапертурной поглощающей СВЧ-нагрузки:  
1 – расширитель; 2 – сливной кран; 3 – лицевая стенка; 4 – задняя стенка; 5 – рабочий объем; 6 – пробка; 7 – кран расширителя; 8 – место подключения капиллярного датчика

Нагрузка помещается напротив выхода рупорной антенны СВЧ-генератора (рис. 3). Поток СВЧ-излучения, создаваемый генератором, падает на нагрузку. Корпус нагрузки изготовлен из полиэтилена низкого давления. Объем нагрузки запол-

нен рабочей жидкостью на основе этилового спирта. Рабочая жидкость содержит 88,1% этилового спирта, 11,2% дистиллированной воды, 0,48% салициловой кислоты от общей массы.

Форма лицевой стенки нагрузки сделана рифленой. Геометрические размеры нагрузки численно оптимизировались, для того, чтобы уменьшить отражение СВЧ-излучения до пренебрежимо малого уровня. При этом использовались экстраполированные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости жидкости от частоты.

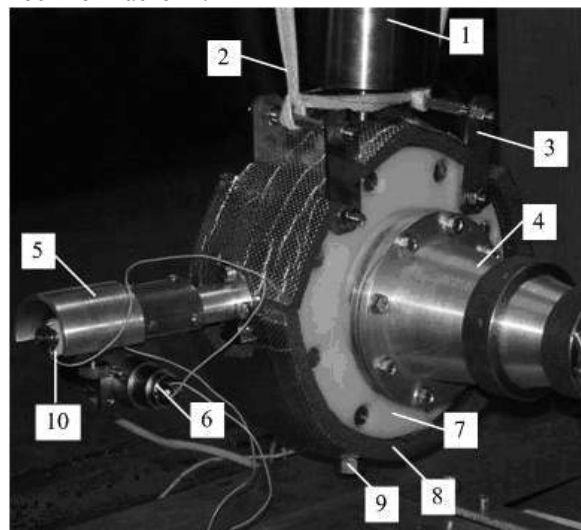


Рис. 3. Внешний вид поглощающей нагрузки калориметра: 1 – расширитель; 2 – веревка; 3 – кронштейн; 4 – передающая рупорная антенна СВЧ-генератора; 5 – защитный кожух капиллярного датчика; 6 – разъем капиллярного датчика; 7 – лицевая сторона поглощающей нагрузки; 8 – теплоизолятор; 9 – сливной кран; 10 – капиллярный датчик

Рабочий объем соединен посредством отверстия с расширителем и запирается краном во время измерения СВЧ-энергии или калибровки калориметра. В объеме имеются две нихромовые спирали с контактами для нагрева рабочей жидкости и калибровки калориметра. Сопротивление нагревательной спирали равно 20 Ом, а калибровочной – 1 Ом. К объему спирта подключен коаксиальный датчик (рис. 4), внешний проводник которого – трубка из нержавеющей стали с внутренним диаметром 1 мм, а внутренний проводник – нихромовая проволока диаметром 0,4 мм.

Для автоматического управления калориметром используется блок контроля и регистрации [2], схематически представленный на рис. 5. Когда объем спирта возрастает при поглощении СВЧ-энергии в нагрузку или при калибровке калориметра, длина спирта в трубке датчика увеличивается. Эта длина определяется посредством изме-

рения электрического сопротивления между внутренним и наружным проводниками датчика. Это сопротивление включено в мост Уитстона, который встроен в электронную схему блока контроля и регистрации. Блок контроля и регистрации включает набор усилителей, микроконтроллер со встроенным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и широтно-импульсным модулятором (ШИМ). Схема позволяет автоматически управлять положением мениска и считывать результаты измерений.

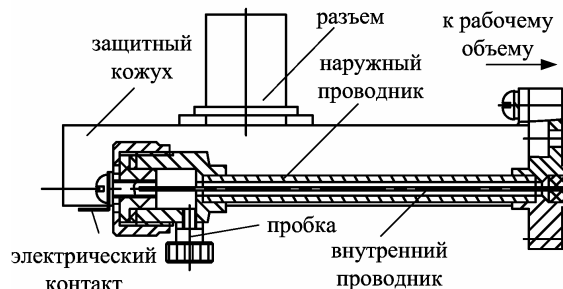


Рис. 4. Схематический рисунок устройства капиллярного датчика

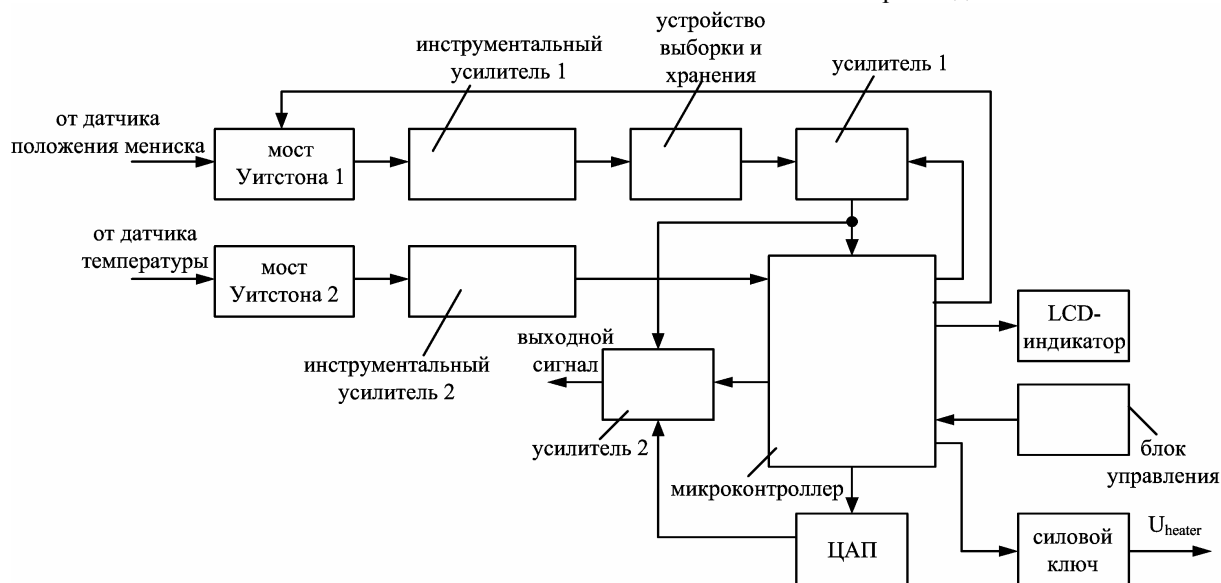


Рис. 5. Блок-схема блока контроля и регистрации

Для того чтобы предотвратить перегрев спирта в трубке датчика, в схеме моста Уитстона используется импульсное напряжение. Эти импульсы генерируются микроконтроллером. Сигнал моста Уитстона, используемый для обратной связи, усиливается инструментальным усилителем. Усиленный сигнал поступает на вход устройства выборки-хранения. Здесь он преобразуется в постоянное напряжение, равное амплитуде импульсов на входе устройства выборки-хранения. Далее постоянное напряжение с выхода устройства выборки и хранения усиливается до необходимого уровня усилителем 1. Стабилизация положения мениска контролируется непрерывным подогревом рабочей жидкости до температуры, несколько превышающей температуру окружающей среды, с использованием сигнала обратной связи с коаксиального датчика и источника питания блока контроля и регистрации.

Регулятором подогрева служит микроконтроллер со встроенным АЦП и ШИМ. Импульсы с ШИМа управляют силовым ключом, который подключает напряжение источника питания к спирали подогрева калориметра. Во время измерения СВЧ-энергии или процедуры калибровки сигнал обратной связи, записанный в памяти контроллера, подается на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), где преоб-

разуется в аналоговую форму. Далее этот аналоговый сигнал подается на вход вычитающего усилителя (усилитель 2), где происходит его вычитание из выходного сигнала усилителя 1.

Для калибровки калориметра используется модифицированный стабилизированный источник постоянного тока DC POWER SUPPLY HY 3005D, позволяющий получать на калибровочной спирали прямоугольные импульсы с пиковым током до 3 А, с длительностью 2 с. Калориметр рассчитан на измерение СВЧ-энергии в диапазоне от 0,1 до 18 Дж. Типичная погрешность калибровки составляла  $\pm 20\%$ .

Калориметр был использован для измерения энергии импульсов СВЧ-излучения наносекундной длительности релятивистской лампы обратной волны в экспериментах по проекту РФФИ № 09-08-99119.

#### Литература

1. Гришин Д.М., Губанов В.П., Коровин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т.28, вып.19. – С. 24-31.
2. Klimov A.I., Vykhodtsev P.V., Elchaninov A.A., et al. // Proceeding of the 15<sup>th</sup> International Symposium on High Current Electronics. Tomsk, Russia: Institute of High Current Electronics SB RAS, 2008. – P. 422–424.

## ВОЛНОВОДНАЯ АНТЕННА ВОСЬМИМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

*Климов А.И., Климов Т.А.*

Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр-т Академический, 2/3  
E-mail: klimov@lfe.hcei.tsc.ru

Для приема мощных импульсов СВЧ-излучения релятивистских генераторов [1] необходимо использование антенн с малой эффективной поверхностью поглощения на основе стандартных волноводов [2]. Настоящая работа посвящена разработке подобной антенны восьмимиллиметрового диапазона. Антенна выполнена на основе отрезка стандартного волновода сечением 7,2×3,4 мм с открытым концом. Мощность, принимаемая антенной, пропорциональна плотности потока мощности и эффективной поверхности антенны. Использование волноводных антенн для приема мощных импульсов СВЧ-излучения затруднено резонансными эффектами вблизи конца волновода и вследствие этого существенной зависимостью эффективной поверхности антенны от частоты, что может приводить к заметному искажению регистрируемых сигналов. Для уменьшения этой зависимости на внешних широких стенках волновода устанавливаются клиновидные поглотители, изготовленные из компаунда на основе эпоксидной смолы и сажи [2]. Схематический чертеж такой антенны представлен на рис. 1, а ее внешний вид – на рис. 2.

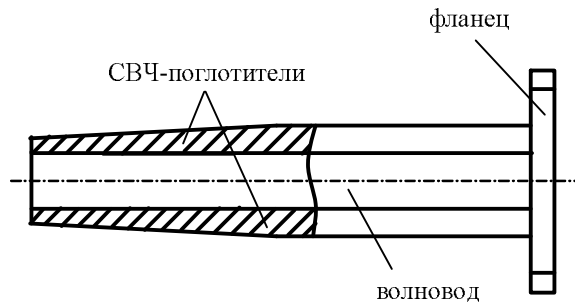


Рис. 1. Схематический чертеж волноводной антенны



Рис.2. Внешний вид антенны

Измерение зависимости эффективной поверхности волноводной антенны от частоты выполнялось методом трех антенн [3] с использованием уравнения приема-передачи:

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{S_{ef,R} S_{ef,T}}{\lambda^2 r^2}, \quad (1)$$

где  $S_{ef,R}$  и  $S_{ef,T}$  – эффективные поверхности приемной и передающей антенн, соответственно,  $P_T$  и  $P_R$  – передаваемая и принимаемая мощности, соответственно,  $\lambda$  – длина волны в вакууме,  $r$  – расстояние между фазовыми центрами антенн.

Вначале измерялась эффективная поглощающая поверхность  $S_{ef,T} = S_{ef,R} = S_{ef}$  двух образцовых антенн в виде одинаковых рупоров с прямоугольным раскрытием 23×10 мм с использованием соотношения, вытекающего из (1):

$$S_{ef} = \lambda r \sqrt{\frac{P_R}{P_T}}. \quad (2)$$

В зависимости от частоты положение фазового центра рупорной антенны может изменяться в пределах ее высоты. Поэтому расстояние  $r$  полагалось равным расстоянию между апертурами рупоров плюс высота одной рупорной антенны. Добавление высоты рупора позволяло до некоторой степени учесть смещение фазового центра при изменении частоты и тем самым уменьшить составляющую суммарной ошибки измерения эффективной поверхности, обусловленную ошибкой измерения расстояния. Расстояние  $r$  удовлетворяло также условию дальней зоны:  $r \gg 2D^2 / \lambda$ ; где  $D$  – наибольший размер апертуры передающей и/или приемной антенны.

Коэффициент передачи  $P_R/P_T$  измерялся с помощью панорамного измерителя Р2-65, показания которого уточнялись с помощью аттенюатора ДЗ-36А (рис. 3). После этого по формуле (2) рассчитывалась эффективная поверхность рупоров. Для измерения эффективной поверхности волноводной антенны она устанавливалась вместо приемного рупора, и вновь измерялся коэффициент передачи. При этом расстояние  $r$  измерялось от раскрытия волноводной антенны до половины высоты передающего рупора и было равно расстоянию между рупорными антеннами. После этого волноводная антенна снова заменялась приемным рупором, и на каждой частоте с помощью аттенюатора ДЗ-36А устанавливался тот коэффициент передачи, который наблюдался с волноводной антенной. Показания аттенюатора давали изменение коэффициента передачи, которое позволяло вычислить эффективную поверхность волноводной антенны по измеренной эффективной поверхности рупоров. Результаты измерений зависимости эффективной поверхности волноводной антенны от частоты приведены на рис. 4. Для сравнения на рис. 5 приведена такая же зависимость для волноводной антенны без поглотителей, измеренная по вышеописанной методике.



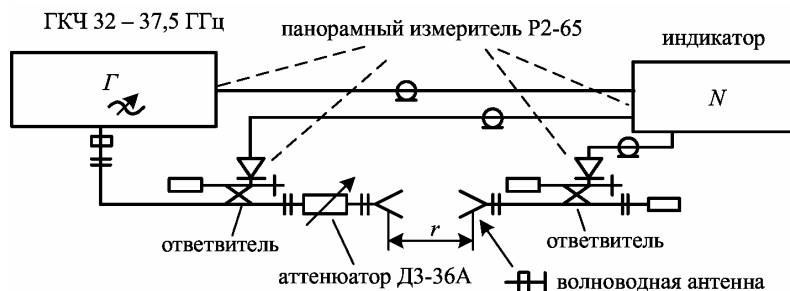


Рис. 3. Схема измерения зависимости эффективной поверхности волноводной антенны от частоты

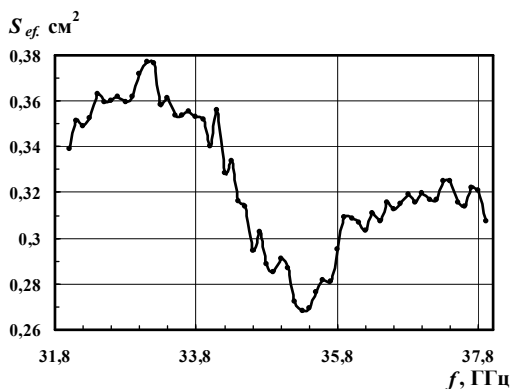


Рис. 4. Зависимость эффективной поверхности волноводной антенны от частоты

Сравнение графиков на рисунках 4 и 5 свидетельствует о том, что использование поглощающих накладок на широких стенках волновода позволяет существенно уменьшить частотную зависимость эффективной поверхности.

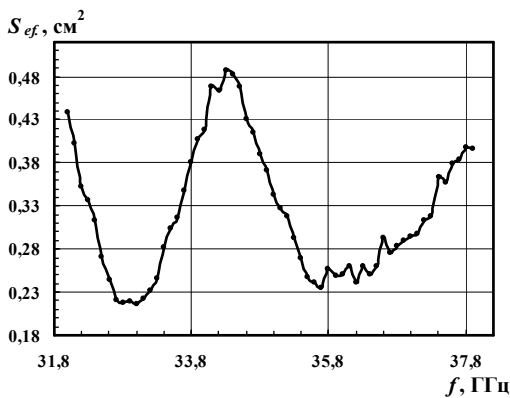


Рис. 5. Зависимость эффективной поверхности открытого отрезка волновода длиной 50 мм от частоты

Ошибка измерения эффективной поверхности волноводной антенны не превышает  $\pm 15\%$  и обусловлена в основном ошибкой измерения коэффициента передачи  $P_R/P_T$  ( $\pm 4\%$ ), присутствием стоячей волны ( $\pm 5\%$ ) и кросс поляризации ( $\pm 5\%$ ). Ошибка измерения  $\lambda$  составляет  $\pm 0,5\%$ . Ошибка измерения расстояния  $r$  равна  $\pm 11\%$ . Полная погрешность измерения вычислялась по формуле

$$\theta_{\Sigma} = \pm 1,1 \sqrt{\sum_{i=1}^M \theta_i^2},$$

где  $\theta_i$  – вышеприведенные составляющие суммарной погрешности.

Коэффициент стоячей волны антенны измерялся также с помощью панорамного измерителя КСВ и ослаблений P2-65 в соответствии с прилагающейся инструкцией по эксплуатации. Результаты измерения зависимости КСВ выхода антенны (со стороны присоединительного фланца) от частоты приведены на рис. 6.

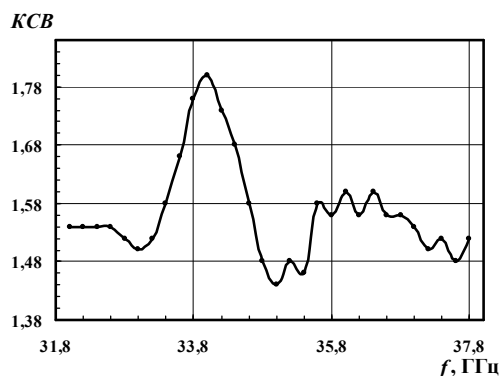


Рис. 6. Зависимость КСВ волноводной антенны от частоты

Как видно из рис. 6. КСВ не превышает 1,8, что было приемлемым для выполнения измерений.

- Характеристики разработанной антенны:
- рабочий диапазон 32–37,5 ГГц;
  - эффективная поверхность 0,27–0,38 см<sup>2</sup>;
  - КСВ антенны со стороны выходного фланца не более 1,8;
  - вес антенны 21 г;
  - габариты антенны 50×25×25 мм.

Описанная антенна использовалась для регистрации мощных наносекундных импульсов СВЧ-излучения восьмимиллиметрового диапазона релятивистской лампы обратной волны в экспериментах по проекту РФФИ № 09-08-99119-р\_офи.

#### Литература

1. Гришин Д.М., Губанов В.П., Коровин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т.28, вып.19. – С. 24–31.
2. Климов А.И. // Известия ВУЗов. Физика. – 1996. – № 12. – С. 98–109.
3. Климов А.И. Экспериментальные методы в сильноточной электронике: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 139.

## ПОЛОСОВОЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ФИЛЬТР ВОСЬМИМиллиметрового ДИАПАЗОНА

*Климов А.И., Климов Т.А.*

Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр-т Академический, 2/3  
E-mail: klimov@lfe.hcei.tsc.ru

Несущая частота мощных релятивистских СВЧ-генераторов [1] является важной характеристикой, поскольку одно только ее измерение зачастую позволяет определить режим работы устройства. Одним из эффективных методов измерения несущей частоты мощных наносекундных импульсов СВЧ-излучения является резонансный, основанный на использовании волноводного полосового перестраиваемого фильтра [2]. Настоящая работа посвящена разработке и исследованию характеристик волноводного полосового перестраиваемого фильтра восьмимиллиметрового диапазона, предназначенного для измерения полосы перестройки частоты генерации релятивистской лампы обратной волны. Устройство фильтра схематически представлено на рис. 1, а внешний вид – на рис. 2.

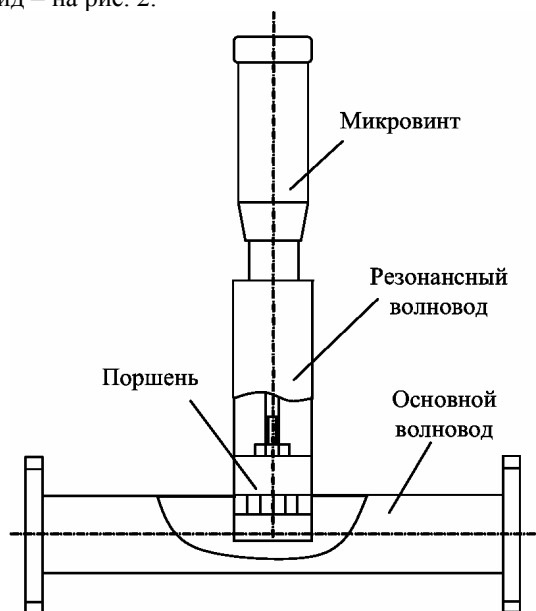


Рис. 1. Схематический чертеж полосового перестраиваемого фильтра

Фильтр включает основной и боковой волновода стандартного сечения  $7,2 \times 3,4$  мм. Боковой волновод погружен в Н-плоскости перпендикулярно в основной волновод и содержит короткозамыкающий поршень, который может перемещаться с помощью прецизионного микровинта. Таким образом, боковой волновод с замыкающим поршнем образует резонатор. Фиксированное положение поршня внутри бокового волновода определяет резонансную частоту (центральную частоту полосы пропускания фильтра при данном положении поршня). Рабочий диапазон фильтра снизу ограничен критической частотой основного волновода (20,8 ГГц), а сверху – критической частотой зазора образованного расстоянием между боковой стенкой основного волновода и торцом бокового

волновода. Таким образом, это расстояние определяется требованием к верхней частоте рабочего диапазона.

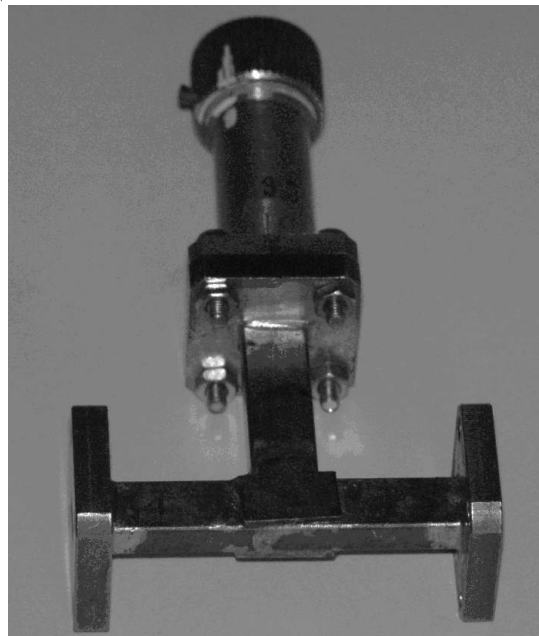


Рис. 2. Внешний вид полосового перестраиваемого фильтра

Характеристики фильтра измерялись панорамным измерителем P2-65 (рис. 3), в измерительную цепь которого был включен прецизионный аттенюатор ДЗ-36А для уменьшения коэффициента стоячей волны до уровня, приемлемого для измерителя и уточнения переходного затухания.

Ошибка измерения центральной частоты полосы пропускания составляла  $\pm 0,5$  %. Результаты измерения характеристик фильтра приведены на рис. 4–7. В пределах диапазона 32–37,5 ГГц могли реализовываться несколько резонансных полос пропускания фильтра. Зависимости центральных частот этих полос от положения поршня представлены на рис. 4. Видно, что при измерении с обычно используемой второй полосой пропускания (рис. 5) необходимо иметь в виду, что через фильтр при фиксированном положении поршня может проходить и более высокочастотный сигнал, соответствующий другим полосам пропускания, если он имеется в спектре источника СВЧ-излучения.

На рис. 6 представлены зависимости ширины полос пропускания от положения поршня. Осциллирующий характер кривых связан, по-видимому, с непостоянством отражающей способности поршня при его перемещении вдоль бокового волновода. Уровень осцилляций был существенно выше при конструкции поршня, предполагавшей электрический контакт с волноводом.

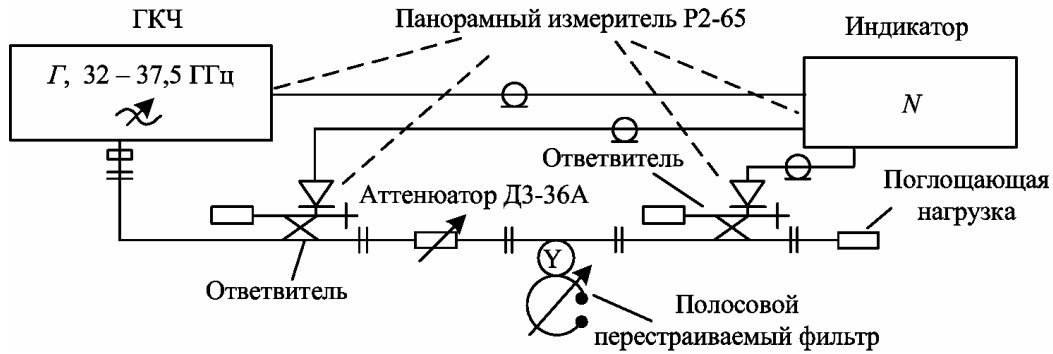


Рис. 3 Схема калибровки фильтра

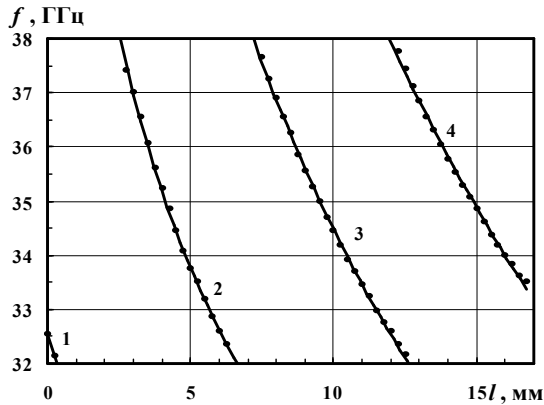


Рис. 4. Зависимость центральных частот полос пропускания фильтра от положения поршня

К сожалению, найти конструкцию поршня, обеспечивающую надежный электрический контакт, не удалось. В рамках выполненной работы наилучшие результаты были достигнуты при дроссельной конструкции поршня с двумя канавками.

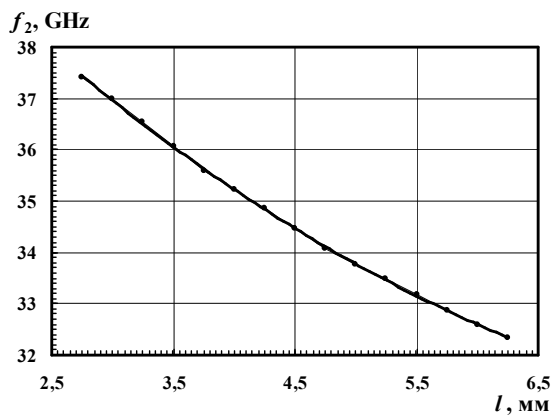


Рис. 5. Зависимость центральной частоты второй полосы пропускания фильтра от положения поршня

На рис. 7 представлены зависимости проходного затухания фильтра для различных его полос пропускания. Графики также имеют осциллирующий характер, по-видимому, связанный с вышеуказанными причинами.

Вес фильтра не превышает 163 г. Размеры фильтра составляют 118×58×24 мм.

Фильтр использовался для измерения несущей частоты мощных наносекундных импульсов СВЧ-излучения релятивистской лампы обратной волны в экспериментах по проекту РФФИ № 09-08-99119-р\_офи.

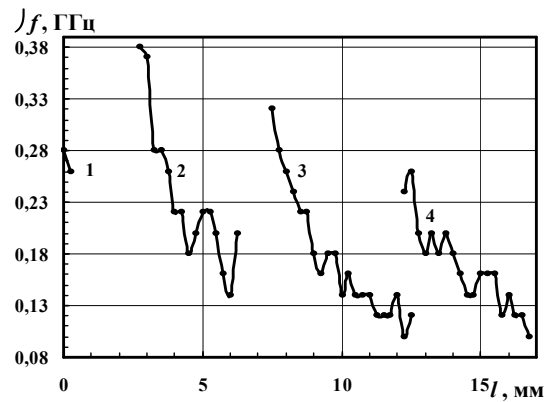


Рис. 6. Зависимости ширины полос пропускания фильтра от положения поршня

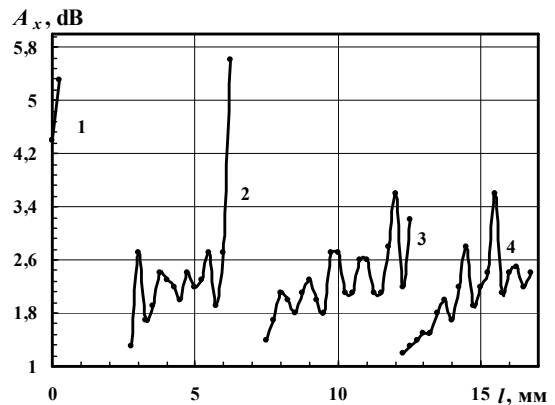


Рис. 7. Зависимости проходного затухания в полосах пропускания фильтра от положения поршня

#### Литература

1. Гришин Д.М., Губанов В.П., Коровин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т.28, вып.19. – С. 24-31.
2. Климов А.И. Экспериментальные методы в сильноточной электронике: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – С. 139.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОВ 8-ММ ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН С МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

*Цыганков Р.В., Тотьменинов Е.М., Климов А.И., Комаров А.Е., Кицанов С.А., Сухов М.Ю.*  
Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр-т Академический, 2/3  
E-mail: [tsygankov@lfe.hcei.tsc.ru](mailto:tsygankov@lfe.hcei.tsc.ru)

В настоящее время в СВЧ-электронике больших мощностей достигнут значительный прогресс в генерации импульсов электромагнитного излучения сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. С точки зрения практического использования релятивистских генераторов важным является возможность широкополосной перестройки частоты излучения. Для расширения полосы перестройки частоты наиболее перспективным оказывается использование механического способа, так как другая возможность смещения частоты генерации, связанная с электронной перестройкой, существенно ограничена малым изменением продольных скоростей электронов при изменении их кинетической энергии в релятивистской области. Ранее механическая перестройка частоты генерации в полосе до 15% была экспериментально продемонстрирована в релятивистских ЛОВ сантиметрового диапазона для энергий электронов около 1 МэВ путем изменения периода замедляющей структуры [1], а также смещения положения резонансного рефлектора относительно замедляющей структуры [2,3]. Целью данной работы является исследование возможности реализации механической перестройки частоты генерации ЛОВ с резонансным рефлектором в 8-мм диапазоне длин волн для энергий электронов около 300 кэВ.

Электродинамическая система ЛОВ состоит из замедляющей системы (ЗС) с увеличенным поперечным размером (около полутора длин волн) и резонансного рефлектора в качестве отражателя встречной волны (рис. 1).

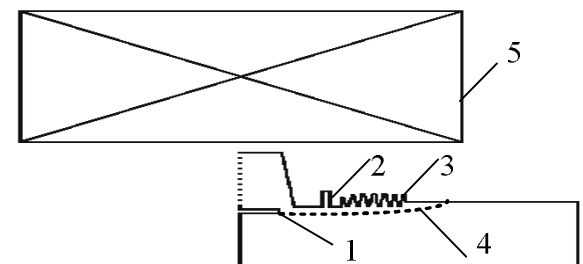


Рис. 1. Расчетная геометрия ЛОВ с резонансным рефлектором. 1 – катод, 2 – резонансный рефлектор, 3 – замедляющая система, 4 – электронный пучок, 5 – соленоид

В данной схеме отражение встречной волны от резонансного рефлектора происходит в режиме

холостого хода вследствие возбуждения в нём запертой моды на квазикритической частоте, в резонансном поле которой осуществляется эффективная предварительная модуляция электронного пучка по энергии (рис. 2).

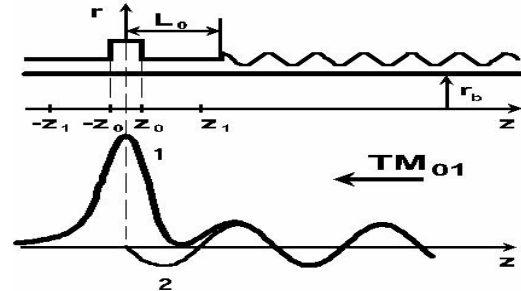


Рис. 2. Распределение  $z$ -компоненты электрических полей на радиусе электронного пучка в приближении малой амплитуды гофр: 1 – суперпозиция полей стоячей волны и запертой моды; 2 – поле стоячей волны

С целью выбора и оптимизации геометрии электродинамической системы генератора, параметров электронного пучка и рабочей области магнитных полей был проведён численный эксперимент с использованием PIC-кода KARAT [5]. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

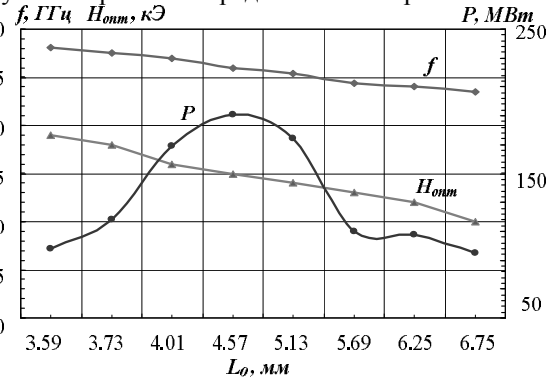


Рис. 3. Расчетные зависимости амплитуды СВЧ-мощности  $P$ , несущей частоты  $f$  и оптимального магнитного поля ( $H_{opt}$ ) от расстояния  $L_0$  между резонансным рефлектором и ЗС генератора

В расчётах изменялась длина участка дрейфа  $L_0$  между резонансным рефлектором и ЗС (рис. 2). Для каждой величины  $L_0$  также варьировалось ведущее магнитное поле. Оптимальное расчётное напряжение на диоде было 300 кВ, оптимальный расчетный ток электронного пучка –

3 кА. Оптимальный диаметр катода оказался равным 11 мм. Рабочая область магнитных полей была определена в диапазоне 15–33 кЭ. Гофрировка оптимальной ЗС была неоднородной по периоду и амплитуде (рис. 1). Период ЗС уменьшался к ее коллекторному концу. В результате, расчетный диапазон перестройки несущей частоты составил 12.4 % (33.5 – 38.1 ГГц) по половинному уровню от максимальной по полосе перестройки амплитуде СВЧ-мощности, соответствующей  $L_0 = 4.57$  мм (рис. 3). Максимальной амплитуде мощности 190 МВт соответствовала эффективность генератора около 21 %.

Далее было выполнено экспериментальное исследование ЛОВ с использованием сильноточного ускорителя электронов типа „СИНУС-160” [6]. Эксперименты выполнялись в режиме однократных импульсов. Длительность импульса напряжения на полувысоте составляла около 4.5 нс. Оптимальными с точки зрения получения максимальной амплитуды мощности СВЧ-излучения и стабильности генерации оказались ток диода и напряжения на диоде около 3 кА и 300 кВ, соответственно (рис. 4). Рабочий диапазон ведущего магнитного поля (24 кЭ – 27 кЭ) находился в области ниже резонанса циклотронного поглощения СВЧ-излучения электронным пучком.

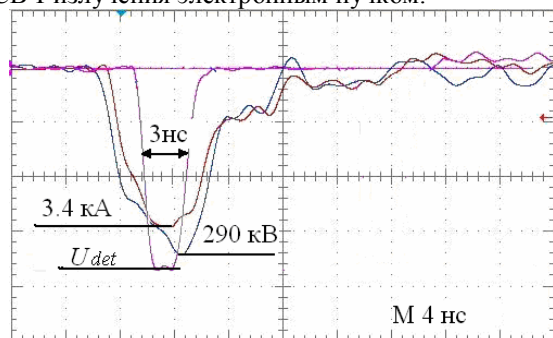


Рис. 4. Типичные осциллограммы тока в диоде, напряжения на катоде и сигнала с детектора  $U_{det}$

Для измерений характеристик импульсов СВЧ-излучения были разработаны приемная волноводная антенна на основе отрезка стандартного волновода сечением  $7.2 \times 3.4$  мм, СВЧ-детектор на горячих носителях, полосовой волноводный перестраиваемый фильтр и апертурный жидкостный калориметр. СВЧ-сигнал принимался антенной и детектировался подключенным к ней детектором. Сигнал с выхода детектора передавался по коаксиальному радиочастотному кабелю на осциллограф TDS 7404 в экранированную комнату. Амплитуда СВЧ-мощности  $P$  вычислялась посредством деления энергии СВЧ-импульса, измеренной калориметром, на длительность импульса, которая обычно составляла около 3 нс. Для измерения несущей частоты  $f$  при каждой длине  $L_0$  между приемной антенной и детектором устанавливался волноводный перестраиваемый полосовой фильтр. Для каждого  $L_0$  определялось магнитное поле, при

котором достигался максимальный детектированный сигнал. Полоса перестройки определялась в соответствии с соотношением:  $(f_{max} - f_{min}) / f_{mid} \times 100$  %, где  $f_{max}$  и  $f_{min}$  – соответственно максимальная и минимальная частота диапазона перестройки, а  $f_{mid} = (f_{max} + f_{min}) / 2$ . Результаты измерений представлены на рис. 5.

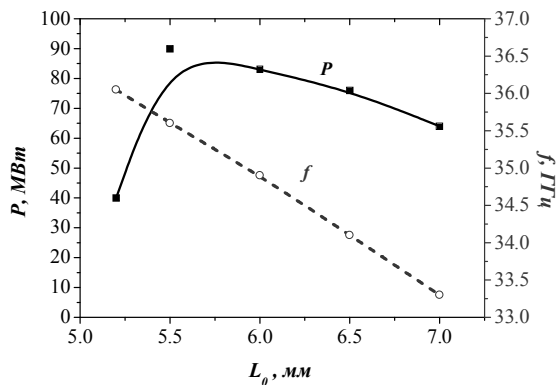


Рис. 5. Результаты измерений зависимостей амплитудной мощности  $P$  и частоты генерации  $f$  от длины участка дрейфа  $L_0$

Пространственное распределение плотности потока СВЧ-мощности, зарегистрированное в дальней зоне передающей рупорной антенны, имело вид типичный для волны  $E_{01}$ .

В проведенных экспериментах была достигнута перестройка частоты генерации в полосе 7 % по уровню -3дБ от максимальной пиковой мощности, составлявшей около 100 МВт. Максимальная эффективность СВЧ-генератора достигала 10 %.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 09-08-99119-р\_офи.

#### Литература

1. Кицанов С.А., Климов А.И., Коровин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29. Вып. 6. – С. 87–94.
2. Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Изв. Вузов. Радиофизика. – 1999. –Т. 42. –№ 12. – С. 1189–1196.
3. Климов А.И., Куркан И.К., Полевин С.Д., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33. – Вып. 24. – С. 53–60.
4. Кицанов С.А., Коровин С.Д., Климов А.И., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т.30. –Вып. 15. –С. 1–7.
5. Tarakanov V.P. User's Manual for Code Karat. BRA, Springfield, 1992.
6. Mesyats G.A., Korovin S.D., Gunin A.V., Gubanov V.P., Stepchenko A.S., Grishin D.M., Landl V.F., and Alexeenko P.I. Laser and Particle Beams. – 2003. –V. 21. – P. 197–209.

Научное издание

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

Материалы II Научно-практической конференции

Компьютерная верстка: *М.В. Китаева*  
Дизайн обложки: *И.А. Абрашкина*


**Издано в авторской редакции**

Подписано к печати 15.06.2011. Формат 60×84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 18,38. Уч.-изд. л. 16,62.  
Заказ 868-11. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел/факс: +7 (3822) 56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)