

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Национальный исследовательский  
Томский государственный университет

**ВОСЕМНАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНЧЕСКИХ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ  
ИНКУБАТОРОВ**

*г. Томск, 5–7 мая 2021 г.*

Scientific & Technical Translations



ИЗДАТЕЛЬСТВО

Томск – 2021

УДК 537.86; 621.38.01:53; 681.382.473; 47.14  
В61

**Восемнадцатая Всероссийская конференция студенческих  
В61 научно-исследовательских инкубаторов.** Томск, 5–7 мая 2021 г.  
– Томск : СТТ, 2021. – 300 с.

ISBN 978-5-93629-669-7

Сборник содержит доклады участников Восемнадцатой Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов, проходившей в Томском государственном университете 5–7 мая 2021 года. Цель конференции – обмен результатами фундаментальных и прикладных исследований в области радиофизики, электроники, оптоэлектроники, лазерной техники и лазерных технологий, радиоэлектронных систем и комплексов, включая проектирование и разработку специализированного математического и программного обеспечения, новых приборов и материалов.

Сборник представляет интерес для студентов, аспирантов, молодых ученых, преподавателей в области радиофизики и оптики.

**УДК 537.86; 621.38.01:53; 681.382.473; 47.14**

*Рецензенты:*

Коротаев А.Г., канд. физ.-мат. наук, доцент, НИ ТГУ;

Каширский Д.Е., канд. физ.-мат. наук, НИ ТГУ;

Торгаев С.Н., канд. физ.-мат. наук, доцент, НИ ТГУ;

Лозовой К.А., канд. физ.-мат. наук, НИ ТГУ;

Громов М.Л., канд. физ.-мат. наук, доцент, НИ ТГУ;

Бадьин А.В., канд. физ.-мат. наук, НИ ТГУ;

Бердюгин А.И., м.н.с., ассистент кафедры, НИ ТГУ.

Опубликовано в авторской редакции.

ISBN 978-5-93629-669-7



© Авторы, 2021.

© Дизайн, макет. СТТ™, 2021.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Секция I. Радиофизика и электроника</b> .....	9
Затухание эванесцентных электромагнитных волн в слое между двумя диэлектрическими призмами <i>Г.А. Багреев</i> .....	10
Применение терагерцового излучения для визуализации однородности композиционных материалов <i>Р.П. Гурский, А.И. Бердюгин</i> .....	15
Моделирование радиоволновой системы досмотра человека в режиме реального времени <i>М.А. Димов</i> .....	20
Измерение электрофизических параметров тонколистовых материалов <i>А.И. Еремеев, А.Т. Жукжанова</i> .....	25
Разработка устройства для сбора данных об уровне рН воды «УСКД-Аква» <i>В.А. Казанин, Е.В. Ланин</i> .....	30
Создание прототипа системы контроля величины напряженности постоянного магнитного поля в воздушном зазоре постоянных электромагнитов <i>Д.Н. Кирсанов</i> .....	36
Моделирование электромагнитного отклика от увлажненной многослойной почвенной структуры <i>С.С. Коломоец</i> .....	43
Разработка прототипа системы управления автономным роботом на основе микроконтроллера ATmega 328 для сбора климатических параметров <i>Г.И. Косарев</i> .....	48
Неустойчивости синхронных режимов в системе связанных автогенераторов <i>В.С. Костерова</i> .....	53

Разработка системы контроля уровня и скорости потока природного сырья на предприятиях добывающих отраслей <i>А.Д. Криницкий</i> .....	58
Автоматизация процесса измерения физико-химических параметров пресных водоемов с использованием квадрокоптера <i>Е.В. Ланин, В.А. Казанин</i> .....	62
Субтерагерцовые спектры водно-солевых растворов в пористой среде и в капиллярах <i>Л.О. Лобова</i> .....	68
Исследование схемы запуска генератора коротких сверхширокополосных импульсов <i>П.М. Лысых</i> .....	73
Использование некогерентного излучения для инверсной РСА-технологии <i>Р.М. Махманазаров</i> .....	79
Синтез осесимметричных акустических геодезических линз <i>Е.М. Медведева</i> .....	84
Исследование электромагнитных характеристик композитов, содержащих многостенные углеродные нанотрубки, методами непрерывной и импульсной терагерцовой спектроскопии <i>В.Д. Москаленко, К.В. Дорожкин</i> .....	89
Применение автономных приемо-передающих агрометеозондов в оранжерее с умеренно-влажным климатом <i>Д.А. Пидотова, А.К. Берзин, М.С. Южаков, Д.И. Фильченко</i> .....	94
Влияние структуры материала подложки на распространение электромагнитных волн в микрополосковой линии <i>Р.В. Присекин</i> .....	99
Поглотители Суб-ТГц излучения на основе гексагональных структур, полученных методом 3D-печати <i>К.В. Симонова, В.Д. Москаленко, К.В. Дорожкин</i> .....	105

Резонаторная диагностика волокна для 3D-печати объектов методом послойного наплавления <i>Д.Д. Тетерина</i> .....	110
Подвижность носителей заряда в арсениде галлия с глубокими центрами <i>М.С. Трофимов</i> .....	115
Численное моделирование многолучевой антенны цилиндрической формы с линейной поляризацией <i>Т.И. Чурикова</i> .....	121
Разработка аппаратной части устройства УСЖД-агро и модернизация ее для расширения функционала <i>Д.И. Фильченко, М.С. Южаков, А.К. Берзин, Д.А. Пидотова</i> .....	126
Исследование электромагнитных характеристик композиционных материалов на основе сегнетоэлектриков и ферритов <i>Т.Н. Шематило</i> .....	131
<b>Секция 2. Оптика, фотоника и оптоинформатика</b> .....	135
К вопросу о чувствительности лазерного датчика смещения маятника Цельнера <i>А.А. Гунько, И.Д. Кравцов, Д.А. Лузянин</i> .....	136
Особенности анализа дифракционных картин в процессе синтеза наногетероструктур Ge/Si и GeSi/Si на установке молекулярно-лучевой эпитаксии <i>В.В. Дирко, А.С. Соколов</i> .....	141
Анализ роста эпитаксиальных пленок кремния на сверхструктурах 1x2 и 2x1 методом дифракции быстрых электронов <i>О.И. Кукенов</i> .....	146
Особенности спектров поглощения ВДВТ алмазов в зависимости от стадии радиационно-термической обработки <i>А.С. Попова, В.С. Рипенко</i> .....	150

Спектральные характеристики органических соединений с трифениламиновой электрон-донорной группой, используемые для создания синих органических светоизлучающих диодов <i>Е.В. Сапожникова</i> .....	155
Квантовая криптография в аспекте популяризации науки и развития профессионально-технической квалификации <i>Л.И. Стефаненко, А.Г. Сергеев, Ю.В. Курочкин, В.Е. Родимин</i> .....	159
Экспериментальная оценка дальности оптической связи на рассеянном излучении в видимом диапазоне <i>В.Я. Тен</i> .....	173
Измерение характеристик детектора одиночных фотонов для квантовых коммуникаций <i>К.И. Хомякова</i> .....	179
Средства и методы построения карты глубины <i>А.В. Шалеев</i> .....	184
<b>Секция 3. Информационные технологии и телекоммуникационные системы</b> .....	189
Программно-аппаратный комплекс для измерения малых токов полупроводниковых барьерных структур <i>А.Б. Аюрзанаев</i> .....	190
Разработка серверного программного обеспечения системы сбора климатических данных <i>А.К. Берзин, М.С. Южаков, Д.И. Фильченко, Д.А. Пидотова</i> .....	195
Информационное обеспечение программно-аппаратного комплекса LabVIEW-P2M <i>Р.А. Василенко, О.С. Жабин</i> .....	200
Обнаружение и отслеживание объектов искусственного происхождения <i>И.И. Гальцев</i> .....	205

Сравнение нейронных сетей различных архитектур и DTW алгоритма для задачи распознавания жестов <i>Г.А. Долгов</i> .....	211
Разработка элементов моделирования виртуальной школьной лаборатории по физике в программе Unreal Engine 4 <i>Д.А. Егоров</i> .....	217
Система генерации лазерных импульсов для установки квантовой коммуникации <i>А.Е. Иванов</i> .....	223
Восстановление набранного текста по звуку от нажатия клавиш <i>Э.Е. Ким</i> .....	228
Обзор технологии беспроводной связи LoRaWAN для IoT <i>К.С. Кривов</i> .....	234
Конечно-автоматное тестирование программных реализаций, сгенерированных по UML-описаниям <i>Д.А. Лобанов</i> .....	239
Построения модели преобразования изображений, полученных в активной оптической системе <i>Д. Ляшенко, Т.С. Бондарева</i> .....	244
Разработка тренажеров по тестированию дискретных систем <i>В.А. Мануилов</i> .....	249
Информационное и методическое обеспечение курса «Удаленный доступ к измерительному оборудованию комплекта NI ELVIS III» <i>А.М. Туктаров, К.А. Гергет</i> .....	256
Электронный учебный курс по основам работы с программно-аппаратной платформой NI ELVIS II+ <i>М.А. Черкашин, А.С. Духанов</i> .....	261
Тренажер «Минимизация конечных автоматов» <i>А.Р. Шайдуллин</i> .....	266

Разработка алгоритма изменения физиологического состояний персонажа в системе 3D-моделирования процессов эвакуации <i>И.Д. Шульга, Е.А. Юрченко</i> .....	275
3D-моделирование поведения людей при чрезвычайных ситуациях <i>И.Д. Шульга, Е.А. Юрченко</i> .....	282
Разработка программно-аппаратного комплекса для мониторинга почвенно-климатических параметров окружающей среды <i>М.С. Южаков, Д.И. Фильченко, А.К. Берзин, Д.А. Пидотова</i> .....	288
Клиент-серверное приложение для обмена текстовыми сообщениями в квантовой сети топологии точка-точка <i>Ф.А. Якименко</i> .....	293
Авторский указатель.....	299

*Секция 1*  
**Радиофизика и электроника**

## **ЗАТУХАНИЕ ЭВАНЕСЦЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В СЛОЕ МЕЖДУ ДВУМЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРИЗМАМИ**

**Г.А. Багреев**

*Научный руководитель: профессор, докт. физ.-мат. наук,  
В.П. Беличенко*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: covergan@gmail.com

**Аннотация.** Задача распространения эванесцентных электромагнитных волн в условиях нарушенного полного внутреннего отражения была рассмотрена Г. Нимтцем. По этой работе был сделан вывод о независимости времени прохождения волной промежутка между двумя призмами от его толщины, что приводит к нарушению положений специальной теории относительности. Г. Винфул оппонировал выводам Г. Нимтца с точки зрения классической теории поля. Получено точное выражение для оценки степени затухания эванесцентной волны на основании строгого аналитического решения данной задачи А.Б. Шварцбургом. Результирующие выражения подтверждают выводы Г. Винфула и уточняют его оценку для значений коэффициента пропускания.

**Ключевые слова:** эванесцентные волны, туннелирование, специальная теория относительности, сверхсветовые скорости, нарушенное полное внутреннее отражение.

**Введение.** Эффект нарушенного полного внутреннего отражения является изученным и известным в области оптики и спектроскопии. Физическое описание этого эффекта приводит к понятию «эванесцентной электромагнитной волны». Без полного рассмотрения физического описания этого феномена следует отметить, что одним из основных свойств этих волн является наличие затухания вдоль некоторых направлений в выбранной ориентации системы координат [1]. Этот факт имеет множество следствий, которые являются неинтуитивными относительно свойств

стандартных распространяющихся электромагнитных волн.

В 2007 году Г. Нимтцем и А. А. Стальхофеном была опубликована заметка о наличии возможного нарушения законов специальной теории относительности в эксперименте с явлением нарушенного полного внутреннего отражения в воздушном слое между двумя диэлектрическими призмами [2]. В этом эксперименте был рассмотрен эффект туннелирования эванесцентной электромагнитной волны, которая возникла при полном внутреннем отражении падающей волны от основания призмы, через воздушный слой между указанными призмами. В заметке был рассмотрен частотный диапазон радиоволн и было сделано утверждение о наличии эффекта мгновенного прохождения волны через воздушный слой. Схема данного эксперимента приведена на рис 1.

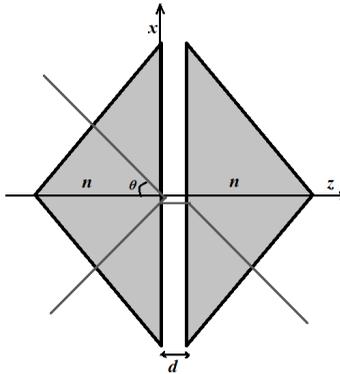


Рис. 1. Явление нарушенного полного внутреннего отражения в схеме эксперимента с двумя диэлектрическими призмами

Эта заметка вызвала критику со стороны Г. Винфула [3] и других авторов. Полученные Г. Нимтцем выводы привели к оживленному обсуждению и целым сериям статей различных авторов на данную тему. Г. Винфул подверг критике утверждение о возможности мгновенной передачи

энергии через слой между двумя призмами. Его контраргументация основывалась на неверной интерпретации авторами заметки результатов эксперимента. Вывод Г. Нимтца о квантовой природе эффекта был раскритикован на основании применимости классической электродинамики для описания результатов этого эксперимента. Также было подвергнуто сомнению заявление авторов заметки о результатах эксперимента, где расстояние между призмами превышало 50 мм.

Однако выводы Г. Винфула о степени затухания эванесцентной волны в воздушном слое основаны на упрощенной математической модели явления. Таким образом, возникает вопрос правильности выводов в заметке [3]. Целью данной статьи является проверка выводов Г. Винфула из заметки [3] на основании строгого решения данной задачи А. Б. Шварцбургом [4].

**Методы и материалы.** Г. Винфул рассматривал случай из заметки [2], где в эксперименте использовались следующие параметры:

$$f = 9,15 \text{ ГГц}, \theta = 45^\circ, n = 1.6, \quad (1)$$

здесь  $f$  – частота,  $\theta$  – угол падения волны,  $n$  – показатель преломления. Для расчета затухания эванесцентной волны было использовано следующее выражение для коэффициента пропускания:

$$|T| = \exp(-kd), \quad (2)$$

здесь  $k = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}$  – показатель поглощения,  $c$  – скорость света в вакууме,  $d$  – толщина воздушного слоя. Данный подход позволил оценить значение затухания электромагнитной волны в  $-0,88$  дБ/мм [3].

Для уточнения значений затухания по мощности были использованы более точные выражения [4]. А именно, коэффициент пропускания на основании выражений А. Б. Шварцбурга имеет следующий вид:

$$|T| = \frac{2 \cos \theta \sqrt{n^4 \sin^2 \theta - n^2}}{\cosh(kd) \sqrt{(2 \cos \theta \sqrt{n^4 \sin^2 \theta - n^2})^2 + \tanh^2(kd) (\cos^2 \theta - n^6 \sin^2 \theta - n^4)^2}}. \quad (3)$$

**Результаты и обсуждение.** Выражение (3) имеет более сложную структуру, чем выражение (2). Следует заметить, что при малых значениях ширины слоя  $d$  значения отличаются более чем в 10 раз. По оценке из выражения (3) можно увидеть, что затухание в слое шириной 1 мм составляет лишь  $-0.07$  дБ/мм. Однако, при численном расчете значений затухания по мощности было показано, что выражения из [3] дают достаточно точную оценку затухания эванесцентной волны при значениях толщины слоя более  $\sim 5-6$  мм. Кривые зависимостей значений коэффициента  $|T|^2$  от ширины слоя  $d$  приведены на рис 2.

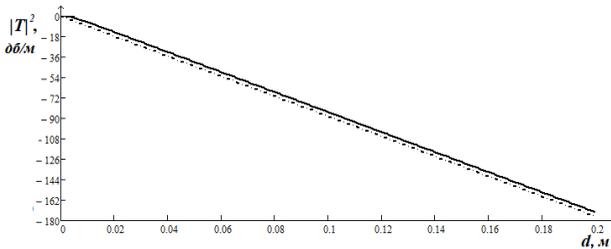


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента пропускания от толщины слоя. Сплошная линия – расчет по выражениям А. Б. Шварцбурга; штрих-пунктирная линия – расчет по выражениям Г. Винфула

**Заключение.** В результате исследования были уточнены выводы Г. Винфула. Показано, что результаты [3] дают достаточную качественную оценку затухания эванесцентной электромагнитной волны при больших толщинах воздушного слоя. Однако, при малых значениях  $d$  имеет место платообразный характер зависимости (3) (см. рис 2.). Таким образом, более строгое теоретическое описание явления из эксперимента в [3] не противоречит как результатам [2], так и специальной теории относительности, что согласуется с выводами Г. Винфула.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Jackson J.D. Classical Electrodynamics. – New York : Wiley, 1998. – 808 p.
2. Nimtz G., Stahlhofen A.A. Macroscopic violation of special relativity [Электронный ресурс] // arXiv.org. – 2007. – URL: <https://arxiv.org/abs/0708.0681> (дата обращения: 17.04.2021).
3. Winful H.G. Comment on "Macroscopic violation of special relativity" by Nimtz and Stahlhofen [arXiv:0708.0681v1] [Электронный ресурс] // arXiv.org. – 2007. – URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0709/0709.2736.pdf> (дата обращения: 17.04.2021).
4. Шварцбург А.Б. Туннелирование электромагнитных волн – парадоксы и перспективы // УФН. – М., 2007. – Т. 177, № 1. – С. 43–58.

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОДНОРОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Р.П. Гурский, А.И. Бердюгин**

*Научный руководитель: А.И. Бердюгин*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: bravo8172@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается проблема однородности при создании композиционных материалов на основе углеродных нанотрубок. Для контроля качества изготавливаемых образцов применена система ТГц диагностики неоднородностей материалов. При исследовании образцов материалов, в которых углеродные нанотрубки перемешаны с помощью ультразвука было выявлено, что композит получается более однородным, чем без ультразвуковой обработки.

**Ключевые слова:** ТГц, многостенные углеродные нанотрубки, однородность, имиджинг, визуализация.

**Введение.** В современном стремительно развивающемся мире инженерам приходится решать новые задачи, для реализации которых необходимо применение инновационных материалов. На данный момент активно исследуются и внедряются композиты на основе углеродных нанотрубок (УНТ). УНТ – это полая цилиндрическая структура, состоящая из свёрнутых листов графена. Многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) – это вложенные коаксиально друг в друга цилиндрические трубки.

Использование МУНТ в композитах увеличивает следующие показатели: прочность на растяжение, твёрдость, теплопроводные свойства, а также появляется возможность поглощать СВЧ излучение. Нельзя не отметить возможность создания материалов с углеродными включениями посредством аддитивных технологий [1]. Данные преимущества позволяют использовать МУНТ в сверх-

прочных нитях, изоляционных материалах в микроэлектронике, медицинских протезах и т.д.

При изготовлении композитов важно, чтобы он получался однородным. Однородность распределения МУНТ зависит от технологии производства композита. Следовательно, необходима система контроля однородного распределения МУНТ для выбора технологического процесса производства композитов.

Для контроля однородности применяют следующие методы диагностики: акустический, импедансный, резонансный, радиоволновой, терагерцовый (ТГц), рентгеновский, инфракрасный и др. Главным недостатком большинства методов является низкое пространственное разрешение диагностики, что делает исследование наноматериалов невозможным. Среди всех методов диагностики выделяется метод ТГц визуализации, которая имеет большее разрешение (0.1–1 мм), чем у большинства других методов и не обладает ионизирующим эффектом, свойственным рентгеновскому диапазону частот. При ТГц диагностике необходимо передвигать исследуемый образец в двумерной плоскости перпендикулярной квазиоптическому пучку. Исходя из этого необходимо использовать систему позиционирования. Целью работы является изучение неоднородности композитов при разных технологиях их изготовления.

**Методы и материалы.** В данном исследовании использовался композит на основе МУНТ и связующего вещества (эпоксидная смола). МУНТ были получены каталитическим газофазным осаждением этилена в присутствии  $\text{FeCO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Диаметр нанотрубок лежит в диапазоне 4-21 нм. Технология получения исследуемых композитных образцов № 1 и № 2 состоит из нескольких этапов. В эпоксидную смолу добавляется 1 масс. % МУНТ, затем в течении 5 минут смесь перемешивается. После чего образец № 2 обрабатывается в течении 5 минут при помощи ультразву-

кового (УЗ) технологического аппарата УЗТА-0.1/28-0 «Алёна» на частоте 28 кГц мощностью 75 Вт. Затем смесь полимеризуется в течении 48 часов при комнатной температуре. Образец № 1 после перемешивания не обрабатывался УЗ [2]. После полимеризации образцы были подвергнуты механической обработке. Толщина образца № 1 – 838 мкм, образца № 2 – 589 мкм.

Для контроля однородности изготавливаемых образцов применяется система ТГц диагностики неоднородностей материалов (рис. 1), интегрированная в квазиоптический тракт ТГц спектрометра СТД-21 [3, 4].

В качестве источника ТГц излучения использовался генератор на основе лампы обратной волны. Исследуемый образец, размещенный за диафрагмой механизма позиционирования системы ТГц диагностики, перемещался относительно квазиоптического диафрагмированного пучка (диаметром 2 мм) непрерывного излучения, генерируемого ЛОВ на частоте 874 ГГц. Мощность прошедшего через образец ТГц излучения регистрировалась оптоакустическим датчиком на основе ячейки Голея. Перемещение образца осуществлялось в двумерной плоскости методом «точка за точкой» с фиксированным шагом.

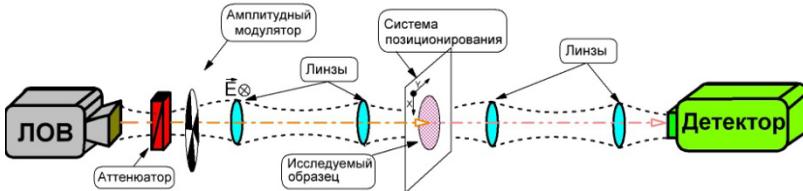


Рис. 1. Принципиальная схема измерительной системы на базе ТГц-спектрометра СТД-21

Для анализа степени однородности полученного ТГц изображения используется метод оценивания площадей неоднородностей. Сущность метода оценивания заключается в нахождении среднего электромагнитного отклика, с

дальнейшей локализацией участков образца, в которых электромагнитный отклик отличен от среднего значения. После чего вычисляется отношение локализованных участков к рассматриваемой площади.

**Результаты.** Полученные данные с детектора демонстрируют распределение интенсивности прошедшего через образцы № 1 и № 2 ТГц излучения. На рисунках 2 сверху (а, б, в) представлен образец № 1 без УЗ обработки. Снизу (а, б, в) – образец № 2 с УЗ обработкой длительностью 5 мин.

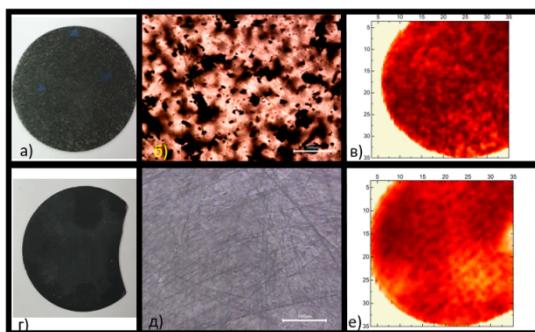


Рис. 2. Изображения образца № 1 (а, б, в) и № 2 (г, д, е): а, г) фото; б), д) микроскопия; в), е) ТГц визуализация с  $\lambda = 343$  мкм

На рисунке 2 видно, что образец № 2 с ультразвуковой обработкой имеет более однородную структуру, чем образец № 1 без обработки. Отношение площади неоднородности 1-го образца ко 2-му равняется 11,15. Отличия контрастности в ТГц изображении вызвана разной толщиной образца № 2, то есть отсутствие плоскопараллельности при финальной обработке перед непосредственным проведением натуральных экспериментов. На изображениях образца № 1 отчётливо видны пустоты и агломераты нанотрубок, которые сформировались в результате образования на стадии смешения композиционной смеси.

**Заключение.** В результате проведённых исследований было показано, что технологический процесс, включающий в себя УЗ обработку, позволяет получать более однородное распределение МУНТ в композите, чем без УЗ. Показана возможность использования ТГц-системы визуализации на базе генератора обратной волны для оценки однородности при производстве композитов с несоразмерными включениями.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90125.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Anisotropy of electrical properties of 3D-printing MWCNT composites at the THz frequency range / A.V. Badin et al. // 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). – IEEE, 2018. – P. 1–2.
2. Kuleshov G.E., Badin A.V. Study of electromagnetic characteristics of polymer materials based on single-walled and multi-walled carbon nanotubes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing – 2019. – Vol. 525, No. 1. – 012030.
3. Badin A.V., Berdyugin A.I., Vigovskii V.Y., Dunaevskii G.E. System of automated measurement of electromagnetic response of anisotropic materials in quasi-optical beams // 18<sup>th</sup> International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2017. – P. 301–304.
4. Zhakupov S.N., Badin A.V. Detection of hidden images based on contrast of intensity distribution of terahertz radiation // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2018. – P. 141–143.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОВОЛНОВОЙ СИСТЕМЫ ДОСМОТРА ЧЕЛОВЕКА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

**М.А. Димов**

*Научный руководитель: докт. физ.-мат. наук, С.Э. Шипилов*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: nasa300@mail.ru

**Аннотация.** Работа посвящена моделированию радиоволновой системы досмотра человека в реальном времени. На базе существующих решений в качестве приемно-передающего элемента был выбран радиолокационный чип IWR6843, который является перспективным для использования в системе радиовидения реального времени. В работе представлены результаты моделирования решения прямой и обратной задачи радиовидения на основе планарной матрицы, состоящей из 225 чипов IWR6843.

**Ключевые слова:** радиоволновое зондирование, система досмотра, сканирование в реальном времени, метод Столта.

**Введение.** Одной из важнейших проблем, стоящих перед государством, является обеспечение безопасности в местах массового скопления людей. В настоящее время для предотвращения террористических актов в таких местах используются радиоволновые и рентгеновские системы досмотра пассажиропотока для обнаружения скрытых под одеждой запрещённых предметов. Недостатком существующих систем является необходимость остановки пассажира на несколько секунд (от двух до пяти секунд в зависимости от системы досмотра) для осуществления сканирования [1-3]. Это замедляет пассажиропоток, особенно в местах массового скопления людей (метро, аэропорты и др.). Поэтому на сегодняшний день существует потребность в создании систем досмотра пассажиров, работающих в режиме реального времени. Целью работы является оценка разрешающей способности радиоволновой систе-

мы, смоделированной на основе планарной матрицы, состоящей из 225 чипов IWR6843.

**Методы и материалы.** Для решения проблемы радиовидения в реальном времени необходимо решить несколько последовательных задач. Первая задача состоит в выборе метода решения обратной задачи. Вторая задача заключается в анализе существующих на рынке радиоэлектронных компонентов решений и выборе перспективной системы излучения и приёма радиоволн, обеспечивающей работу в режиме реального времени. Третья задача – рассмотрение возможности создания матрицы из таких датчиков, для получения радиоизображения с высоким разрешением.

В качестве метода решения обратной задачи использовался метод Столта [4]. Он является одним из наиболее быстродействующих методов восстановления радиоизображения, так как для его реализации используется быстрое преобразование Фурье.

Для решения второй задачи был проведён обзор существующих готовых предложений, доступных на рынке. По итогам обзора был выбран чип IWR6843. Он имеет 4 приёмника и 3 передатчика, полосу частот от 60 до 64 ГГц и размеры 15 мм на 15 мм.

Для моделирования радиоволнового зондирования с помощью ранее упомянутого чипа в среде Mathcad был реализован метод Столта. В качестве тестового был выбран объект из двух точек, удалённых друг от друга на 2,6 мм. Расстояние до объекта задавалось равным 10 см.

При оценке разрешающей способности по дальности использовался критерий Рэлея, который гласит, что две точки являются различимыми, если «провал» мощности между максимумами составляет 50% мощности в максимуме. Для оценки разрешающей способности по дальности нужно построить график распределения мощности в срезе радиоизображения и оценить величину «провала» мощно-

сти между максимумами. Разрешающая способность по глубине  $\Delta z$  определялась по формуле  $\Delta z = \frac{c}{\Delta f}$ , где  $\Delta f$  – полоса частот, в которой работает система,  $c$  – скорость света.

**Результаты.** Была смоделирована матрица, соответствующая датчикам чипа IWR6843. Чип содержит 4 приёмника и 3 передатчика, которые образуют антенную решётку (рис. 1а). Голубой пунктирной линией обозначены границы чипа.

В ходе работы проводилось моделирование матрицы датчиков, имеющей 15 строк и 15 столбцов (рис. 1б). Таким образом, количество элементов составило 225 штук. Для данной матрицы решались прямая и обратная задачи радиовидения с целью определения разрешающей способности радиоизображения.

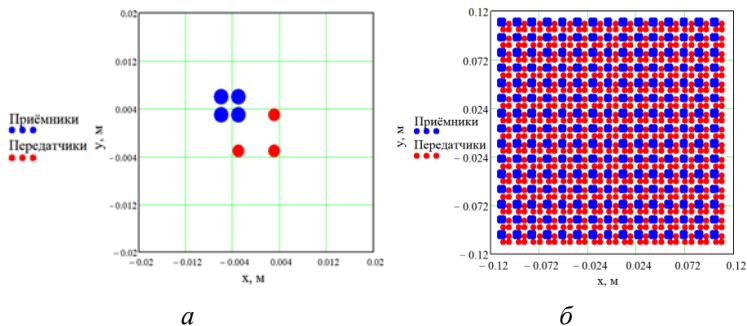


Рис. 1. Схема антенной решётки, реализованной в чипе IWR6843 (а) и схема расположения датчиков (б)

Модель тестового объекта представлена на рис. 2а. В ходе решения прямой задачи были рассчитаны радиолокационные сигналы, отражённые от объекта (рис. 2б). Восстановленное радиоизображение представлено на рис. 3а.

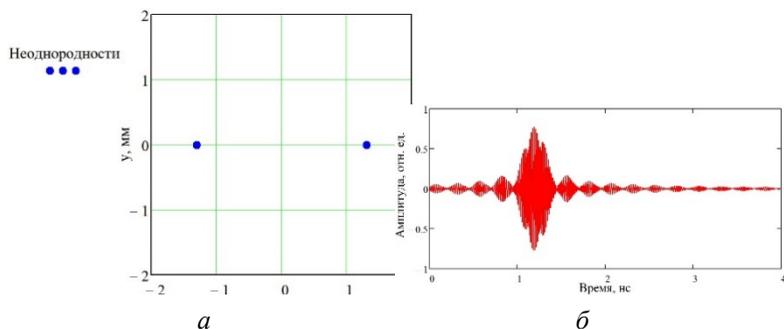


Рис. 2. Модель тестового объекта (а) и отраженный от объекта сигнал (б)

По срезу радиоизображения в поперечном направлении оценивалась разрешающая способность (рис. 3б). Так как при расстоянии между точками 2,6 мм радиоизображение удовлетворяет критерию Рэля, был сделан вывод, что разрешающая способность по дальности составляет 2,6 мм. Разрешающая способность по глубине составила 37,5 мм.

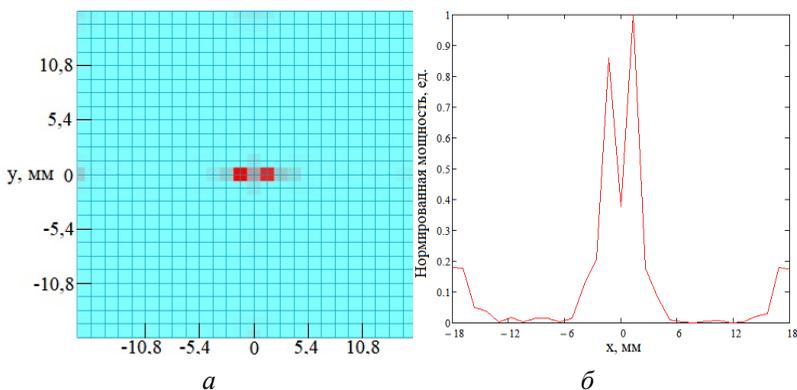


Рис. 3. Радиоизображение тестового объекта (а) и нормированное распределение мощности в поперечном срезе радиоизображения (б)

**Заключение.** В ходе работы была смоделирована радиоволновая матрица из 15 строк и 15 столбцов. Каждый элемент матрицы имел характеристики, соответствующие

чипу IWR6843. С использованием метода Столта было рассчитано радиоизображение, а также проведена оценка его разрешающей способности по дальности (2,6 мм) и по глубине (37,5 мм).

Полученные результаты говорят о перспективности и реальной возможности использовать подобные чипы для систем радиовидения реального времени.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Радиоволновый сканер «Provision» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.bnti.ru/des.asp?itm=4928&tbl=03.06>. (дата обращения: 06.05.2021)
2. © Rohde & Schwarz; R&S®QPS Сканер быстрого индивидуального досмотра [Электронный ресурс] / URL: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/QPS201\\_bro\\_ru\\_3606-7160-18\\_v0301.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/QPS201_bro_ru_3606-7160-18_v0301.pdf) (дата обращения: 06.05.2021)
3. Leidos SafeView PB [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.leidos.com/sites/g/files/zoouby166/files/2020-07/fs-leidos-safeview.pdf> (дата обращения: 06.05.2021)
4. Обратные задачи радиофизики / С.Э. Шипилов, В.П. Якубов. – Томск : Изд-во НТЛ, 2016. – 162 с.

## ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

**А.И. Еремеев, А.Т. Жукжанова**

*Научный руководитель: докт. физ.-мат. наук, С.Э. Шипилов*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

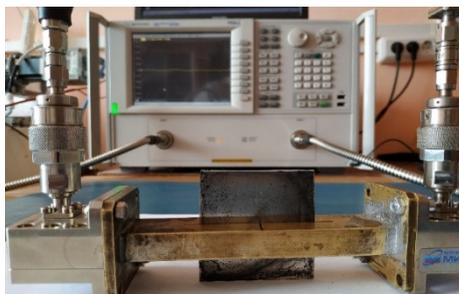
E-mail: [azhukzhanova@gmail.com](mailto:azhukzhanova@gmail.com)

**Аннотация:** Каждый материал обладает набором электрофизических свойств и параметров, которые характеризуют его поведение в переменных электрических и магнитных полях. Данная работа посвящена разработке и тестированию метода для измерения электрофизических свойств тонколистовых материалов. В качестве датчика использовался резонатор на отрезке прямоугольного волновода. Измерения проводились при помощи векторного анализатора цепей PNA N5230C Agilent Technologies на частоте 9 ГГц. Для разработанного метода не требуются идеально согласованные коаксиально-волновые переходы, а также есть возможность измерить мнимую часть диэлектрической проницаемости материалов с малыми потерями.

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, резонанс, волновод.

**Введение.** В настоящий момент интенсификация производства требует оперативного и точного контроля параметров технологических процессов, свойств материалов и продукции. Каждый материал обладает набором электрофизических свойств и параметров, которые характеризуют его поведение в переменных электрических и магнитных полях. Точное знание электрофизических параметров материала является большим преимуществом при выполнении разнообразных разработок, тем более на высоких частотах, ввиду большой чувствительности параметров к размерам элементов. Целью настоящего исследования является разработка и тестирование метода измерения диэлектрической проницаемости тонких листовых материалов.

**Методы и материалы.** В работах [1–3] показано, что для измерений диэлектрических свойств материалов могут использоваться короткозамкнутые отрезки волновода (метод короткого замыкания), при этом измеряется входное сопротивление. В случае отрезка волновода, разомкнутого с обоих концов в роли непосредственно измеряемой величины, выступает коэффициент прохождения. В данной работе для измерения электрофизических свойств тонколистовых материалов в качестве датчика использовался резонатор на отрезке прямоугольного волновода. Для введения исследуемого материала в резонатор в широких стенках волновода профрезерованы продольные щели длиной 65 мм и шириной 1 мм. Для создания элементов связи, необходимых для включения резонатора в измерительную установку, использовались латунные прокладки между фланцами отрезков волноводов и коаксиально-волноводными переходами.



*Рис. 1. Измерительная установка*

Для проверки предложенного метода проводились измерения диэлектрической проницаемости материалов с известными характеристиками: плексиглас толщина 0,95 мм, текстолит толщина 0,84 мм.

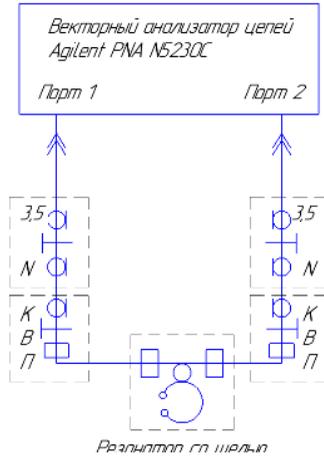


Рис. 2. Схема измерительной установки

В ходе измерений находились резонансная частота резонатора без образца и с образцом, а также ширина резонансной кривой на уровне  $-3$  дБ от максимума. На основе полученных измерений вычислялись вещественная и мнимая части диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon' = \frac{2}{k_0 d} \cdot \frac{\xi}{\operatorname{tg} K \xi} + \left( \frac{\gamma'}{k_0} \right)^2$$

$$\varepsilon'' = 2\eta \left( \frac{b-d}{2} \cdot \frac{1 + \operatorname{tg}^2 K \xi}{\operatorname{tg}^2 K \xi} \right)$$

где  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{рез}}}$  – волновое число,  $d$  – толщина пластины,

$$K = k_0 \frac{b-d}{2}, \quad \xi = \sqrt{1 - \left( \frac{\gamma'}{k_0} \right)^2}, \quad \eta = \frac{\gamma' \gamma''}{k_0^2},$$

Для математической обработки полученных данных разработано программное обеспечение в системе MathCad.

**Результаты.** В ходе измерений с использованием векторного анализатора цепей находились резонансные частоты резонатора без образца и с образцом, а также «ширины» резонансных кривых на уровне 3 дБ ниже значения резо-

нансных кривых в максимуме. При введении образца в волновод происходит сдвиг резонансной частоты и изменение ширины резонансной кривой (рис. 3).

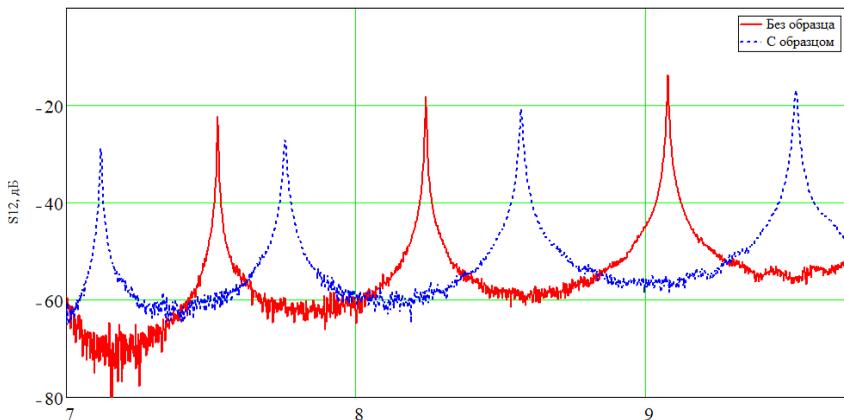


Рис. 3. Коэффициент передачи резонатора с образцом и без него

С использованием предложенного метода данные с векторного анализатора цепей пересчитывались в диэлектрическую проницаемость исследуемого материала. Таким образом были получены значения диэлектрической проницаемости следующих материалов. Плексиглас:  $\epsilon' = 2,46$ ;  $\epsilon'' = 0,016$ . Тефлон:  $\epsilon' = 2,18$ ;  $\epsilon'' = 0,0004$ . Результаты измерения параметров выбранных материалов описанные в работе [4] плексиглас  $\epsilon' = 2,5$ ;  $\epsilon'' = 0,017$ , тефлон  $\epsilon' = 2,2$ ;  $\epsilon'' = 0,0004$ .

После анализа полученных результатов следует вывод, что результаты, полученные с использованием предложенного метода, отличаются не более чем на 1,5 % от результатов известных из литературы.

**Заключение.** В ходе данного исследования был предложен и протестирован резонансный метод измерения диэлектрической проницаемости тонколистовых материалов

на основе волновода с продольной щелью в широкой стенке. Для этого метода не требуются идеально согласованные коаксиально-волновые переходы, а также есть возможность измерить мнимую часть диэлектрической проницаемости материалов с малыми потерями.

*Выражается особая благодарность за неоценимый вклад в проведение исследований Завьялову Арнольду Семёновичу.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Завьялов А.С., Дунаевский Г.Е. Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах. – Томск : ТГУ, 1985. – 214 с.
2. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М. : ГИФМЛ, 1963. – 404 с.
3. Kuek C.Y. Measurement of Dielectric Material Properties: application note. – Singapore : Rohde-Schwarz, 2012. – 36 p.
4. Zhekov S.S., Franek O., Pedersen G.F. Dielectric properties of common building materials for ultrawideband propagation studies // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2020. – Vol. 62, No. 1. – P. 72–81.

## **РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ СБОРА ДАННЫХ ОБ УРОВНЕ pH ВОДЫ «УСКД-АКВА»**

**В.А. Казанин, Е.В. Ланин**

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, Г.Е. Кулешов*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: kazanin\_2013@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящена разработке устройства для сбора данных и контроля параметра pH водных источников. Приведён концепт построения сети устройства для сбора и передачи параметров воды. Для измерения уровня pH жидких сред использовался аналоговый датчик «SKU SEN0161 v.1.0» с микроконтроллером ATmega328P. Проведена коммутация компонентов, написан программный код, проведена калибровка измерительного комплекса. Проведена апробация измерительного устройства на жидкостях с разным уровнем pH. Полученные результаты соответствуют предполагаемому уровню кислотно-щелочного баланса исследуемых жидкостей.

**Ключевые слова:** pH-метр, кислотно-щелочной баланс, датчик, ATmega328P.

**Введение.** Проверка состояния водоисточников является актуальной задачей экологического контроля. Вода необходима для выживания человека, поэтому её качество должно контролироваться [1–2]. Уровень активности ионов водорода в воде является одним из важнейших факторов, влияющих на качество жидкости. Именно от этого критерия зависит уровень кислотно-щелочного баланса, определяющийся показателем pH. Шкала показателей pH варьируется в диапазоне от 0 до 14. Если pH воды менее 7, то она является кислой, а если более 7 – щелочной. По изменению показателя pH можно судить о сбросах отходов в водоём, о пригодности среды для обитания рыб и водорослей, а также пригодности воды для различных человече-

ских потребностей (питьевая вода, промышленная и др.) [3–4].

Цель работы состоит в разработке устройства для сбора данных и контроля параметра рН водных источников природного и искусственного происхождения.

**Методы и материалы.** Для определения показателя рН используют рН-метр, который содержит в себе два электрода (измерительный и сравнительный). При измерении жидких сред между этими электродами возникает разность потенциалов. Вычисляемая величина ЭДС пропорциональна активности ионов водорода – рН.

Для сбора рН параметра был выбран аналоговый датчик рН-метр «SKU SEN0161 v.1.0». Планируется, что этот рН-метр будет работать совместно с набором других датчиков, которые в совокупности образуют устройство сбора климатических данных водных источников («УСКД-Аква») (рис. 1).

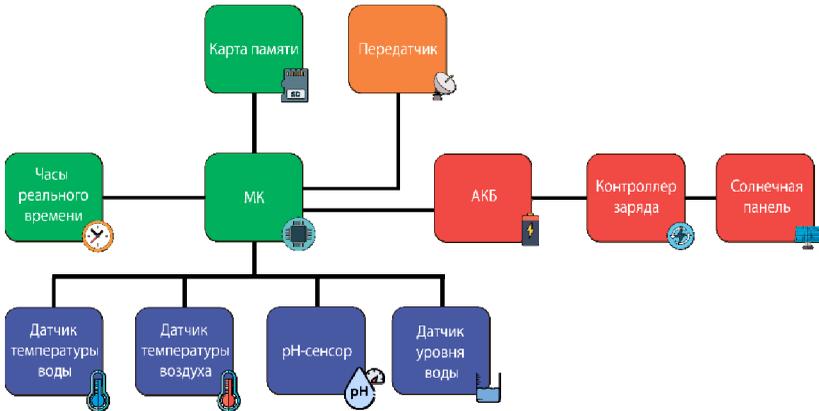


Рис. 1. Блок-схема УСКД Аква

Устройство «УСКД-Аква» можно разделить на группы составляющих его компонентов. Первая группа состоит из измерительных датчиков: датчики измерения температуры

воды и воздуха (DS18B20), так как температура воды влияет на величину pH; датчик pH (SKU SEN0161 v.1.0); датчик определения уровня воды (ультразвуковой дальномер HC-SR04), который будет определять глубину погружения pH-метра в жидкость. Вторая группа отвечает за обработку и запись данных: микроконтроллер ATmega328P; часы реального времени и карта памяти для записи результатов измерений. В третью группу входит приемопередатчик E19-868M20S на базе чипа Semtech SX1276 для передачи полученных данных в базовую станцию с последующей передачей на веб-интерфейс, на котором в последствии можно будет посмотреть результаты измерений. Последняя группа отвечает за питание и подзарядку устройства: аккумулятор (форм-фактор 18650); модуль заряда аккумулятора и солнечная панель для автономной подзарядки.

Для калибровки разработанного измерительного устройства использовались жидкости с заданным уровнем pH: 4,01, 7,00, 10,01 при 25 °С. Они были получены при разведении набора специальных буферных порошков в дистиллированной воде. На основе данных измерения растворов с заданным уровнем pH была построена калибровочная кривая и определены поправочные коэффициенты. Также для последующих измерений был изготовлен набор жидких образцов: 1) вода из-под крана; 2) вода марки «Ключевая вода»; 3) вода марки «Ключевая вода» с добавлением 5 грамм лимонной кислоты; 4) вода марки «Ключевая вода» с содой.

**Результаты.** График непрерывного по времени измерения буферных растворов представлен на рисунке ниже (рис. 2).

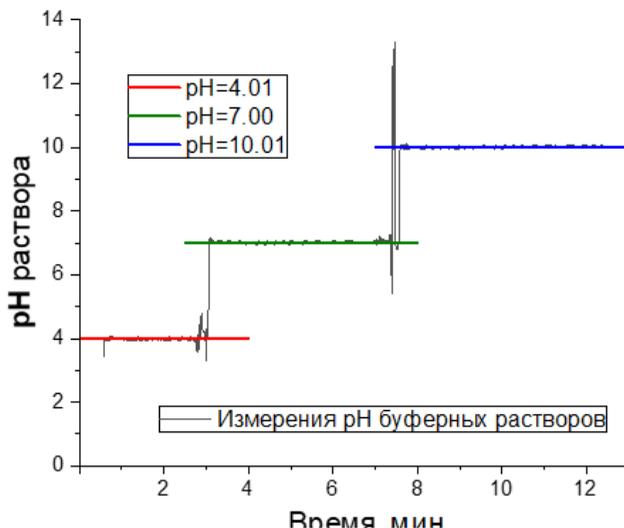


Рис. 2. Процесс измерения уровня pH буферных растворов

Из представленного графика видно, что результаты измерений датчиком pH совпадают с заданными значениями буферных растворов, но имеются небольшие отклонения pH порядка 0,1, связанные с погрешностью датчика и температурными флуктуациями.

После калибровки датчика pH были проведены измерения ранее изготовленных образцов жидкостей с разным уровнем pH (рис. 3). Каждый образец воды имеет соответствующий уровень pH. Вода из-под крана и вода марки «Ключевая вода» имеют pH около 7, что указывает на баланс между щелочью и кислотой. Так, образец жидкости на основе воды марки «Ключевая вода» с добавлением 5 грамм лимонной кислоты имеет уровень pH порядка 2,3, что указывает на повышенную кислотность. А «Ключевая вода» с содой имеет значение pH порядка 9,1 – щелочная жидкость. Также, в начале измерения необходимо некоторое время, которое составляет порядка 25-50 секунд, для завершения переходных процессов.

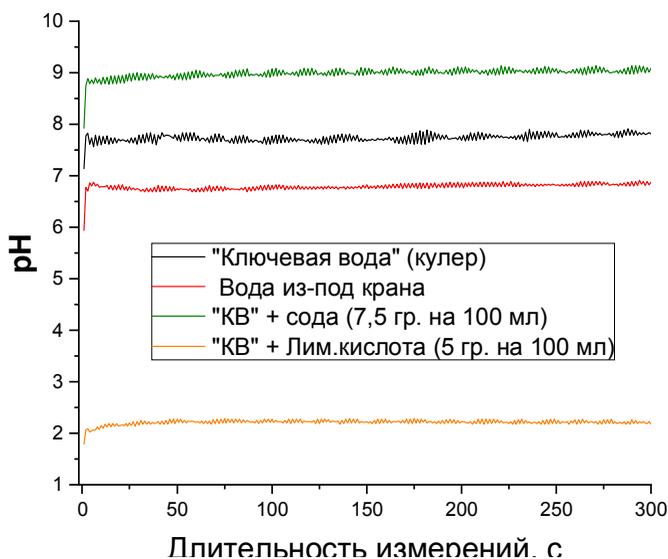


Рис. 3. Измерения уровня pH различных жидкостей

**Заключение.** Было разработано и испытано устройство для сбора и контроля параметров pH жидких сред на базе микроконтроллера ATmega328P. На буферных растворах с заданным pH был откалиброван pH-метр; проведена апробация измерительного устройства на жидкостях с разным уровнем pH. Результаты измерений показали, что жидкости с повышенной кислотностью соответствовал уровень pH значительно ниже 7, а жидкости с содой – выше 7.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шигаева Т.Д., Поляк Ю.М., Кудрявцева В.А. Окислительно-восстановительный потенциал как показатель состояния объектов окружающей среды // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 111–124.
2. Evaluation of the possibility of using remote methods for the classification of water sources for specific electrical conductivity / V.I. Suslyayev, V.A. Zhuravlev, E.I. Korovin et al. // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2018. – No. 1083333.

3. Шаяхметова С.Г. Окислительно-восстановительный потенциал воды Патраковского инфильтрационного водозабора // Башкирский химический журнал. – 2007. – Т. 14, № 2. – С. 118–120.
4. Мишанов А.П., Маркова А.Е. Оценка энергоэкологичности электрохимической активации при подготовке питательных растворов в светокультуре // Теоретический и научно-практический журнал. – 2019. – Т. 19, № 98. – С. 60–71.

# **СОЗДАНИЕ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ ПОСТОЯННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ**

**Д.Н. Кирсанов**

*Научный руководитель: канд. техн. наук, Д.В. Вагнер*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: danil.kirsanov2000@yandex.ru

**Аннотация.** В настоящее время активное увеличение количества высокочастотной электроники приводит к возрастанию воздействия электромагнитного фона на биологические объекты сверх допустимых норм, в целях уменьшения которого активно создаются магнитные композиционные радиоматериалы, совершенствуются старые и разрабатываются новые методы их изготовления.

Одним из наиболее эффективных методов изготовления магнитных композитов является магнитное текстурирование композиционного полимера путем полимеризации его в постоянном магнитном поле, что позволяет получить равномерное распределение частиц магнитного наполнителя во всем объеме композита.

Основной проблемой при реализации данного метода является сложность контроля и поддержания постоянства величины магнитного поля в рабочей области процесса полимеризации магнитного композиционного материала.

Для решения проблемы следует создать систему контроля за величиной напряженности постоянного магнитного поля в воздушном зазоре постоянных электромагнитов.

В данной работе, в целях изучения возможности осуществления контроля напряженности магнитного поля, описан первый этап создания системы – сборка прототипа системы на базе Arduino UNO, двух датчиков Холла и символьного дисплея LCD1602A.

**Ключевые слова:** датчик Холла, Arduino, напряженность магнитного поля, магнитные композиционные материалы, текстурирование, постоянные электромагниты.

**Введение.** В настоящее время активное увеличение количества высокочастотной электроники приводит к возрастанию воздействия электромагнитного фона на биологические объекты сверх допустимых норм, в целях уменьшения которого активно создаются магнитные композиционные радиоматериалы [1, 2], совершенствуются старые и разрабатываются новые методы их изготовления. К таким методам относятся: термическое воздействие [3], механическая обработка исходных компонентов при помощи планетарных вибрационных мельниц [4], изменение стехиометрии материала [5], магнитное текстурирование и другие.

Одним из наиболее эффективных методов изготовления магнитных композитов является магнитное текстурирование композиционного полимера путем полимеризации его в постоянном магнитном поле, что позволяет получить равномерное распределение частиц магнитного наполнителя во всем объеме композита. В работе [6] метод магнитного текстурирования применялся в процессе полимеризации гексагонального феррита Z-типа, что позволило увеличить значения действительной и мнимой части магнитной проницаемости в диапазоне частот 0,1–14 ГГц. Метод реализован при помощи помещения материала в магнитное поле, созданного в воздушном зазоре постоянных электромагнитов.

Основной проблемой при реализации данного метода является сложность контроля и поддержания постоянства величины магнитного поля в рабочей области процесса полимеризации магнитного композиционного материала. Непостоянство напряженности может привести к неоднородному распределению частиц магнитной фазы и привести значения действительной и мнимой части магнитной проницаемости к малым величинам.

Для решения проблемы следует создать систему контроля за величиной напряженности постоянного магнитного поля в воздушном зазоре электромагнитов (далее – система контроля).

В данной работе, в целях изучения возможности осуществления контроля напряженности магнитного поля, описан первый этап создания системы – изыскания методов и создание прототипа.

**Методы и материалы.** В целях решения поставленной задачи проведены поиск и обзор видов датчиков магнитных полей. Для контроля величин напряженности постоянного магнитного поля необходимо организовать измерение количественных характеристик магнитного поля с помощью аналоговых датчиков на основе эффекта Холла. Этот эффект состоит в том, что в проводнике с постоянным током, помещенном в магнитное поле, возникает поперечная разность потенциалов.

Проведя анализ рынка по стоимости заводских датчиков Холла и производственных микроконтроллеров, принято решение реализовать прототип системы на базе конструктора Arduino. Схема прототипа представлена на рис. 1.

Измерение количественных характеристик магнитного поля проводится двумя датчиками Холла SS49E, размещённых на готовых платах KY-024 серийного производства конструктора Arduino (далее датчики). Датчики размещаются в воздушном зазоре между двумя постоянными электромагнитами установки для текстурирования магнитных диэлектриков [7]. Цифровые выходы обоих датчиков могут показать наличие магнитного поля с напряжённостью выше порогового значения, на которое настроен датчик, но не дадут количественных характеристик, по которым нужно непрерывно следить за изменением значения напряжённости магнитного поля. Именно поэтому в системе используются аналоговые датчики.

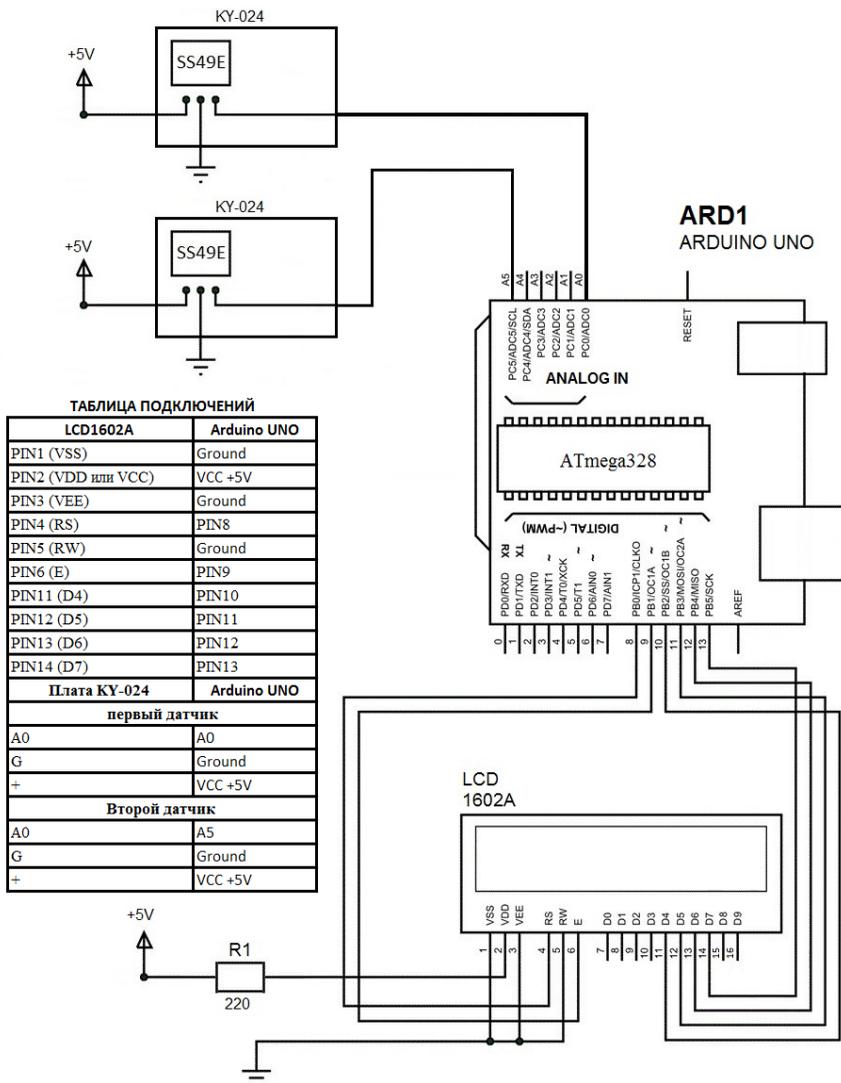
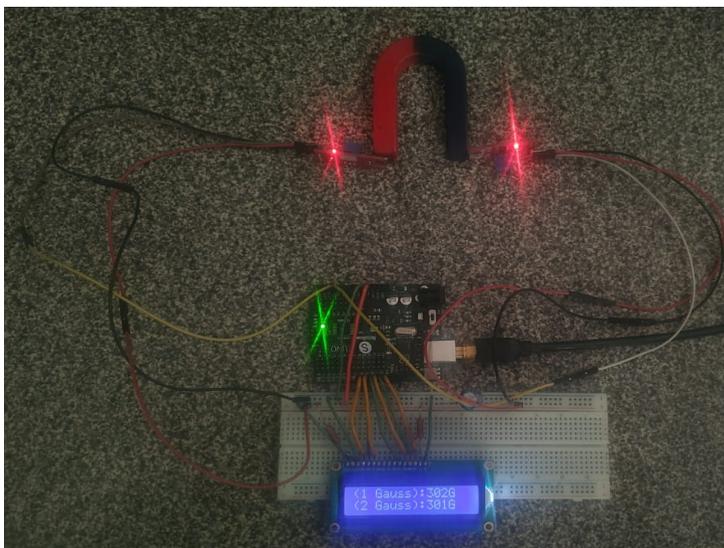


Рис. 1. Принципиальная схема прототипа системы контроля

С них данные в мВ поступают на два аналоговых входа платы Arduino. Согласно DataSheet на датчик Холла SS49E выходные показания датчика изменяются линейно 1,4 мВ

на 1 Гс, пришедшие значения пересчитываются в Гаусс [Гс]. Показания обоих датчиков отображаются на символьном дисплее LCD1602A.

**Результаты.** Собран прототип системы контроля величины напряженности постоянного магнитного поля в воздушном зазоре постоянных электромагнитов. Значения с аналоговых выходов датчиков отображаются на дисплее рис. 2.



*Рис. 2. Собраный прототип системы контроля*

Для калибровки датчиков использовался постоянный магнит с максимальным значением напряжённости магнитного поля 30 миллитесла [мТ], измеренным поверенным Миллитесламетром портативным универсальным (далее – ТПУ). Зарегистрированы показания датчиков прототипа 302 Гс и 301 Гс. Переведем значения датчиков в мТ (1 Гс = 0,1 мТ) и получим результаты измерений первого датчика = 30,1 мТ, второго датчика = 30,2 мТ что соответствует показаниям ТПУ.

**Заключение.** Изучены методы измерения напряженности магнитного поля, проведены изыскания подходящих под задачу датчиков. В результате проведенных исследований собран прототип системы измерения величины напряженности магнитного поля в воздушном зазоре постоянных электромагнитов с использованием платы Arduino UNO и датчиков Холла. Датчики откалиброваны с помощью лабораторного постоянного магнита и поверенного прибора Миллитесламетра портативного универсального (ТПУ).

В дальнейшем планируются провести измерения на действующей установке, организовать вывод значений напряженности на дисплей в мТ, внедрить визуальное и звуковое оповещение оператора установки об изменении напряженности магнитного поля до недопустимых значений, проектирование и изготовление корпуса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Акулов М.А., Кулешов Г.Е. Защитные покрытия на основе композиционных радиоматериалов для снижения уровня электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне // Актуальные проблемы радиофизики. Труды Международной молодежной научной школы / под ред. О.А. Доценко. – Томск : Издательство НТЛ, 2017. – С. 9–12.
2. Кулешов Г.Е., Суслиев В.И. Защитные экраны на основе порошков гексаферритов и углеродных наноструктур для снижения уровня СВЧ-излучения микроволновых устройств // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8–2. – С. 305–307.
3. Вагнер Д.В. Исследование методов создания радиоматериалов с управляемыми электромагнитными свойствами // Актуальные проблемы радиофизики. Труды Международной молодежной научной школы / под ред. О.А. Доценко. – Издательство : Издательство НТЛ, 2017. – С. 18–28.
4. Микроволновые характеристики композиционных смесей, содержащих наноразмерные порошки сегнетоэлектриков и ферритов / О.А. Доценко, В.И. Суслиев, Д.В. Вагнер и др. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2–2 (26). – С. 59–62.

5. Доценко О.А., Вагнер Д.В., Кочеткова О.А. Исследование электромагнитных характеристик порошков мультиферроиков в частотном диапазоне 3-12 ГГц // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8–2. – С. 179–180.
6. Влияние внешнего магнитного поля на структуру и электромагнитные характеристики композита, содержащего бариевый феррит Z-типа / О.А. Доценко, К.О. Фролов, К.В. Дорожкин и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т. 61, № 10 (730). – С. 119–123.
7. Устройство для текстурирования магнитных диэлектриков постоянным магнитным полем : патент на полезную модель RU 165067 U1 / О.А. Доценко, В.И. Суслиев, В.А. Журавлев и др. – 10.10.2016. Заявка № 2015156023/07 от 28.12.2015.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОТКЛИКА ОТ УВЛАЖНЕННОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЧВЕННОЙ СТРУКТУРЫ

**С.С. Коломоец**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук,  
В.И. Сусяев*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: lano96@mail.ru

**Аннотация.** В статье приведена оценка отражающих свойств двухслойной почвенной структуры по результатам моделирования величин комплексной диэлектрической проницаемости по теории Дебая и соотношениям Стогринна на частотах 10, 20 и 40 ГГц.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, почвенный покров, диэлектрическая проницаемость, коэффициент отражения, математическое моделирование.

**Введение.** В настоящее время методы микроволнового аэрокосмического зондирования активно используются для решения задач мониторинга влажности и температуры талых и мерзлых почв. При этом приходится решать обратные задачи электродинамики, которые, как известно, относятся к разряду некорректных задач и имеют множество решений. Амплитуда и фаза отраженного сигнала (при активном зондировании) и испускаемого поверхностью (при пассивном зондировании) сигнала зависят от многих параметров, среди которых определяющим являются величины комплексной диэлектрической проницаемости (КДП), диэлектрической проницаемости (диэлектрической проницаемости), глубина проникновения электромагнитного излучения. При этом необходимо учитывать частотную дисперсию КДП в диапазоне наиболее часто используемом для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), зависи-

мость от количества проводящих примесей и температуры. Решение прямой задачи определения коэффициента отражения от двухслойной почвенной структуры с использованием экспериментально полученных значений КДП, задаваемыми толщинами слоев и дизайна может снять неопределенность при использовании микроволновых методов ДЗЗ. Достоверность полученных результатов определяется корректность выбора моделей, учитывающих особенности исследуемых образцов.

Почвенный покров в Западной Сибири представляет собой слоистую структуру: растительный, торфяной, песчаный или глинистый, вечномерзлотный. Электрофизические характеристики каждого слоя могут изменяться в широких пределах при изменении температуры, при изменении агрегатного состояния воды, при переходе воды из одного состояния в другое. Задача усложняется при учете изменения толщин слоев, что вызывает затруднения при дешифровании результатов ДЗЗ из-за неоднозначности связи электромагнитного отклика с геометрическими и электрофизическими характеристиками изучаемого объекта, что характерно для решения обратных задач. Математическое моделирование позволяет рассмотреть возможные сценарии формирования отраженного или излученного сигнала при различных сочетаниях строения почвенного покрова и изменения электрофизических характеристик элементов.

В данной работе моделирование отражающих свойств двухслойной почвенной структуры проводится с использованием теории Дебая для полярных жидкостей с учетом соотношений Стогринна, учитывающих наличие проводящих примесей и теории, предложенных Бреховских Л.М. для описания волновых процессов в слоистых средах [1].

**Материалы и методы исследования.** Почвенные образцы забирались со станций «Ханымей» и «Кайбасово»,

которые входят в состав уникальной научной установки ТГУ «Мегаустановка» [2]. Конденсаторным (на низких частотах) и коаксиальным (в СВЧ диапазоне) методами измерены величины КДП сухих почв и мха. Удельная электропроводность образцов водных источников  $\sigma$  измерялась кондуктометрическим (на низких частотах) и диэлькометрическим (на СВЧ) методами. Полученные результаты использовались для моделирования коэффициентов отражения для различных толщин почвенных слоев с разной степенью увлажнения с учетом температуры.

Для моделирования температурных спектров КДП воды тестовых участков выбрана модель Дебая с учетом соотношений Стогринна [3], которая позволяет рассчитать спектры в температурном диапазоне с учетом удельной электропроводности.

$$\dot{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + j2\pi f\tau} - j \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0 f}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_{\infty}$  – высокочастотная диэлектрическая проницаемость,  $\tau$  – время релаксации;  $\epsilon_s$  – статическая диэлектрическая проницаемость, представляющая собой низкочастотный предел величины;  $\sigma$  – ионная проводимость;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $f$  – частота электромагнитных колебаний  $j$  – мнимая единица

Вычисление КДП воды на заданных частотах и удельной проводимостью и коэффициентов отражения от модельных объектов производились в среде *MathCad*.

**Результаты и обсуждения.** Результаты измерения показали слабую частотную и температурную зависимости КДП сухих почв и мха, вплоть до 40 ГГц. Основной вклад в КДП влажных почв вносит водные фракции, измеренные удельные электропроводности которых равны: вода атмосферных осадков –  $\sigma_{\text{атмосф}} = 18$  мкСм/см; вода термокарстовых озер –  $\sigma_{\text{термок}} = 460$  мкСм/см. Удельная электропро-

водимость дистиллированной воды, измеренной для контроля –  $\sigma_{\text{дист}} = 4,99$  мкСм/см.

По формуле (1) и соотношениям модели Стогринга рассчитаны спектры КДП воды, образованной атмосферными осадками, в диапазоне частот от 0,01 до 40 ГГц и интервале температур 0 – 30°C.

Рассмотрено несколько вариантов строения почвенного покрова тестовых станций «Ханымей» и «Кайбасово» для получения математических моделей, описывающих электромагнитный отклик от некоторых комбинаций характерных для этих участков видов покрытия.

Коэффициент отражения электромагнитной энергии от многослойной структуры рассчитывался по формуле [3]:

$$R = \frac{Z_{\text{вх}}^n - 1}{Z_{\text{вх}}^n + 1}, \quad (2)$$

где  $Z_{\text{вх}}$  – входной импеданс  $n$  – го слоя, равный:

$$Z_{\text{вх}}^n = \frac{Z_{\text{вх}}^{(n-1)} - iZ_n \operatorname{tg}(\gamma_n d_n)}{Z_n - iZ_{\text{вх}}^{(n-1)} \operatorname{tg}(\gamma_n d_n)} Z_n. \quad (3)$$

В формуле (3)  $Z_n$  – волновое сопротивление  $n$  – го слоя,  $\gamma_n$  – его волновое число.

Рассмотрено 3 случая. Когда первый слой это влажный мох толщиной: 1) 1 мм; 2) 10 мм; 3) 100 мм; содержащий воду удельной проводимостью 560 мкСм/см в объеме 0,1 от всего объема, а второй слой влажный песок (вода с объемным содержанием  $p = 0,2$ ). Аппаратура ДЗЗ, как правило, работает на выделенных частотах, поэтому получены соотношения для некоторых частот, таких как 10 ГГц, 20 ГГц и 40 ГГц, которые приведены в таблице.

Таблица. Коэффициент отражения для двуслойной структуры, дБ

Частота, ГГц	Толщина мха, мм		
	1	10	100
10	$R = -6,6 - 0,1*10^{-2}T + 0,4*10^{-4}T^2 - 0,2*10^{-5}T^3$	$R = -9,04 + 0,03T - 0,1*10^{-2}T^2 + 0,5*10^{-4}T^3$	$R = -17,6 + 0,2*10^{-3}T + 0,6*10^{-4}T^2 + 0,2*10^{-5}T^3$
20	$R = -7,5 - 0,7*10^{-2}T + 0,2*10^{-4}T^2 - 0,1*10^{-5}T^3$	$R = -16,6 + 0,13T + 0,4*10^{-4}T^2 - 0,7*10^{-4}T^3$	$R = -18,5 + 0,08T - 0,1*10^{-2}T^2 - 0,2*10^{-5}T^3$
40	$R = -10,2 - 0,02T - 0,4*10^{-4}T^2 + 0,6*10^{-5}T^3$	$R = -15,2 - 0,07T - 0,2*10^{-2}T^2 - 0,8*10^{-5}T^3$	$R = -19,9 + 0,05T - 0,6*10^{-4}T^2 - 0,2*10^{-6}T^3$

Видно, что с ростом толщины слоя влажного мха коэффициент отражения уменьшается на всех частотах, видно также, что при толщине слоя влажного мха порядка 100 мм частотные различия не существенные.

**Заключение.** Проведенное исследование показало возможность оценки отражающих свойств двухслойной почвенной структуры на основе модели Дебая и соотношений Стогринна на примере почвенных образцов тестовых станций «Ханымей» и «Кайбасово».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М. : Наука, 1973. – 343 с.
2. Коровин Е.Ю. Электрофизические характеристики водных объектов тестовой станции «Кайбасово» // Актуальные проблемы радиофизики. АПР-2019: 8-я Международная научно-практическая конференция. – Томск, 2019 – С. 180–182.
3. Садовский И.Н. Анализ моделей диэлектрической проницаемости водной среды, используемых в задачах дистанционного зондирования акваторий. – М. : ИКИ, 2013. – 60 с.

# **РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ATmega 328 ДЛЯ СБОРА КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

**Г.И. Косарев**

*Научный руководитель: канд. техн. наук, Д.В. Вагнер*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: k.greg.esl@gmail.com

**Аннотация.** В работе описывается разработка прототипа автономного робота с возможностью мониторинга окружающей среды на основе платы Arduino UNO. В устройстве измерение расстояния до препятствия выполняет лазерный дальномер, основанный на чипе VL53L0X, функцию контроля параметров окружающей среды – датчик АНТ10. Конечным результатом является модель робототехнического комплекса, способного обнаруживать и объезжать препятствия, параллельно производя замеры температуры и влажности окружающей среды.

**Ключевые слова:** робототехника, Arduino, ATmega 328, микроконтроллер, программирование, навигация мобильного робота.

**Введение.** В настоящее время робототехнический рынок стремительно расширяется [1]. Благодаря современным решениям в области робототехники повышается результативность труда и уменьшается влияние человеческого фактора.

Одним из направлений, где возможно применить автоматизацию и роботизацию процессов, является мониторинг окружающей среды. Актуальность объясняется тем, что климат нашей планеты заметно меняется [2]. Необходимо проводить мониторинг химического состава почвы, водоемов болот, которые расположены вблизи предпри-

ятий химической, нефтехимической и легкой промышленности.

Одна из наиболее распространенных категорий робототехнических устройств – наземные мобильные роботы. Большинство из них требуют управления оператором, и лишь некоторые модели способны передвигаться автономно, параллельно выполняя мониторинг параметров среды. Цель работы – создать прототип автономного мобильного робота с возможностью мониторинга окружающей среды.

**Методы и материалы.** Создаваемый прототип должен передвигаться без вмешательства оператора и иметь возможность собирать данные о характеристиках окружающей среды в режиме реального времени и осуществлять передачу по выбранному каналу связи. Для реализации прототипа автономного мобильного робота было решено использовать плату Arduino UNO, построенную на микроконтроллере ATmega328. Данная плата выбрана по нескольким основным критериям: 1) возможность работы от внешнего источника питания; 2) доступная цена платы и датчиков с ней совместимых; 3) программное обеспечение платы работает под операционными системами Windows, Macintosh OSX и Linux; 4) полностью открытая архитектура системы [3].

Робот состоит из двух платформ, на которых закреплены элементы управления, питания и обработки данных (рис. 1).

Управляющим элементом всего устройства является контроллер ATmega328. За измерение расстояния до препятствия отвечает датчик VL53L0X, являющийся лазерным дальномером. Он способен измерять расстояние в диапазоне от 30 до 2000 мм [4].

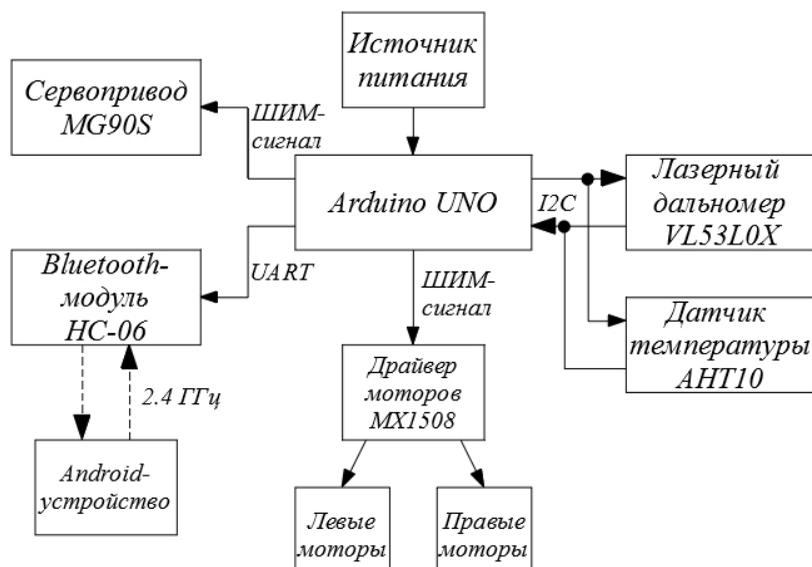
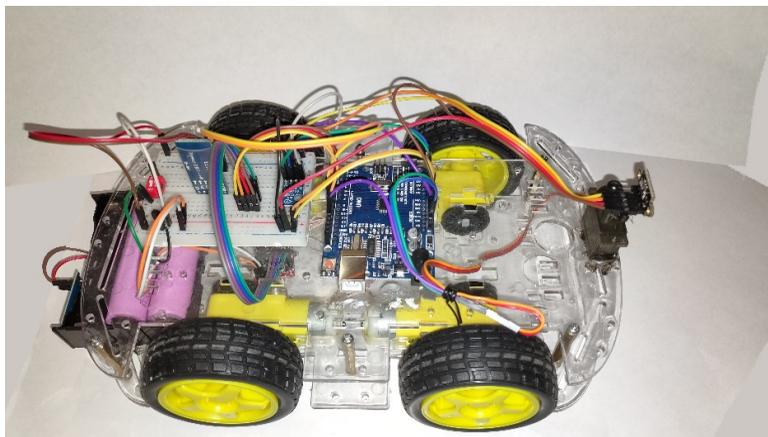


Рис 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса

Изначально в конструкции использовался ультразвуковой датчик HC-SR04, но из-за его сильной зависимости от угла падения пучка ультразвука на объект и материала объекта, принято решение использовать лазерный дальномер, у которого подобные зависимости отсутствуют. Управление четырьмя электромоторами осуществляется с помощью микросхемы MX1508, состоящей из двух H-мостов. Таким образом робот имеет постоянный полный привод, что положительно сказывается на его проходимости. Также на устройстве расположен цифровой датчик АНТ10, способный измерять температуру в диапазоне  $-40^{\circ}\text{C} \dots +85^{\circ}\text{C} \pm 0.3^{\circ}\text{C}$  и влажность в диапазоне  $0 \dots 100\% \pm 2\%$  [5]. Полученные данные передаются по интерфейсу UART на Bluetooth модуль HC-06 с чипом BC417, затем по беспроводному протоколу IEEE 802.15.1 Bluetooth 2.0 [6] эти данные поступают на Android-устройство.



*Рис. 2. Фотография собранного прототипа*

В среде разработки Arduino IDE написан программный код устройства, в котором используются необходимые библиотеки для работы с модулями. Работа прототипа выстроена по следующему алгоритму. Робот начинает двигаться в прямом направлении, параллельно измеряя свободное расстояние перед собой, далее проверяется условие – не наткнулся ли робот на препятствие. Если он оказался к нему вплотную, то начинается движение задним ходом, в случае обнаружения препятствия заблаговременно, выполняется сравнение свободного расстояния по правому и левому борту. Такое действие возможно благодаря сервоприводу, на который установлен дальномер. Робот совершает маневр в сторону большей свободной траектории для дальнейшего движения.

**Результаты.** В результате работы собран прототип автономного автомобиля (рисунок 2). Настроены используемые модули и интерфейсы. Произведены тестовые обходы помещения при разных условиях окружающей среды для проверки работоспособности модулей. В дальнейшем планируется последующая модернизация прототипа: 1) использование большего числа датчиков, для лучшего пози-

ционирования в пространстве; 2) установка манипулятора для сбора образца почвы для анализа; 3) подключение камеры для фото- и видеofиксации; 4) переход на микросхемы и одноплатные компьютеры, обладающие более высокой производительностью.

**Заключение.** В приведенной статье были рассмотрены способы и средства проектирования прототипа автономного робота на базе Arduino UNO, для мониторинга окружающей среды. Реализован действующий программно-аппаратный комплекс.

### ЛИТЕРАТУРА

1. International Federation of Robotics [Электронный ресурс]. – URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-2.7-million-robots-work-in-factories-around-the-globe> (дата обращения 04.05.2021).
2. Nagayoshi K., Hisashi I., Kenji S. Hydrological and climate changes in southeast Siberia over the last 33 kyr // *Global and Planetary Change*. – 2018. – No. 164. – P. 11–26.
3. Arduino [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction> (дата обращения 16.04.2021).
4. VL53L0X Datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf> (дата обращения 16.04.2021).
5. АНТ10 Datasheet [Электронный ресурс]. – URL: [https://server4.eca.ir/eshop/АНТ10/Aosong\\_АНТ10\\_en\\_draft\\_0c.pdf](https://server4.eca.ir/eshop/АНТ10/Aosong_АНТ10_en_draft_0c.pdf) (дата обращения 16.04.2021).
6. BC417 Datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Bluetooth/CSR-BC417-datasheet.pdf> (дата обращения 16.04.2021).

# НЕУСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

**В.С. Костерова**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук,  
С.С. Новиков*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: vsk727@yandex.ru

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию динамической неустойчивости когерентных режимов системы двух связанных автогенераторов с сильной резонансной связью. Проведен анализ влияния резонансных свойств связи на устойчивость синхронных режимов. В ходе вычислительного эксперимента определены параметрические границы разрушения когерентных режимов.

**Ключевые слова:** резонансная связь, неустойчивость, синхронный режим, параметр связи.

**Введение.** Принято считать, что в системе связанных автогенераторов при близости их собственных частот существует синхронный режим колебаний. Однако исследования показали, что такой режим может быть неустойчивым, и, вместо него в системе существуют противофазные колебания [1]. Такое поведение возможно при сильных резонансных свойствах взаимной связи, система теряет устойчивость и перестраивается в режим противофазных или даже хаотических колебаний. Разрушение когерентности привлекает исследователей, так как позволяет привести систему в режим динамического хаоса. Хаотические колебания обладают свойствами, которые позволяют использовать их в системах передачи, шифровании, записи, хранения информации [2]. Целью работы является исследование неустойчивости синхронных режимов.

**Система связанных автогенераторов.** В работе [3] рассмотрена система двух связанных автогенераторов и

приведено выражение для параметра взаимной связи  $y_{12}(j\omega)$ :

$$y_{12} = \frac{-2s}{(\cos \alpha - 2s) + j \sin \alpha} g_0,$$

где  $s$  и  $\alpha$  модуль и аргумент элемента матрицы рассеяния четырехполюсника,  $g_0$  – проводимость входных линий четырехполюсника. В [3] на основе исследования устойчивости было показано, что при достаточно сильных резонансных свойствах связи синхронные колебания теряют устойчивость, а также был получен аналитический критерий потери устойчивости:

$$C_{12} > C,$$

где  $C$  – емкость колебательных систем автогенераторов. Параметр  $C_{12}$  определяет крутизну мнимой части проводимости  $y_{12}(j\omega)$

На рис. 1 приведена исследуемая схема, реализованная в программе моделирования NI Multisim. Два транзисторных автогенератора соединяются друг с другом и с общей нагрузкой  $R_H$  через последовательные колебательные контуры  $R_{св}$ ,  $C_{св}$ ,  $L_{св}$ . Частоты автогенераторов (около 540 кГц) задаются элементами колебательных контуров.

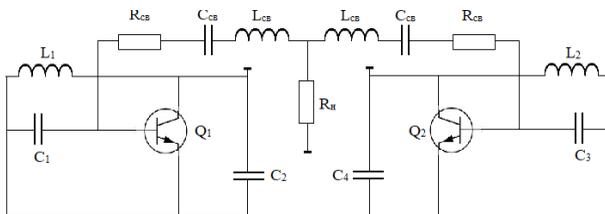


Рис. 1. Принципиальная схема системы связанных автогенераторов

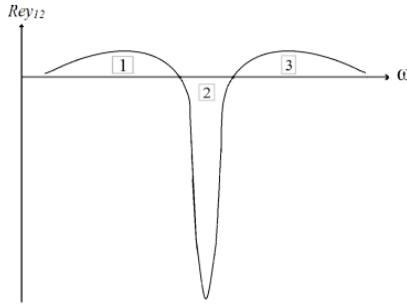


Рис. 2. Профиль частотной характеристики [3]

Частотная зависимость проводимости связи [3] показана на рис. 2. В области 2 характер резистивной связи соответствует  $Re y_{12} < 0$ , то есть здесь можно ожидать устойчивости режима синфазных колебаний. При уменьшении сопротивлений  $R_{св}$  ширина этой области сужается, параметр  $C_{12}$  увеличивается. В областях 1, 3  $Re y_{12} > 0$ , при таких настройках должен быть устойчивым противофазный режим [3].

Параметр  $C_{12}$ , полученный в [4] для частоты резонанса, равен

$$C_{12} = 2L_{св} / R_{св}^2 \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что для увеличения параметра  $C_{12}$  нужно увеличивать индуктивность связи и/или уменьшать сопротивление связи. Для нахождения границ разрушения когерентного режима было учтено условие разрушения синфазного режима  $C_{12} > C$ .

**Результаты.** В ходе данного исследования удалось добиться неустойчивости синфазного режима и перехода системы в противофазный режим. Однако было обнаружено, что смена режимов колебаний может происходить двумя различными способами. Первый способ осуществляется посредством модуляции, в результате которой происходит перестройка (рис. 3), так как колебания одного из автоге-

нераторов оказываются почти подавленными. Такое поведение соответствует области 1 на рис. 2. Второй способ смены режимов заключается в изменении формы колебаний (рис. 4), в то время, когда амплитудная модуляция отсутствует. Колебания возбуждаются в фазе, но через некоторое время их форма перестает иметь гармонический вид. В тот момент, когда произошла перестройка, колебания возвращаются к гармоническому виду. Это соответствует области 2 на рис. 2. Так как параметр  $C_{12}$  увеличивается, неустойчивость синфазного режима возрастает.

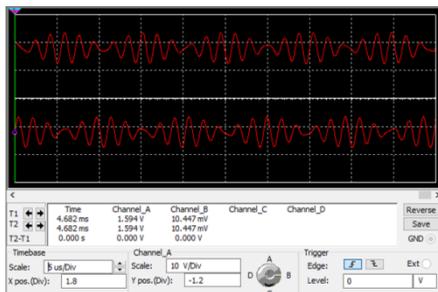


Рис. 3. Переход в противофазный режим работы посредством амплитудной модуляции

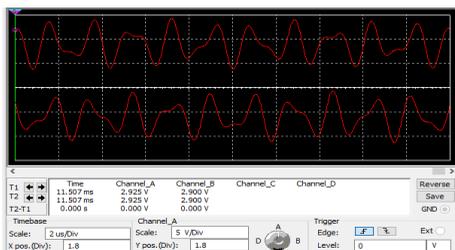


Рис. 4. Переход в противофазный режим работы посредством разрушения гармонической формы

**Заключение.** Показано, что сильная резонансная связь влияет на устойчивость системы. Увеличение индуктивности привело к возрастанию неустойчивости, а также раз-

рушению синфазного режима и последующего установления режима противофазных колебаний. Однако система автогенераторов переходила в режим противофазных колебаний двумя способами. Первый способ соответствует резистивной связи, когда  $Rey_{12} > 0$ , второй – связан с сильными резонансными свойствами системы и соответствует случаю, когда параметр связи увеличивается из-за чего и возрастает неустойчивость. Характер поведения системы зависит от того, в какой области, графика (рис. 2), окажется система.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков С.С., Усюкевич А.А. Явление разрушения когерентности в системе двух связанных СВЧ-автогенераторов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 9/2. – С. 16–20.
2. Владимиров С.Н. Нелинейно-динамическая криптология // Владимиров С.Н., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Радиофизические и оптические системы. – М. : Физматлит, 2009. – 206 с.
3. Новиков С.С., Усюкевич А.А. Неустойчивость синхронных режимов в системе двух связанных СВЧ-автогенераторов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 11. – С. 51–56.
4. Владимиров С.Н., Майдановский А.С., Новиков С.С. Нелинейные колебания многочастотных автоколебательных систем. – Томск : Изд. Том. ун-та, 1993. – 203 с.

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ И СКОРОСТИ ПОТОКА ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ДОБЫВАЮЩИХ ОТРАСЛЕЙ**

**А.Д. Криницкий**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук  
О.А. Доценко*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: krinitskii1999@mail.ru

**Аннотация.** В докладе представлена концепция системы контроля высоты заполнения технологического аппарата материалом рабочей среды и скорости его подачи. Разработана структурная схема и прототип устройства. Проведены эксперименты и показана работоспособность прототипа.

**Ключевые слова:** измерительное устройство, уровень, Arduino UNO, ультразвуковой датчик, Wi-Fi, поток, датчик вращения.

**Введение.** В настоящее время возрастает спрос на современные системы контроля технологических процессов [1], в частности, необходимы точные и доступные устройства измерения показателей потока сырья для безаварийной работы и минимизации простоев производства. Такие системы используются на различных предприятиях добывающей промышленности [2, 3]. Контроль уровня сырья и скорости подачи позволяет решить некоторые важные производственные задачи. Так, например, один час простоя транспортной или конвейерной ленты в металлодобывающей отрасли может обойтись предприятию в несколько миллионов рублей, а обрыв конвейерной ленты добавит дополнительные расходы на ее ремонт. На российских предприятиях имеются подобные системы контроля как

российского, так и иностранного производства, но их стоимость зависит от курса доллара.

Цель работы – разработка системы контроля уровня и скорости потока сырья на конвейере.

**Приборы и методика.** Для достижения цели была разработана концепция системы контроля уровня сырья и скорости движения потока, состоящая из микроконтроллера ATmega 328P – базовой части платформы Arduino Nano, двух ультразвуковых датчиков (УЗД) HC-SR04, Wi-Fi модуля ESP-01 и датчика скорости вращения FC-03.

Блок-схема алгоритма работы устройства представлена на рис. 1.



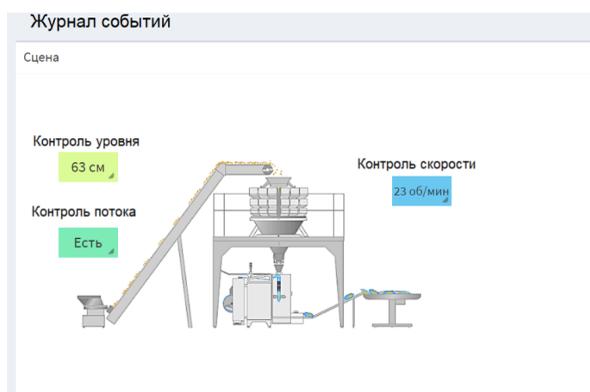
Рис. 1. Блок-схема алгоритма работы системы контроля

Для простоты понимания рассмотрим работу системы на примере горнодобывающей промышленности. Работа системы заключается в следующем: первый УЗД, измеряющий уровень насыпного материала, крепится над лентой, подающей материал на последующий этап обработки; второй УЗД, измеряющий наличие материала на конвейере, крепится на выходе подающей ленты. Датчик скорости вращения необходим для контроля минимальной скорости вращения ленты и мгновенного оповещения при достиже-

нии скорости ниже заданного порога. Данные с датчиков передаются с помощью Wi-Fi модуля в режиме реального времени на локальный сервер.

В качестве конвейерной ленты использовалась дорожка из картона, которая двигалась вручную. Над ней крепился ультразвуковой датчик, измеряющий уровень насыпного материала. Наличие потока и скорости движения ленты измерялись отдельно, имитируя реальные условия работы конвейера. Для оценки реакции устройства на отражение ультразвука от разных материалов брались: кирпич, щебень, стекло, пластиковые бутылки.

**Результаты.** Все результаты были получены с помощью сервера `open.monitoring`, на который передавались данные датчиков (рис. 2). В ходе проведения эксперимента результаты измерений показали, что в среднем относительная погрешность определения величины уровня потока сырья составляет примерно 7%. Меньше всего погрешность датчика уровня оказалась при измерении потока кирпичей и щебня – порядка 5%. Для стекла и пластиковых бутылок погрешность составила около 9-10%, что, учитывая габаритные размеры конструкции, не внесет критических ошибок.



*Рис. 2 Вывод показаний датчиков на сервер*

**Заключение.** В результате проведенных испытаний было выявлено, что ультразвуковой датчик HC-SR04 достаточно хорошо справляется с измерением расстояния до выбранных материалов, хоть и с небольшой погрешностью. В алгоритме обработки данных необходимо учесть факт, что изменение температуры влияет на скорость распространения звуковых волн.

В будущем система может иметь широкий спектр направлений для улучшения из-за большой области применения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Радиоэлектронная промышленность. Актуальные задачи [Электронный ресурс]. – URL: <https://minpromtorg.gov.ru/activities/industry/otrasli/radio/> (дата обращения 16.04.2021).
2. Контроль заштыбовки перегрузочной тетки [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.elec.ru/articles/kontrol-zashtybovki-peregruzochnoj-techki/> (дата обращения 30.04.2021).
3. Микроволновый сигнализатор уровня/затора – датчик заштыбовки INNOLevel MicroPulse [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kip59.ru/katalog/datchiki919086/datchiki-kontrolja-i-izmerenija-urovnja-sypuchih-materialov-i-zhidkih-sred-innolevel/beskontaktnyi-signalizator-innolevel-micropulse/> (дата обращения 30.04.2021).

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕСНЫХ ВОДОЕМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАДРОКОПТЕРА**

**Е.В. Ланин, В.А. Казанин**

*Научный руководитель: К.В. Дорожкин*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: zenkalanin@gmail.com

**Аннотация.** В работе приводятся результаты автоматизации процесса получения данных о состоянии водных объектов при помощи беспилотной летательной системы. Представлены технические характеристики квадрокоптера, описана система автоматического управления на базе полетного контроллера Pixhawk 2.4.8 и разработан алгоритм действий при автономном полете для повышения энергетического ресурса квадрокоптера.

**Ключевые слова:** квадрокоптер, физико-химические параметры, пиксхавк, планировщик миссий, аккумулятор.

**Введение.** Сегодня беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются важными инструментами, используемыми в разных областях: пожаротушение, поисково-спасательные работы, строительство, диагностика и мониторинг инфраструктуры, геодезия и картография [1], охрана дикой природы, сельское хозяйство и многое другое. БПЛА используются для наблюдения, контроля и оценки состояния экологии (природной среды\биосферы), что позволяет уменьшить временные затраты и обеспечить безопасность человека при сборе данных.

С развитием БПЛА открываются новые возможности для решения актуальных задач: взятие проб почвы с поверхностного слоя земли, воды из биономической зоны моря – литорали или определение глубины водоема. В зависимости от поставленных задач, летательные аппараты делятся на управляемые автоматически, управляемые опе-

ратором с пункта управления и гибридные. В данной статье будет рассматриваться гибридный способ управления, который включает в себя непосредственное управление как оператором, так и с помощью программного обеспечения Mission Planner [2]. Также БПЛА различают по конструкции: мультироторные или мультикоптерные дроны, БПЛА с неподвижным крылом, однороторный дрон – беспилотный вертолет и гибридные дроны [3]. БПЛА с 4-мя моторами – квадрокоптер, с шестью – гексокоптер, с восемью – октокоптер. В представленной работе рассматривается квадрокоптер из-за ряда преимуществ: дешевые и взаимозаменяемые компоненты, вертикальный взлет, возможность удержания заданной высоты, отсутствие влияния на свойства измеряемого объекта. Но у мультикоптеров имеются недостаток – время полета составляет около 20-30 минут с минимальной полезной нагрузкой ввиду большого расхода заряда аккумулятора на стабилизацию в воздушном пространстве и создание подъемной тяги.

Цель работы состоит в оптимизации использования энергетических ресурсов квадрокоптера для увеличения времени полета и сбора физико-химических данных автоматизированной системой.

**Методы и материалы.** Для описания рельефа дна, наблюдения и контроля качества воды водоема предлагается использовать квадрокоптер с датчиками, измеряющими концентрацию растворенного кислорода, меру кислотности и расстояние до дна водоема.

В представленной работе взят за основу квадрокоптер на базе полетного контроллера Pixhawk 2.4.8 с рамой f450 и прикрепленными поплавками для посадки на твердую и водную поверхность.

**Результаты.** Полетный контроллер Pixhawk с прошивкой Ardupilot имеет открытый исходный код, позволяю-

щий модифицировать программное обеспечение (ПО) под свои нужды [2–4].

Управление квадрокоптером (полетным контроллером) может осуществляться как вручную, так и автономно. Ручное управление квадрокоптером реализуется с помощью радиоконтроллера (RC), автономное управление – полетным контроллером Pixhawk. Для автоматизированного полёта необходимо программное обеспечение, GPS-модуль и радиотелеметрия, подключенные в соответствующие разъемы полетного контроллера (2 или 3 для телеметрии и 10 для GPS-модуля)

Назначение разъемов на полетном контроллере Pixhawk 2.4.8 приведены на рисунке 1.

Также полетный контроллер Pixhawk содержит основной акселерометр и гироскоп MPU6000, 16-битный гироскоп ST Micro, 14-битный акселерометр/компас (магнитометр) ST Micro и датчик барометра.

Для достижения автоматического полета необходим алгоритм действий (таблица 1), выполняющий задачи: взлет на указанную высоту, полет по точкам, зависание над водной поверхностью и инициализацию датчиков сбора параметров воды. При подаче команды «TAKEOFF» происходит взлет БПЛА на заданную высоту, исходя из особенностей местности. Затем квадрокоптер летит до заданной точки – «WAYPOINT», после достижения которой происходит снижение и удержание высоты – «LOITER\_TIME». Во время ожидания выполняется команда «DO\_SET\_RELAY», по которой активируется система датчиков для оценки физико-химических параметров, а длительность работы указывается командой «LOITER\_TIME», не изменяя значения высоты. При необходимости в дополнительных исследованиях цикл повторяется. Возвращение на «базу» выполняется командой «RETURN\_TO\_LAUNCH».



Рис. 1. Разъемы полетного контроллера Pixhawk 2.4.8: 1 – Гнездо для подключения приемника радиуправления; 2 – Подключение радиомодемов для связи с наземной станцией; 3 – Подключение On Screen Display (OSD); 4 – Universal Serial Bus (USB) порт, для подключения к компьютеру; 5 – Serial Peripheral Interface (SPI) цифровая шина общего назначения; 6 – Разъем подключения оригинального модуля питания; 7 – Кнопка «безопасности»; 8 – Зуммер; 9 – Последовательный порт общего назначения; 10 – Подключение прибора навигации; 11 – цифровая шина для подключения устройств стандарта Controller Area Network (CAN); 12 – Разъем, предназначенный для подключения внешнего компаса; 13 – Аналогово-цифровой порт на 6,6 В; 14 – Аналогово-цифровой порт на 3,3 В; 15 – Многоцветный индикатор

Таблица 1. Алгоритм действий при автоматическом полете квадрокоптера с удержанием высоты

Номер команды	Команда
1	TAKEOFF
2	WAYPOINT
3	LOITER_TIME
4	DO_SET_RELAY
5	LOITER_TIME (120 seconds)
6	RETURN_TO_LAUNCH

Рассматриваемый алгоритм в таблице 1 разработан для БПЛА без посадочной конструкции на водную поверхность с растратами электрического заряда аккумулятора на удержание установленной высоты. Максимально возможное количество измерений  $N$  для алгоритма в таблице 1 определяется как отношение мощности аккумулятора  $P_A$  к сумме мощностей, затрачиваемых при полете до следующих участков измерений  $P_{\Pi}$  и при удержании высоты  $P_Y$ :

$$N = \frac{P_A}{P_Y + P_{\Pi}} \quad (1)$$

В формуле (1) не учитываются аэродинамические потери и мощность, необходимая для возвращения квадрокоптера на базу. Из этого следует, что часть энергетических ресурсов БПЛА затрачивается на поддержание высоты, что сокращает количество проводимых измерений. Для рационального использования заряда аккумулятора и увеличения количества проводимых измерений составлен алгоритм действий для квадрокоптера с посадкой на водную поверхность (таблица 2).

Таблица 2. Алгоритм действий при автоматическом полете квадрокоптера с посадкой на воду

Номер команды	Команда
1	TAKEOFF
2	WAYPOINT
3	LAND
4	DO_SET_RELAY
5	RETURN_TO_LAUNCH

Отличие этого алгоритма от предыдущего в том, что при достижении определенной точки выполняется команда «LAND» (приводнение БПЛА), вместо «LOITER\_TIME», после которой выключаются двигатели. Следовательно, в

формуле (1) исчезает мощность, расходуемая на удержание высоты. Предположим, что затрачиваемая мощность на полет между проводимыми измерениями во втором алгоритме (таблица 2) не сильно отличается от  $P_{\Pi}$  для первого алгоритма (таблица 1) и мощность аккумулятора для двух алгоритмов одинаковая. Тогда, максимально возможное количество измерений, проводимых по алгоритму действий (таблица 2), увеличится в несколько раз. Увеличение количества измерений напрямую связанно с эффективным использованием энергетических ресурсов БПЛА во время автоматизированного полета по заданным координатам.

**Заключение.** В приведенной статье рассмотрены технические характеристики полетного контроллера Pixhawk и приведены алгоритмы действий для БПЛА с посадкой на водную поверхность и с удержанием высоты. Разработанный алгоритм действий для БПЛА с посадкой на водную поверхность увеличивает энергетический ресурс квадрокоптера за счет отключения двигателей, что повышает количество максимально возможных измерений. В данной работе не учитывалось аэродинамическое сопротивление квадрокоптера и мощность, затрачиваемая на возвращение БПЛА на базу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. In Situ Water Quality Measurements Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System / С. Koparan, А.В. Кос, С.У. Privette et al. // Water. – 2018. – Vol. 10, No. 3. – P. 264 (1–14).
2. Мироненко Д.Н. Система управления автономного охранного квадрокоптера : магистерская диссертация. – Томск, 2018. – 110 с.
3. Окунский М.В. Исследование и использование технологии LiDAR для обеспечения автономности летательных аппаратов мультироторного типа : магистерская диссертация. – Томск, 2019. – 81 с.
4. Design of fixed-wing unmanned aircraft for monitoring / Т.Н. Nasution, U. Andayani, К.А. Syahputra et al. // 4<sup>th</sup> International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering, ELTICOM 2020. – 2020. – No. 9230525. – P. 229–232.

## СУБТЕРАГЕРЦОВЫЕ СПЕКТРЫ ВОДНО-СОЛЕВЫХ РАСТВОРОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ И В КАПИЛЛЯРАХ

**Л.О. Лобова**

*Научный руководитель: проф., докт. техн. наук,  
Г.Е. Дунаевский*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: lobovaludmila123@gmail.com

**Аннотация.** Исследуется процесс распространения электромагнитных волн субтерагерцового диапазона в дистиллированной воде и в солевом растворе 0,9% NaCl в дистиллированной воде в связанном и свободном состояниях. Исследования проведены с помощью тайм-доменного спектрометра терагерцового диапазона T-Spec в диапазоне частот (0,1—0,2 ТГц) и ЛОВ-спектрометра СТД21 в том же диапазоне частот (0,1—0,2 ТГц). В качестве исследуемых образцов использовались образец картона, а также капилляры (кварцевое стекло) и микропипетки Сали (кварцевое стекло) с указанными выше жидкостями.

**Ключевые слова:** радиоволновой спектр, терагерцовый диапазон, капиллярный эффект жидкости, связанное состояние жидкости, свободное состояние жидкости.

**Введение.** Известно, что вода в капиллярном состоянии может быть как свободной, так и связанной [1], однако возникает вопрос: при каких размерах капилляров вода может переходить в связанное состояние. Одним из возможных путей решения данного вопроса является применение терагерцовой спектроскопии. В работе [2], где обсуждаются субтерагерцовые спектры воды, показано, что вода имеет сложную молекулярную структуру, в которую входят базовые осцилляторы – триады, гексагоны, клатраты и фрактальные кластеры I и II порядка. Для существования большемерных молекулярных структур необходимо определенное «свободное пространство». Каждая по-

добная структура имеет свою резонансную частоту, их наличие или отсутствие будет указывать на состояние жидкости.

Объемное, или связанное состояния воды возможны в различных пористых структурах. В древесине вода, находящаяся в межклеточном пространстве, является связанной, а в самой клетке (размеры структуры от 10 микрометров) она уже является свободной [3-4]. Если рассматривать строение кожи на лице человека, то в ее структуру входят капилляробразные поры, внутренний диаметр которых в среднем составляет от 0,25 до 0,68 мм [5] и вода в порах на лице также имеет структуру свободной.

Цель работы состоит в сравнении процесса распространения электромагнитных волн субтерагерцового диапазона в дистиллированной воде и водно-солевых растворах в капиллярах различных диаметров и в пористой среде.

**Методы и материалы.** В данной работе рассматривается отражение электромагнитного сигнала образцами картона плотностью  $480 \text{ г/м}^2$ , смоченного дистиллированной водой и водным раствором 0,9% NaCl. Исследования спектров отражения данных образцов осуществлялись в импульсном ТГц-спектрометре T-Spec. Для исследования образцов жидкости в капилляре использовались капилляры для определения С-реактивного белка, далее CRP и микропипетки Сали, (материалы – кварцевое стекло, внутренние диаметры 1 мм и 0,463 мм соответственно). Исследования рассеяния жидкостей в капиллярах проводились с помощью тайм-доменного спектрометра терагерцового диапазона T-Spec в диапазоне частот (0,1—0,2 ТГц) и ЛОВ-спектрометра терагерцового диапазона СТД21 в диапазоне частот (0,1 до 0,2 ТГц).

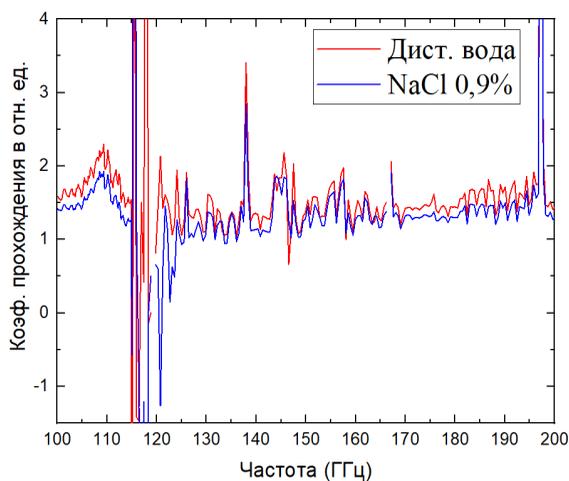


Рис. 1. Спектры прохождения образцов жидкостей (дистиллированная вода и 0,9% водный раствор NaCl) в капиллярах CRP в полосе частот 0,1–0,2 ТГц

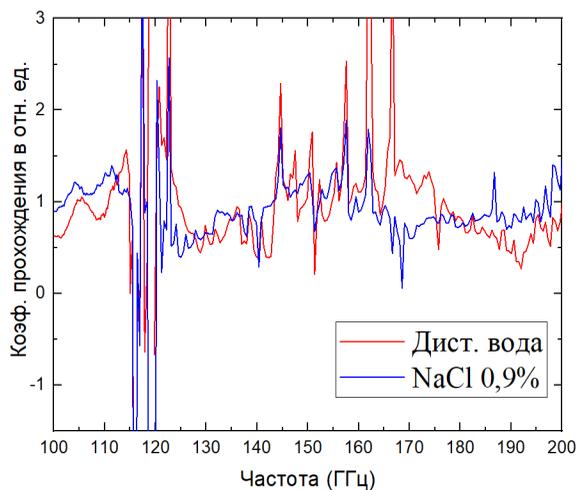
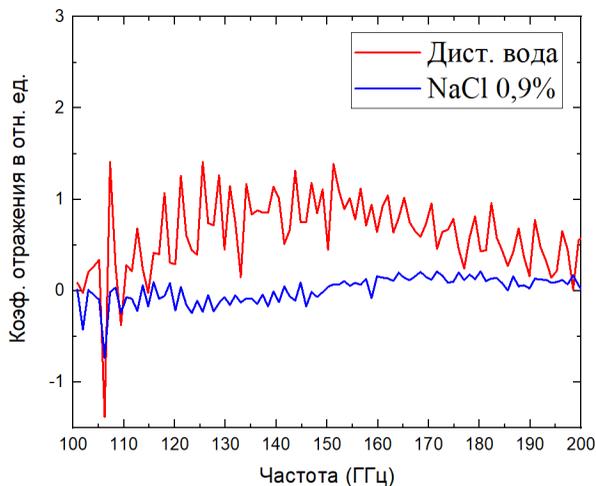


Рис. 2. Спектры прохождения образцов жидкостей (дистиллированная вода и 0,9% водный раствор NaCl), в микропипетке Сали в полосе частот 0,1–0,2 ТГц



*Рис. 3. Спектры отражений картонов, пропитанных жидкостями (дистиллированная вода и 0,9% водный раствор NaCl) в полосе частот 0,1-0,2 ТГц*

**Результаты.** На рисунках 1, 2 и 3 показаны примеры спектров для образцов в CRP капиллярах, в пипетке Сали и жидкостей на картоне. Рассматривая приведенные графики (рис. 1–3) следует учесть, что в результатах, показанных на графиках (рис. 1, 2) исключены предварительно измеренные резонансы в стенках капилляров, соответственно, количество наблюдаемых резонансов и значения резонансных частот на этих рисунках определяется именно наличием жидкости и состоянием в котором она находится.

**Заключение.** Анализируя приведенные графики (рис. 1–3) можно предположить по минимуму выраженных резонансов в образце плотного картона, что здесь преобладает вода в связанном состоянии. Судя по наличию и расположению резонансов на графиках (рис. 1, 2) разница между данными образцами капилляров во внутренних диаметрах не вносит значительного изменения, однако за счет тол-

щины стенки капилляра могут смещаться резонансы на 0,01–0,05 ТГц.

*Выражаю благодарность «Центру коллективного пользования радиоизмерений ТГУ», Дорожкину Кириллу Валерьевичу и Москаленко Виктории Дмитриевне за помощь в сборе экспериментальных данных при проведении данного исследования.*

*Особую благодарность выражаю Дорофееву Игорю Олеговичу, доценту кафедры радиоэлектроники радиофизического факультета ТГУ, за значимые замечания и важнейшие советы при проведении исследований для данной статьи.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Связанная вода [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: <https://helpiks.org/3-97729.html> (дата обращения: 02.04.2021).
2. Петросян В.И. Радиофизика воды и жизни. – М. : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 501 с.
3. Виды влаги в древесине. Причины возникновения влаги в древесине и последствия данного процесса [Электронный ресурс]. – 2013. – URL: <http://sawwood.ru/log/376> (дата обращения: 11.04.2021).
4. Микроскопическое строение. Строение древесной клетки [Электронный ресурс]. – 2012. – URL: <http://www.drevesinas.ru/woodstructura/micro/1.html> (дата обращения: 11.04.2021).
5. Facial skin pores: a multiethnic study [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4337418/> (дата обращения: 09.04.2021).

# ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ЗАПУСКА ГЕНЕРАТОРА КОРОТКИХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ

П.М. Лысых<sup>1</sup>

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, Е.В. Балзовский<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Томский государственный университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия  
E-mail: lysykh@mail.ru

**Аннотация.** Представлена схема генератора коротких сверхширокополосных импульсов, основанного на диоде с резким обратным восстановлением. Для накачки диода применена низковольтная микросхема, содержащая массив быстродействующих цифровых буферов. Исследованы варианты схемы формирования импульсов запуска. Выявлено, что длительность и крутизна фронтов импульсов запуска влияют на максимальную частоту повторения, а также на форму выходного сверхширокополосного импульса.

**Ключевые слова:** генератор, сверхширокополосный импульс, диод с накоплением заряда, микрополосковая линия.

**Введение.** Сверхширокополосные (СШП) сигналы, имеющие относительную полосу спектра более 0,2, применяются во многих областях. СШП сигналы с большой временной базой обеспечивают скрытность и помехоустойчивость систем связи, а векторная модуляция позволяет передавать большие объемы информации [1]. Последовательности коротких СШП импульсов нано- или субнаносекундной длительности используются для создания импульсного радио, особенностью которого является высокая скрытность, так как засечь передачу информации представляется возможным только в случае знания заранее заданной псевдослучайной последовательности, используемой для кодирования.

В радиолокации малая длительность СШП импульсов позволяют добиться высокого пространственного разре-

шения [2]: появляется возможность видеть не просто неопознанную точку на радаре, а некоторую сигнатуру объекта, позволяющую решать задачу распознавания объектов [3]. СШП импульсы находят применение в подповерхностном зондировании [4] и в медицинской диагностике [5].

Для генерации СШП импульсов используются полупроводниковые приборы, основанные как на резком переходе из непроводящего состояния в проводящее – туннельные диоды, лавинные диоды и транзисторы, – так и на переходе из проводящего состояния в непроводящее [6-7]. Для последних характерны фронты субнаносекундной длительности при относительной простоте схемы включения. Известны схемы СШП генераторов на диодах с резким обратным восстановлением [8], разновидностью которых являются мощные дрейфовые диоды с резким обратным восстановлением (ДДРВ) [9], используемые для получения высоковольтных импульсов при частоте повторения до сотен килогерц.

Для маломощных генераторов требуется высокая частота повторения СШП импульсов субнаносекундной длительности при использовании доступной элементной базы. Наиболее подходящими являются диоды с накоплением заряда (ДНЗ) или *step recovery diodes (SRD)* в англоязычной терминологии [8, 10]. Целью настоящей работы является разработка и исследование схемы генератора СШП импульсов с высокой частотой повторения на доступном ДНЗ.

**Схема генератора.** Разработанный генератор имеет три основные части: генератор меандра, схема формирования короткого импульса запуска и схема накачки диода. Схема генератора представлена на рис. 1. Сформированный короткий импульс запуска длительностью  $\tau$  подается на вход цифровых буферов *DD1-DD16* с высокой нагрузочной способностью. Выходной ток буферов протекает через индук-

тивность  $L$  и диод  $D$ , обеспечивая так называемую накачку диода. Через небольшое время, определяемое скоростью рекомбинации неосновных носителей в полупроводнике, диод резко переходит в непроводящее состояние. При этом накопленная в индуктивности  $L$  энергия приводит к появлению импульса ЭДС самоиндукции, который через разделительный конденсатор  $C$  поступает на выходной разъём  $X$ .

В качестве массива буферов  $DD1$ - $DD16$  применена микросхема  $74HC16245$ , 16-канальный шинный передатчик. Выходной ток каждого элемента  $32$  мА, время переключения в состояние логической единицы около  $1$  нс. Для синхронной передачи сигнала входы и выходы буферов соединены с остальными элементами схемы микрополосковыми линиями имеющими длину  $l1$  и  $l2$ . Индуктивность  $L$  выполнена в виде отрезка медного посеребренного провода длиной  $10$  мм. Применен ДНЗ типа КД524Б. Отбор экземпляров диодов производился по максимальной амплитуде выходного СШП импульса.

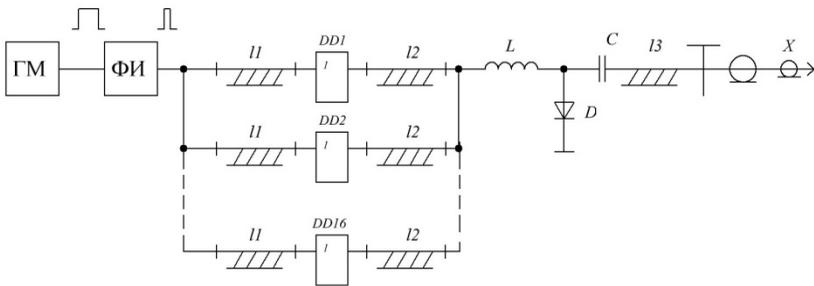


Рис. 1. Схема генератора импульсов. ГМ – генератор меандра; ФИ – формирователь короткого импульса запуска

**Формирователь импульсов запуска.** Два варианта схемы формирования инициирующего импульса запуска приведены на рис. 2а и рис. 2б, соответственно. В обоих вариантах генератор меандра выполнен на инвертирующем

элементе  $DD1$  с  $RC$ -цепью в обратной связи. Переменный резистор  $R1$  позволяет менять частоту следования импульсов в широких пределах.

Для уменьшения длительности  $\tau$  импульса запуска использован элемент  $DD3$ , логическое «И», на входы которого подаются смещённые во времени сигналы. На рис. 2а приведен вариант формирователя с регулировкой  $\tau$  инициирующего импульса подстроечным резистором  $R2$ . Недостатком такой схемы является параллельное подключение к выходу буферного элемента  $DD2$  одновременно и входа 1 элемента  $DD3$ , имеющего конечную входную емкость, и цепи  $R2C2$ . Низкая нагрузочная способность элемента  $DD2$ , приводит к эффекту увеличения длительности фронтов формируемого импульса. Свободная от выявленного недостатка схема приведена на рис. 2б, в ней цепь  $R2C2$  подключена через дополнительный буферный инвертор. Регулировка производится подстроечным конденсатором  $C2$  с пределами изменения ёмкости 5...20 пФ. При  $R2 = 820$  Ом длительность импульсов меняется в пределах  $\tau = 1...5$  нс.

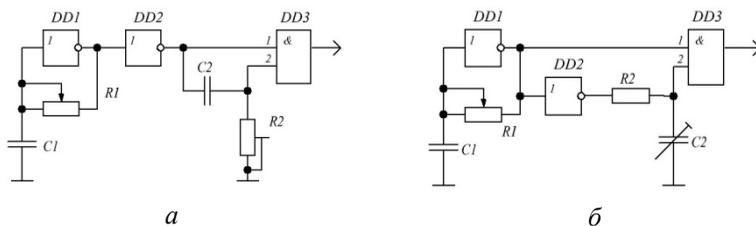


Рис. 2. Принципиальная схема формирователя импульсов запуска

**Результаты измерений.** Проведены измерения временной формы СШП импульсов на выходе разработанного генератора. Для измерений использовался осциллограф LeCroy WaveMaster 830Zi с полосой 30 ГГц. Осциллограммы выходного импульса приведены на рис. 3. Область

«А» соответствует импульсу накачки диода, попавшему на выход через разделительный конденсатор  $C$  (схема на рис. 1). Область «Б» соответствует ЭДС самоиндукции индуктивности  $L$  при резком выключении ДНЗ  $D$ , длительность импульса на полувысоте равна 170 пс. Временной интервал между указанными областями соответствует процессам в полупроводнике и зависит от типа диода. Для выбранного диода КД524Б это время составляет около 30 нс. Максимально возможная частота повторения, достигнутая в эксперименте, составляла 30 МГц. При больших значениях уменьшалась амплитуда выходного импульса.

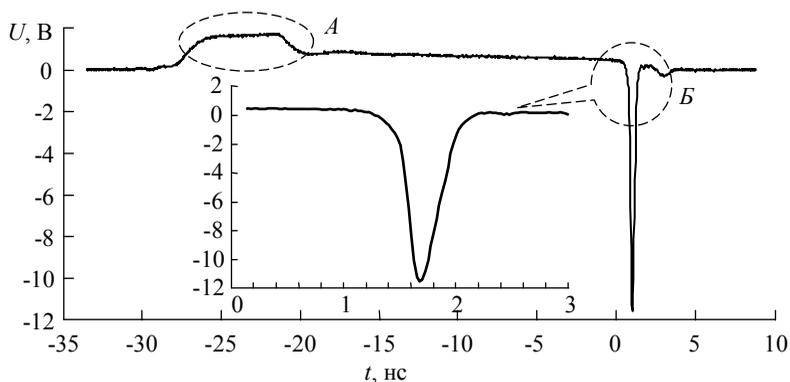


Рис. 3. Осциллограмма импульса на выходе генератора

**Закключение.** Разработан генератор коротких СШП импульсов субнаносекундной длительности на основе диода с накоплением заряда, исследованы режимы его работы при различных длительностях запускающего импульса и частотах повторения. Дальнейшие исследования будут направлены на увеличение частоты повторения и увеличение амплитуды выходного импульса.

*Работа выполнена в рамках государственного задания  
Министерства науки и высшего образования Российской  
Федерации по теме № FWRM-2021-0002.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ghavami M., Michael L.B., Kohno R. Ultra wideband signals and systems in communication engineering. – United Kingdom, West Sussex: John Wiley & Sons, 2004. – 248 p.
2. Ultrawideband radar applications and design / ed. by J.D. Taylor. – USA, New York : CRC Press, 2012. – 510 p.
3. Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. – Новосибирск : Наука, 2015. – 510 с.
4. Радиоволновая Томография: достижения и перспективы / В.П. Якубов, С.Э. Шипилов, Д.Я. Суханов и др. – Томск : Издательство НТЛ, 2014. – 216 с.
5. UltraMEDIS – ultra-wideband sensing in medicine / I. Hilger, K. Dahlke, G. Rimkus et al. // Ultra-wideband radio technologies for communications, localization and sensor applications / ed. by Reiner Thoma. – Croatia, Rijeka : InTech, 2013. – P. 257–322.
6. Дьяконов В.П. Сверхскоростная твердотельная электроника. – М. : ДМК Пресс, 2013. – Т. 1: Приборы общего назначения. – 600 с.
7. Белкин В.С., Шульженко Г.И. Формирователи мощных наносекундных и пикосекундных импульсов на полупроводниковой элементной базе (препринт). – Новосибирск : ИЯФ СО РАН, 1991. – 36 с.
8. Hewlett Packard application note No. 918: Pulse and waveform generation with step recovery diodes [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.hpmemoryproject.org/an/pdf/an\\_918.pdf](https://www.hpmemoryproject.org/an/pdf/an_918.pdf) (дата обращения 10.04.2021).
9. Generation and radiation of powerful nanosecond and subnanosecond pulses at high pulse repetition rate for UWB systems / A.F. Kardosysoev, V.I. Brylevsky, Y.S. Lelikov et al. // Proc. of International Ultra-wideband Conference. – Washington, USA, 1999. – P. 1–12.
10. Protiva P., Mrkvica J., Macha J. Sub-nanosecond pulse generator for through-the-wall radar application // Proc. 2009 European Microwave Conference (EuMC). – Rome, Italy, 2009. – P. 1904–1907.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕКОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИНВЕРСНОЙ РСА-ТЕХНОЛОГИИ

**Р.М. Махманазаров**

*Научный руководитель: профессор, докт. физ.-мат. наук,  
В.П. Якубов*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: efemberg11@mail.ru

**Аннотация.** Данная статья посвящена разработке технологии инверсного радара с синтезированием апертуры, использующего некогерентное излучение. В работе представлен результат численного моделирования прямой и обратной задачи, основанный на методе обратной фокусировки и методе миграции. Показана возможность восстановления изображения зондируемой поверхности.

**Ключевые слова:** радар с синтезированием апертуры, инверсный РСА, пассивный радар, некогерентное излучение, метод миграции, обратная фокусировка

**Введение.** На сегодняшний день известно множество радаров с синтезированием апертуры (РСА), использующих различные подходы для получения радиолокационного изображения или радио томограмм [1–5].

Помимо радарной техники широко применяются системы связи (Wi-Fi, Bluetooth, сотовая, спутниковая связь), GPS и другие. Излучение подобных систем можно использовать в целях навигации, локации инверсным или пассивным синтезированием апертуры [2–3]. Использование стороннего излучения, позволяет значительно уменьшить вес и конструкцию радара, что позволит установку его на малых беспилотных устройствах.

Ключевой особенностью работы пассивных РСА является отсутствие изначальной информации о фазе зондирующего некогерентного излучения. При известных параметрах частоты и формы сигнала измеряется только ам-

плитуда рассеянного излучения. Получение фазовой информации осуществляется различными способами, один из которых рассмотрен, для непрерывного излучения, в работе [4].

Целью данной работы является разработка технологии РСА, использующего некогерентную пачку импульсов в качестве зондирующего сигнала. В данной работе рассматривается численное решение прямой и обратной задачи.

**Численная модель.** При излучении некогерентной пачки импульсов, пространственно-временной сигнал записывается как

$$E(\mathbf{r}, t) = \iiint_V j(\mathbf{r}_1) \frac{S_0(t - |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0|/c)}{4\pi|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0|} d^3\mathbf{r}_1, \quad (1)$$

где  $S_0(t)$  – функция, описывающая некогерентную пачку импульсов,  $\mathbf{r}$  – точка наблюдения,  $j(\mathbf{r}_1) = j_0\delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0)$  – распределение источников. В случае точечного источника, измеряемое поле (1) регистрируется как:

$$E(\mathbf{r}, t) = j_0 \frac{S_0(t - |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0|/c)}{4\pi|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0|}.$$

Представленная зависимость носит название дифракционной гиперболы, т.к. асимптотически стремится к гиперболе [5].

На рис. 1 представлена геометрия прямой задачи, а также профиль рассчитываемого поля (дифракционные гиперболы). В численной модели используется 64 приёмные точки, сигнал с которых коррелируется с опорной волной.

Обратная задача заключается в нахождении распределения источников  $j(\mathbf{r}_1)$ , решение которой предлагается с использованием метода миграции во временной области и обратной фокусировки.

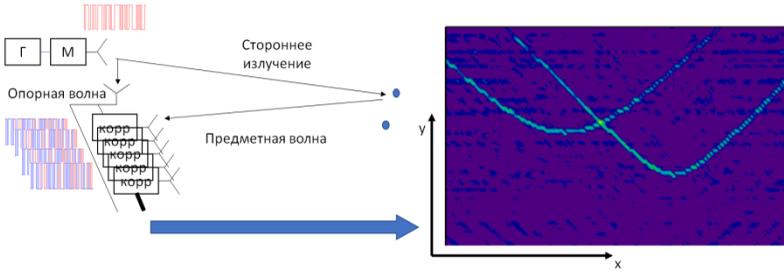


Рис. 1. Упрощенная геометрия численной модели. Г – генератор электромагнитного излучения, М – модулятор, корр – блок автокоррелятора

При корректном расчете запаздываний опорной и предметной волны достаточно просуммировать все значения сигналов по соответствующей гиперболе с учетом задержек.

Задав точку фокусировки  $\mathbf{r}_F$ , можно провести сканирование по всему интересующему пространству и записать уравнение следующего вида:

$$U(\mathbf{r}_F) = \iint_{V_1} j(\mathbf{r}_1) \delta_S(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_F) d^3 \mathbf{r}_1, \quad (2)$$

где  $\delta_S(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_F)$  – аппаратная функция системы, описывающая реакцию на точечный источник,  $U(\mathbf{r}_F)$  – сфокусированное излучение. При большом размахе и плотном заполнении синтезируемой апертуры

$$\delta_S(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_F) \approx \delta_S(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_F).$$

Тогда решение для уравнения (2) методом миграции можно приближенно записать:

$$j(\mathbf{r}_1) \approx U(\mathbf{r}_F) = \sum_m E(\mathbf{r}_m, t_m = |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_F| / c), \quad (3)$$

где  $\mathbf{r}_m$  – точки наблюдения поля [5].

**Результаты.** На рис. 2 представлен результат восстановления распределения источников методом миграции.

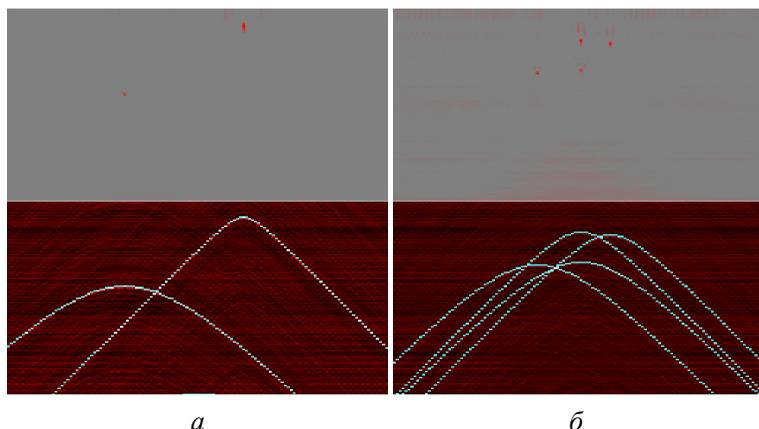


Рис. 2. Восстановление распределения источников (сверху) и профиль принимаемого поля: а – для двух источников; б – для четырех

Из рис. 1 и 2 можно заметить, что профиль принимаемого поля достаточно зашумлен, однако можно выделить явные максимумы дифракционных гипербол, обозначенные белым цветом. Т.к. сигнал представляется в виде псевдослучайной последовательности импульсов и является шумоподобным, профиль приемного поля так же носит зашумленный характер. Восстановленное изображение имеет незначительные артефакты, обусловленные особенностью алгоритма метода миграции. Координаты источников восстанавливаются корректно, с точностью до величины шага между приемниками.

**Закключение.** По результатам моделирования была показана возможность восстановления изображения с использованием стороннего зондирующего сигнала, представляющего из себя некогерентную пачку импульсов. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что предложенный подход позволяет дополнить область применения РСА-технологии для случая использования внешней некогерентной подсветки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bovenga F. Special Issue «Synthetic Aperture Radar (SAR) Techniques and Applications» // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, Iss. 7. – 1851.
2. Passive Forward-Scattering Radar Using Digital Video Broadcasting Satellite Signal for Drone Detection / R.A. Syamsul, A.M. Surajo, A.R. Emileen et al. // *Remote Sens*. – 2020. – Vol. 12. – 3075.
3. Ксендзук А. В., Герасимов П.А. Инверсный синтез апертуры в неизлучающих РЛС // *Радиопромышленность*. – 2016. – № 1. – С. 33–37.
4. Phase as the Basis for Wave Vision / A.P. Kolandasamy, R.M. Makhmanazarov, I.Yu. Kuzmenko et al. // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 516. – 012058.
5. Якубов В.П., Шипилов С.П. Обратные задачи радиофизики : учеб. пособие / под ред. В.П. Якубова. – Томск : Изд-во НТЛ, 2016. – 164 с.

## **СИНТЕЗ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЛИНЗ**

**Е.М. Медведева**

*Научный руководитель: докт. физ.-мат. наук, Д.Я. Суханов*

Томский государственный университет,  
Радиофизический факультет, г. Томск, Россия  
E-mail: Katerine2604@gmail.com

**Аннотация.** Предлагается метод синтеза осесимметричных геодезических линз для фокусировки плоских акустических волн в заданную точку. Метод основан на представлении формы линзы в виде радиальной зависимости высотного профиля, который описывается рядом Тейлора, коэффициенты которого определяются методом Монте-Карло в сочетании с методом градиентного спуска. Рассматривается семейство параллельных лучей, падающих на линзу и образованных ими геодезических линий.

**Ключевые слова:** акустика, фокусировка, геодезическая линза.

**Введение.** Общей, или классической, акустикой называют раздел физики, имеющий дело с упругими колебаниями и волнами в классической сплошной среде в случае, когда длины волн значительно больше расстояний между атомами и молекулами [1]. Используя акустические волны, можно рассмотреть фокусировку акустического поля. Акустические линзы находят себе различные способы применения, например, в конструкции направленных микрофонов. На рынке часто встречаются параболические микрофоны, принимающие сигнал, поступающий по одному направлению. С использованием рассматриваемой линзы становится возможным создание микрофонной решётки с автоматическим определением направления прихода сигналов по нескольким направлениям. Также можно разделить направления потоков звука источников, находящихся с разных сторон относительно линзы. Данные линзы помогут в создании многоканальных направленных звуковых

излучателей, обеспечивающих передачу различных сигналов в разных направлениях, в определении направления на источник акустического сигнала. Этот способ применения линз будет полезен, например, в военной сфере: так можно будет обнаруживать направление на звук выстрела без использования электроники. По такому же принципу может работать сигнализация, определяя направление прихода нетипичного звука. В повседневной жизни фокусирующие линзы могут применяться везде, где есть необходимость в разделении и направлении потоков звука. Так, может быть актуальным использование подобных линз в автомобиле, в музее или на выставке.

Цель работы состоит в разработке метода синтеза геодезических линз для акустических полей, обеспечивающих фокусировку плоских волн при различных углах падения.

**Материалы и методы исследования.** Зададим поверхность в виде функции  $h(x, y)$ . Численно найдём форму геодезической кривой для этой поверхности. Волны на поверхности линзы считаем геодезическими кривыми. Если прямая линия лежит на поверхности, то она – геодезическая линия этой поверхности [1]. Тогда  $\vec{k}$  – вектор, меняющий направление вектора  $\vec{v}_0$  на  $\vec{v}_1$ . Следующая точка геодезической кривой вычисляется путём выражения:

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_0 + d \cdot \vec{v}_1,$$

где  $\vec{r}_0$  – текущая точка на геодезической кривой,  $d$  – длина рассматриваемого участка. Линза симметрична, функция  $h(x, y)$  будет зависеть только от радиус-вектора:

$$h(x, y) = H(\sqrt{x^2 + y^2}) = H(r).$$

Ограничим возможные формы линзы видом полинома, определенного для  $r \geq 0$ , где  $r$  – радиус. Форма поверхности линзы  $H(r)$  аппроксимируется рядом Тейлора. Метод нахождения решений при помощи степенных рядов позволяет получать аналитические выражения для полей любых осесимметричных излучателей – плоских, фокусирующих

или создающих расходящиеся волновые фронты [2]. Производится поиск по ограниченному количеству параметров:

$$H(r) = c_0 + c_2 r^2 + c_3 r^3 + c_4 r^4 + \dots$$

Запишем в виде ряда:

$$H(r) = c_0 + \sum_{n=2}^N C_n \cdot r^n = c_0 + \sum_{n=2}^N C_n \cdot (x^2 + y^2)^{\frac{n}{2}}$$

Отсюда следует:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \sum_{n=2}^N \frac{C_n n (\sqrt{x^2 + y^2})^{n-1} x}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \sum_{n=2}^N C_n n x (x^2 + y^2)^{\frac{n-2}{2}}$$

Аналогично вычислим  $\frac{\partial h}{\partial y}$ . Коэффициенты  $C_1, C_2, C_3, C_4$  являются неизвестными постоянными, оптимальные значения которых численно подбираются и оптимизируются с помощью методов Монте-Карло и градиентного спуска соответственно.

Для аналитического решения рассмотрим частный случай – часть сферы высотой  $h_1$  и радиуса  $r$ . Геодезическая линия на сфере пролегает вдоль меридиана (рис. 1).

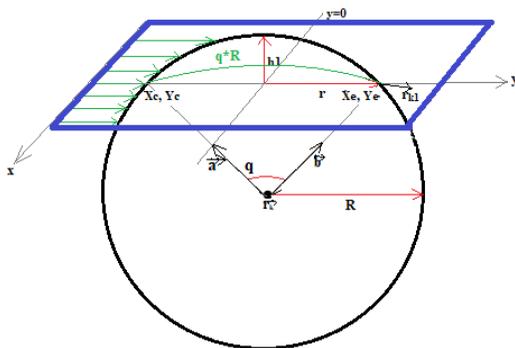


Рис. 1. Геодезическая линия на сфере

На основе построений, показанных на рис.1, получим траекторию геодезической линии на выходе сферической линзы. Синим цветом отмечена секущая плоскость, «отрезающая» часть линзы сферической формы. Обозначим:  $\vec{a} = (x_c, y_c, R - h_1)$ ;  $\vec{b} = (x_e, y_e, R - h_1)$ ;  $\vec{r}_k$  – векторное произведение  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ ;  $(x_c, y_c)$  – координаты точки начала движения луча;  $q \cdot R$  – длина дуги;  $q = 2 \arcsin(|y_c|/R)$  – угол сектора от  $(x_c, y_c)$  до  $(x_e, y_e)$ ;  $r$  – радиус полусферы;  $y_e = -y_c$  – значит, каждый луч на входе и выходе линзы движется симметрично относительно сферы;  $\vec{r}_{k1} = [\vec{r}_k, \vec{b}]$  – касательный к геодезической на выходе линзы вектор, вдоль которого после прохождения линзы движется луч (определяет его траекторию), где  $\vec{r}_k = [\vec{a}, \vec{b}]$ . Геодезическая после прохождения линзы станет прямым лучом, направленным вдоль проекции вектора  $\vec{r}_{k1}$  на плоскость  $XOY$ .

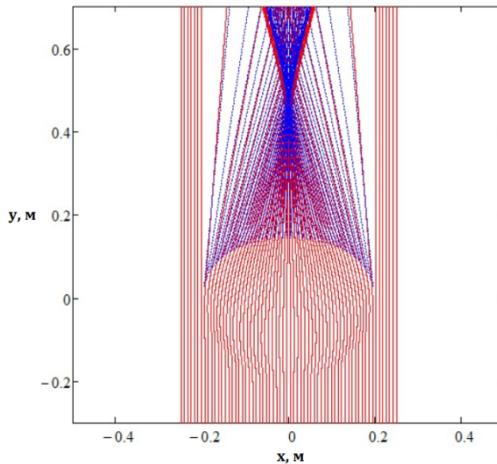


Рис. 2. Геодезические линии, проходящие через сферическую линзу

**Результаты.** Таким образом, были рассмотрены два решения. Получена картина хода лучей в геодезической линзе и точка фокусировки для численного и аналитического решений (красные и синие линии на рис. 2 соответственно). На рис. 2 показано сходство двух решений. Численное решение имеет отклонения в связи с ошибками, накапливаемыми из-за дискретизации пространства.

**Заключение.** Рассмотрены два решения – численное и аналитическое. Результаты, полученные при двух решениях, согласуются. Путём численного решения с использованием методов Монте-Карло и градиентного спуска найдены коэффициенты полинома, аппроксимирующего форму линзы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику : учебное пособие. – М. : Наука, 1984. – 400 с.
2. Жукова Н.И., Багаев А.В. Геодезические линии на поверхностях. Учебно-методическое пособие. – Н. Новгород : Издательство Нижегородского государственного университета, 2008. – 54 с.
3. Каневский И.Н. Фокусировка звуковых и ультразвуковых волн. – М. : Наука, 1977. – 336 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ, СОДЕРЖАЩИХ МНОГОСТЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ, МЕТОДАМИ НЕПРЕРЫВНОЙ И ИМПУЛЬСНОЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

**В.Д. Москаленко, К.В. Дорожкин**

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, А.В. Бадьин*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: irreproachable17@bk.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования композитов на основе акрилонитрилбутадиенстирола с добавлением многостенных углеродных нанотрубок с использованием ЛОВ-спектрометра и спектрометра с временным разрешением. Показано влияние ультразвуковой обработки композиционной смеси на электромагнитный отклик готового композита в диапазоне частот 0,1-1,6 ТГц.

**Ключевые слова:** электромагнитный отклик, нанотрубки, ЛОВ-спектроскопия, TDs-спектроскопия.

**Введение.** В настоящее время электромагнитное экранирование является одним из основных методов обеспечения электромагнитной совместимости в целях повышения устойчивости к воздействию электромагнитного поля, а также соблюдения требуемого уровня излучаемых помех. Для экранирования электромагнитных полей используются специальные конструкции и различные материалы. Среди этих материалов особое место занимают многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ). МУНТ отличаются простой технологии изготовления, а также высокой электропроводностью [1, 2]. В сочетании с современными аддитивными технологиями, такими как 3D-печать методом наплавления материала, можно создавать поверхности

сложной геометрии с поглощающими свойствами электромагнитного излучения в широком диапазоне частот, в том числе и в терагерцовом диапазоне (0,1 – 10 ТГц). Уникальные свойства неионизирующего терагерцового излучения позволяют использовать его для задач неразрушающего контроля и визуализации объектов (имиджинга). Также широко распространено его применение в спектроскопии, благодаря наличию характерных особенностей в показателе преломления и коэффициенте поглощения у химических веществ в терагерцовом диапазоне [3].

Таким образом, ставится целью исследовать поглощающие свойства материала с добавлением МУНТ, полученного по аддитивной технологии, с использованием методов непрерывной и импульсной ТГц спектроскопии.

**Методы и материалы.** В работе исследовались образцы акрилонитрилбутадиенстирола (АБС) с добавлением МУНТ с массовой концентрацией от 1 до 4 масс. %. Композиты изготавливались путем смешения компонентов с использованием ультразвукового аппарата УЗТА-0,1/28-О. Далее смесь полимеризовалась, измельчалась и многократно и экструдировалась для повышения её однородности. Полученная нить помещалась в 3D принтер для дальнейшей печати экспериментальных образцов в форме круглых пластин. Диаметр сопла при 3D-печати составлял 1 мм. На заключительном этапе производилась обработка до полного соответствия требуемых размеров образцов для установок с использованием прецизионной гравировальной машины. Изготовленные образцы материалов были получены в виде тонких плоскопараллельных шайб заданной толщины  $h$  и диаметром  $D = 20$  мм (рис. 1). Измерение электромагнитного отклика от образца проводилось с использованием методов непрерывной и импульсной спектроскопии.



Рис. 1. Фотография образца с МУНТ

Экспериментальной установкой для непрерывной спектроскопии являлся квазиоптический терагерцовый спектрометр СТД-21, в основе которого лежит интерферометр Маха-Цандера, лампа обратной волны (ЛОВ) в качестве источника излучения. В качестве детектора применялся оптико-акустический преобразователь (ячейка Голея) [4].

Для измерения методом импульсной спектроскопии использовался спектрометр с временным разрешением T-Spec 1000 компании Teravil, принцип работы которого основывается на когерентном детектировании прошедшего (или отраженного) через образец импульса с его последующей математической обработкой. В качестве излучателя и детектора использовались фотопроводящая антенна на основе GaBiAs.

**Результаты.** На основе полученного электромагнитного отклика были рассчитаны коэффициенты прохождения и отражения для образцов с различной концентрацией МУНТ (рис. 2).

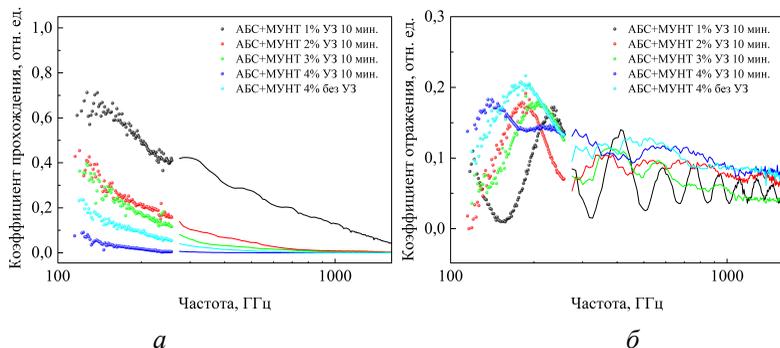


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициентов прохождения (а) и отражения (б), полученных с использованием ЛОВ-спектрометра (точки) и спектрометра с временным разрешением (пунктирные линии)

Таблица. Характеристики исследуемых образцов

МУНТ, масс. %	УЗ, мин.	Толщина, мм	$\epsilon'$ , отн. ед.	$\epsilon''$ , отн. ед.
1	10	0,55	3,06	0,41
2		0,61	3,69	0,99
3		0,515	4,11	1,4
4		0,53	4,44	1,79
4	нет	1,14	4,82	2,13

Анализ зависимости коэффициента прохождения (рис. 2, а.) показывает, что при увеличении концентрации МУНТ в образце значения коэффициента прохождения уменьшаются. Осцилляции (рис. 2 а, б) связаны с переотражением волны в образцах и уменьшаются при увеличении концентрации МУНТ.

В таблице представлены результаты расчета комплексной диэлектрической проницаемости для серии образцов. Выявлено, что увеличение концентрации МУНТ в АБС с 1 до 4 масс. % приводит к росту средней диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$  в 1,5 раза и  $\epsilon''$  в 4,4 раза); влияние

ультразвуковой обработки композиционной смеси в процессе производства материала в течении 10 мин. при мощности 75 Вт ведет к снижению значения средней диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$  на 8% и  $\epsilon''$  на 16%).

**Заключение.** В результате проведенных исследований образцов на основе матрицы АБС с добавлением МУНТ с различной концентрацией и временем ультразвуковой обработки определены частотные зависимости коэффициентов прохождения и отражения, полученные с использованием ЛОВ-спектрометра СТД-21 и импульсного спектрометра T-Spec 1000. Полученные результаты показывают, что путем изменения концентрации МУНТ в матрице из АБС возможно варьировать значения диэлектрической проницаемости композиционного материала для 3D-печати методом послойного наплавления.

*Исследование выполнено при поддержке совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-1709.2020.8.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Prakash K.S., Nancharaih T., Rao V.V.S. Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing – An Overview // Mater. Today Proc. – 2018. – Vol. 5, No. 2. – P. 3873–3882.
2. Kuleshov G.E., Badin A.V. Study of electromagnetic characteristics of polymer materials based on single-walled and multi-walled carbon nanotubes // Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 012030.
3. Kawase Kodo, Ogawa Yuichi, Minamide Hiroaki, Ito Hiromasa. Terahertz parametric sources and imaging applications // Semicond. Sci. Technol. – 2005. – No. 20. – P. 258–265.
4. Кремзер Р.А., Зубцов С.С., Бадьин А.В. Электрофизические свойства филаментов для 3d-печати в диапазоне частот 115–258 ГГц // Труды Пятнадцатой Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов. – 2018. – С. 35–39.

## **ПРИМЕНЕНИЕ АВТОНОМНЫХ ПРИЕМО- ПЕРЕДАЮЩИХ АГРОМЕТЕОЗОНДОВ В ОРАНЖЕРЕЕ С УМЕРЕННО-ВЛАЖНЫМ КЛИМАТОМ**

**Д.А. Пидотова, А.К. Берзин, М.С. Южаков,  
Д.И. Фильченко**

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, А.В. Бадьин*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, Томск, Россия  
E-mail: diana.nov.15@mail.ru

**Аннотация.** В работе приведены результаты использования автономных агрометеозондов для автоматической регистрации климатических параметров воздуха (температура, давление, влажность) в оранжерее с умеренно-влажным климатом на примере Ботанического сада ТГУ.

**Ключевые слова:** климат, агрометеозонд, оранжерея, температура, давление, влажность.

**Введение.** В настоящее время происходит автоматизация производственных процессов в промышленности и сельском хозяйстве. Использование систем климат контроля позволяет улучшить процесс выращивания сельскохозяйственных культур [1]. Суровые климатические условия в большинстве регионов России вынуждают использовать теплицы и оранжереи для выращивания культур, чувствительных к резким изменениям параметров окружающей среды. Все это приводит к необходимости разработки и внедрения автоматизированных систем регистрации климатических параметров для реализации обратной связи в системах климат контроля.

Целью данной работы является внедрение автономных приемо-передающих агрометеозондов в Ботаническом саду Томского государственного университета.

**Методы и материалы.** Для наблюдения корреляции параметров была выбрана смарт сеть мониторинга климатических данных на основе автономных агрометеозондов [2], работающих в режиме реального времени. Из 18 различных микролитических зон Ботанического сада ТГУ была выбрана умеренно-влажная как наиболее “агрессивная” по отношению к применяемой элементной базе агрометеозондов.

Для связи агрометеозондов с сервером через сеть Интернет была установлена базовая станция. Один агрометеозонд находился в оранжереи умеренно-влажного климата, а другой снаружи вблизи Ботанического сада. Давление измерялось агрометеозондом при помощи встроенного датчика давления BMP280. Влажность воздуха определялась при помощи цифрового датчика влажности HTU21. Время записи параметров определялось часами реального времени на микросхеме DS3231. В качестве микроконтроллера использовался ATmega328P-PU, в качестве приемопередатчика – LoRa E-19 868M20S [3].

**Результаты.** Из временной зависимости температуры (рис. 1.) видно, что максимумы температурных датчиков в оранжереи и на улице совпадают по времени.

Высокие значения температуры в дневной период обусловлены нагревом агрометеозонда, т.к. он находился под прямыми солнечными лучами.

Показания влажности обуславливают время необходимого полива растений. То есть можно автономно производить полив растительных культур, имея показания влажности (рис. 2). На рис. 3 представлены временные зависимости атмосферного давления внутри и снаружи Ботанического сада ТГУ.

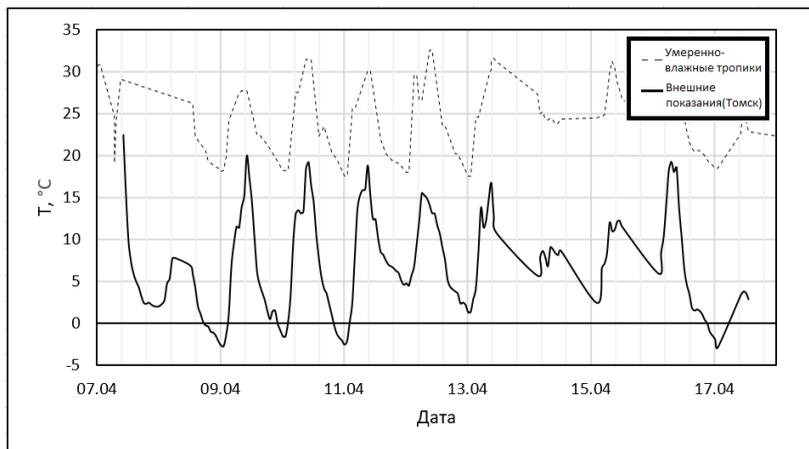


Рис. 1. Временная зависимость температуры в оранжерее умеренно-влажного климата ботанического сада НИ ТГУ и вне его в период 07.04.2021–17.04.2021

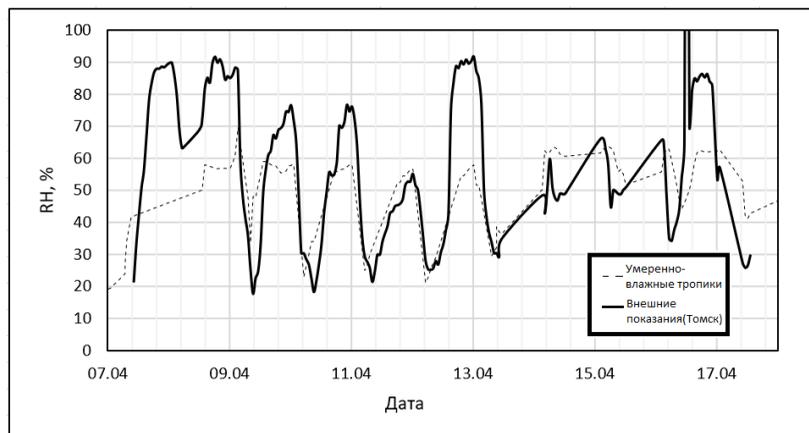
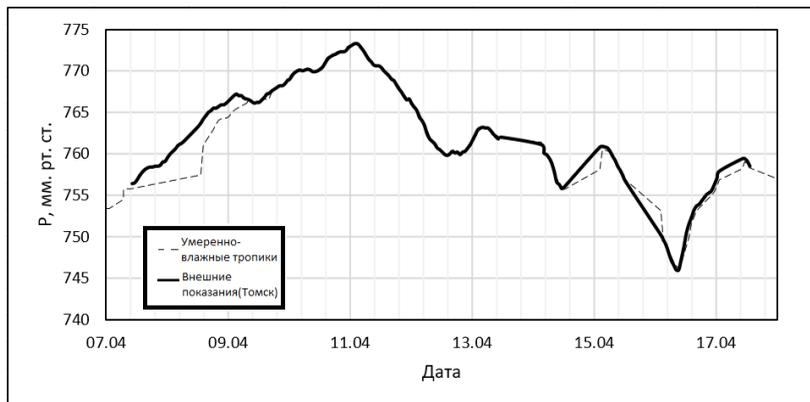


Рис. 2. Временная зависимость влажности в оранжерее умеренно-влажного климата ботанического сада НИ ТГУ и вне его в период 07.04.2021–17.04.2021



*Рис. 3. Временная зависимость давления в оранжерее умеренно-влажного климата ботанического сада НИ ТГУ и вне его в период 07.04.2021–17.04.2021*

Обе полученные зависимости давления практически совпадают.

**Заключение.** Проведено внедрение автономного приемо-передающего агрометеозонда в Ботаническом саду Томского государственного университета (ТГУ). Полученные значения температуры и влажности воздуха с агрометеозондов согласуются между собой по временно зависимости, давление воздуха – по абсолютным значениям. Таким образом, смарт сеть мониторинга климатических данных на основе автономных агрометеозондов показывает перспективность ее использования в качестве и обратной связи системы климат-контроля оранжерей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Borankulova G.S., Tungatarova A.T. Information system for automatic climate control of greenhouses // ISJ Theoretical & Applied Science, 2018. – Vol. 61, No. 5. – P. 29–31.
2. Южаков М.С., Бадьин А.В., Пидотова Д.А. Разработка устройства сбора и передачи данных УСКД-365П // Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики АПР 2019». – Томск, 2019. – С. 172–174.

3. System of automated weather stations to collect and transmit environmental parameters / M.S. Yuzhakov, A.A. Pavlova, D.A. Pidotova et al. // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1499, No. 1. – P. 012023.

# ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖКИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

**Р.В. Присекин**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук,  
О.А. Доценко*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: roman.prisekin2000@mail.ru

**Аннотация.** Работа посвящена оценке влияния включений из различных материалов на распространение электромагнитных волн в микрополосковой линии. В докладе приведены результаты моделирования микрополосковых линий с различной структурой материала диэлектрической подложки. В качестве включений использованы как сплошные, так и многослойные структуры из материалов с разными значениями диэлектрической проницаемости. Полученные результаты рассеяния/передачи ЭМ-волн показывают эффективность рассмотренных структур при их использовании в прототипах СВЧ устройств, изготавливаемых на основе данных материалов по технологии послойной 3D-печати.

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, материал подложки, микрополосковая линия,  $S$ -параметры.

**Введение.** В последнее время во всем мире широко развивается технология 3D печати. Она применяется в строительстве, автоиндустрии, медицине и других сферах при изготовлении изделий сложной формы [1,2]. Имеются публикации о разработках компонентной базы СВЧ техники. Как правило, это объемные волноведущие системы. В случае изготовления компонентов на основе микрополосковых линий (МПЛ) необходимо изменение внутренней структуры МПЛ. 3D печать позволяет это сделать достаточно легко. Но еще до момента изготовления необходимо провести компьютерный эксперимент для выбора наиболее

подходящих структур МПЛ и материалов, поскольку результаты 3D-моделирования и анализа позволяют предсказать характеристики устройства еще на стадии разработки. Цель работы состоит в определении зависимостей распространения электромагнитных волн от изменения структуры материала подложки и выбора тех структур, которые будут характеризоваться высоким согласованием в линии и будет возможно их построение с помощью послойной 3D-печати диэлектрической подложки.

**Методы и материалы.** Для анализа ЭМ-структур была выбрана программа CST Studio Suite. в ней собрана 3D-модель устройства, которое приведено на рис. 1.

Модель представляет собой МПЛ с металлической плоской из меди ( $0,1 \times 1 \times 20$  мм) и подложкой из оксида алюминия  $Al_2O_3$  ( $\epsilon \approx 10, 1 \times 20 \times 20$  мм).

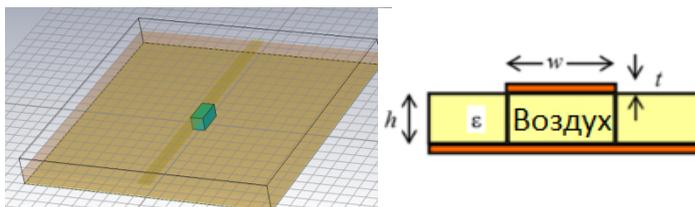


Рис. 1. Конструкция микрополосковой линии передачи [2]

**Результаты и обсуждение.** Было исследовано влияние наличия полости размером  $1 \times 1 \times 2$  мм, расположенной непосредственно под проводящей линией внутри диэлектрической подложки, на  $S$ -параметры (рис. 2,3). В качестве материалов, заполняющих полость, использовались воздух (линия 2) и сегнетоэлектрик со значением  $\epsilon = 1300$  отн. ед. (линия 3). Линия 1 соответствует сплошной подложке.

Из графика видно, что наиболее значительное влияние на исследуемые параметры оказывает именно внесение  $BaTiO_3$  – диэлектрическая проницаемость данного материала при комнатной температуре в пределах  $24 - 27$  °C

составляет 1200 – 1400 отн. ед. ( в расчётах использовано усреднённое значение), коэффициент передачи очень мал, и только в области резонансных частот 3, 5,26, 7,4, 9 ГГц (рис. 2) он приближается к значению, близкому к 1, что указывает на рост поглощения материалом; произошло значительное усиление коэффициента отражения и приобретение структурой свойств резонатора. В случае воздушной полости коэффициент отражения увеличился и оставался на уровне -14 дБ в частотной области от 5 ГГц и выше. Изменение структуры диэлектрика, находящегося в полости, а именно рассмотрение трёх материалов с различной диэлектрической проницаемостью, большей чем у материала подложки, привело к изменению картины поля.

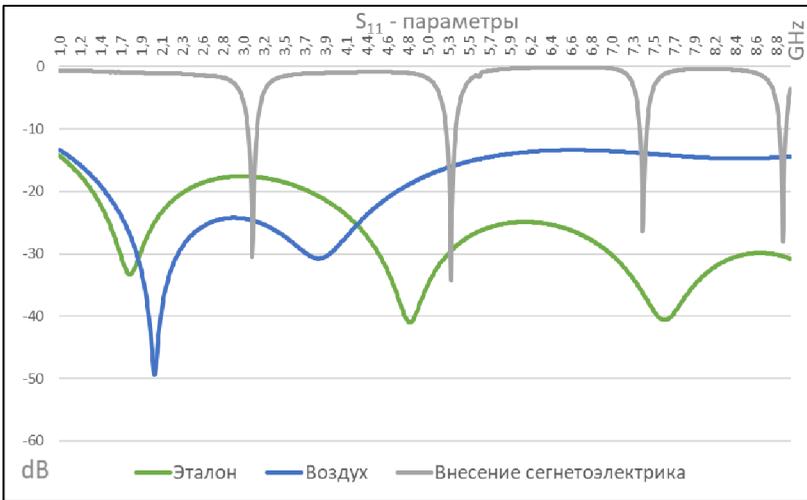


Рис. 2. Зависимости  $S_{11}$  для исходной МПЛ (1) и МПЛ с полостью, заполненной воздухом (2) и ВаTiO<sub>3</sub> (3)

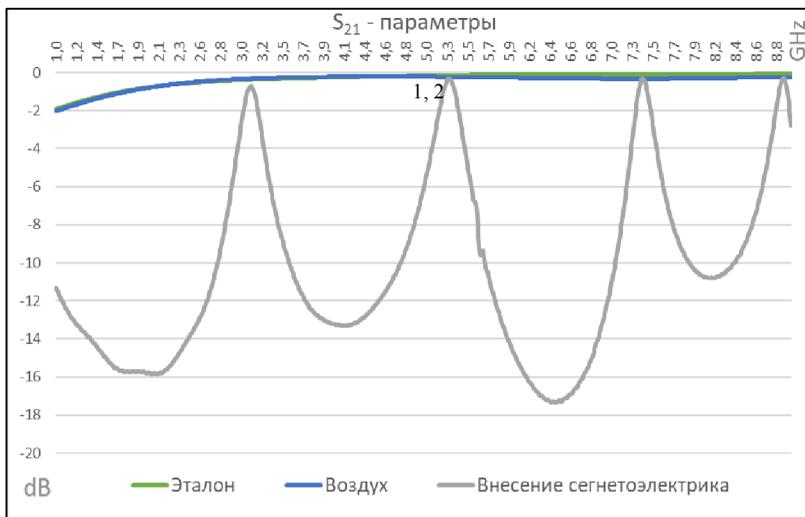


Рис. 3. Зависимости  $S_{21}$  для исходной МПЛ (1) и МПЛ с полостью, заполненной воздухом (2) и  $\text{BaTiO}_3$  (3)

Материалы в данном случае располагались параллельными слоями (рис.4), причем материал с большей диэлектрической проницаемостью находился непосредственно под металлической полоской, а с меньшей – около заземляемого основания. При таком расположении оказывается значительное влияние данного композита на проходящую ЭМ-волну.

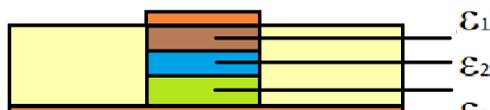


Рис. 4. Конструкция материалов в подложке

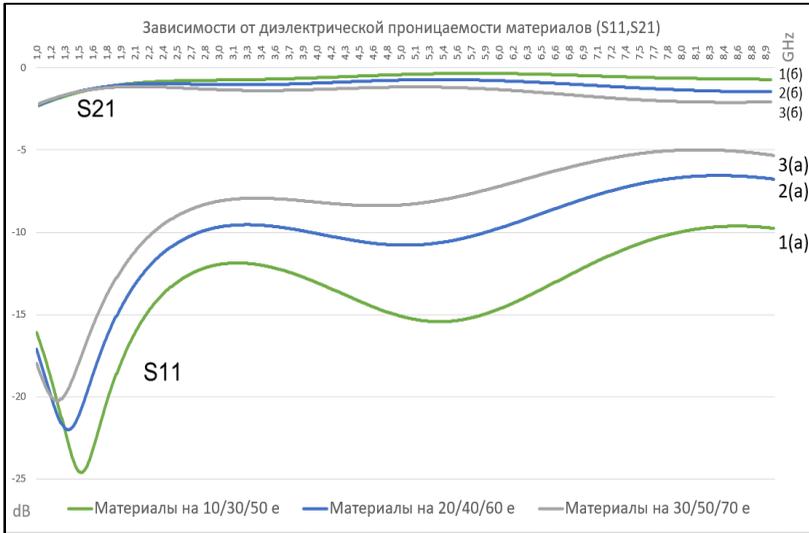


Рис. 5. Зависимости  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  от внесения слоистых структур из материалов с разными значениями  $\epsilon$

Для изменённой модели удалось получить зависимости, приведенные на рис. 5. Кривые 1(а, б) соответствуют трём материалам, у которых диэлектрическая проницаемость составляет 10, 30 и 50, соответственно. При одновременном повышении  $\epsilon$  для каждого из материалов, увеличивается общий коэффициент отражения для всей МПЛ (кривые 2(а) и 3(а)), но вместе с этим происходит неравномерное увеличение потерь по мощности/напряжению, коэффициент передачи снижается (кривые 2(б) и 3(б)).

**Заключение.** В результате проведенных исследований были рассчитаны параметры матрицы рассеяния ЭМ-волн для нескольких моделей микрополосковых структур. Показано влияние внутренней области, расположенной в центре МПЛ под полосковой линией, содержащей воздух, сегнетоэлектрик или многослойный диэлектрик, на вносимые потери и потери на отражение. В случае внесения воздушной полости или композита из трёх материалов с высокими

значениями диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_1 = 70$ ,  $\epsilon_2 = 50$ ,  $\epsilon_3 = 30$ ) происходит стабилизация значений коэффициента отражения/передачи в широкой области частот (5–6 ГГц – 9 ГГц).

## ЛИТЕРАТУРА

1. СВЧ фазовращатель на основе феррит-пьезоэлектрических композиционных материалов / А.С. Татаренко, М.И. Бичурин, А.В. Филиппов и др. // Вестник Новгородского государственного университета. – 2004. – № 28. – С. 156–158.
2. Сержантов А.С. Резонансные полосковые структуры и частотно-селективные устройства на их основе с улучшенными характеристиками : дис. ... докт. техн. наук. – Красноярск, 2015. – 316 с.

## ПОГЛОТИТЕЛИ Суб-ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

**К.В. Симонова, В.Д. Москаленко, К.В. Дорожкин**

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, А.В. Бадьин*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: ks\_simka@mail.ru

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования электромагнитного отклика гексагональных структур, изготовленных с помощью аддитивной технологии. Приведены частотные зависимости коэффициента пропускания гексагональных структур в диапазоне частот 34-1600 ГГц. Приведен сравнительный анализ электромагнитных характеристик образцов с различной толщиной.

**Ключевые слова:** Суб-ТГц, электромагнитный отклик, поглощение, гексагональные структуры, TDs-спектроскопия.

**Введение.** В настоящее время наблюдается тенденция к переходу телекоммуникационных технологий в область крайневысокочастотного (КВЧ) диапазона, рассматриваются возможности использования Суб-ТГц участка спектра для повышения пропускных способности каналов передачи информации [1]. Одним из актуальных вопросов при создании современных систем передачи данных является применение радиопоглощающих конструкций сложной геометрической формы с малыми весовыми параметрами. Активно развивающиеся методы 3D-печати открывают перед проектировщиками и производителями КВЧ техники возможности создания поглотителей за счет использования электропроводящего материала [2-4] и анизотропных свойств геометрических структур [5]. При этом конструирование легких поглощающих конструкций возможно за счет применения гексагональной ячеистой структуры из электропроводящих материалов, распространён-

ными наполнителями которых являются модификации углерода. Целью данной работы является создание радиопоглощающих конструкций со сложной геометрической формой.

**Методы и материалы.** Для исследования были созданы 3D-модели двух образцов гексагональных структур и изготовлены с помощью 3D-печати методом послойного наплавления. Образцы представляют собой гексагональную структуру на основе акрилонитрилбутадиенстирола (АБС) с углеродными нановолокнами. Диаметр ячеек составляет 1 мм, но с различной толщиной: образец № 1 имеет толщину 3,47 мм, образец № 2 – толщину 1,3 мм. Для создания конкретной модели использовался метод послойного наплавления, поскольку данный метод позволяет создавать объекты с различными геометрическими формами.

Измерения электромагнитного отклика проводились с использованием импульсного спектрометра реального времени Teravil T-Spec 1000. Конфигурация установки включает в себя модули «на отражение» и «прохождение». Средняя мощность используемого лазерного импульса составляет 25 мВт при диаметре пучка 2 мм. При помощи детектора на основе фотопроводящей антенны регистрировались импульсы фототока с последующей математической обработкой методом быстрого преобразования Фурье и расчетом коэффициентов прохождения, отражения и поглощения в диапазоне частот 0,1-1,6 ТГц.

Для уточнения частотных особенностей спектров ниже 100 ГГц проводились измерения коэффициента прохождения на ЛОВ-спектрометре (СТД-21). СТД-21 представляет собой спектрометр, у которого лампа обратной волны (ЛОВ) используется в качестве непрерывного источника терагерцового излучения, и акустооптического преобразователь (ячейка Голея) в качестве детектора.

**Результаты.** На основе данных, полученных при помощи спектрометра терагерцового диапазона и импульсного спектрометра с временным разрешением в диапазоне частот 34-1600 ГГц были построены частотные зависимости коэффициентов прохождения гексагональных структур (рис. 1).

На рис. 2 показан коэффициент отражения образцов № 1 и № 2. Из графика (рис. 2) можно заметить, что коэффициент отражения образца № 1 снижается быстрее после 200 ГГц в сравнении с образцом № 2. На рис. 3 представлен коэффициент поглощения образцов № 1 и № 2.

Анализ частотной зависимости коэффициента поглощения показывает, что полученные структуры обладают высоким коэффициентом поглощения ( $>0,85$ ) на частотах выше 100 ГГц.

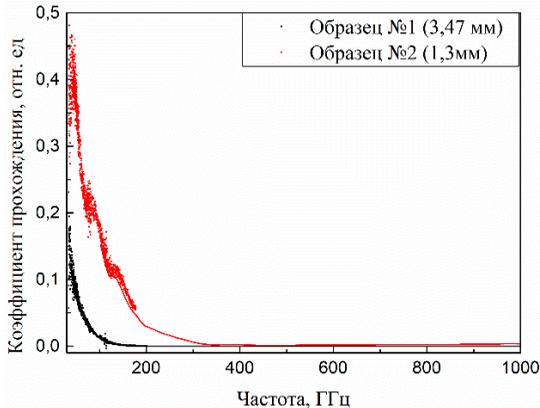


Рис. 1. Частотная зависимость коэффициента прохождения образцов гексагональных структур № 1 и № 2

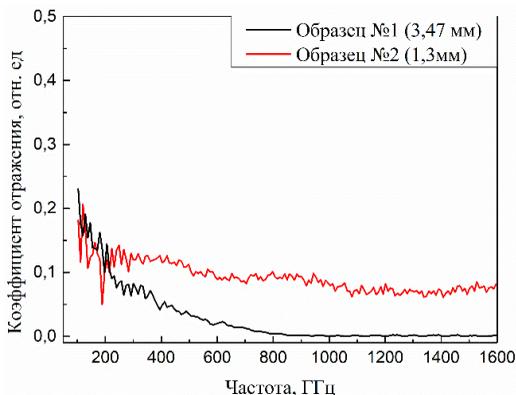


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента отражения образцов гексагональных структур № 1 и № 2

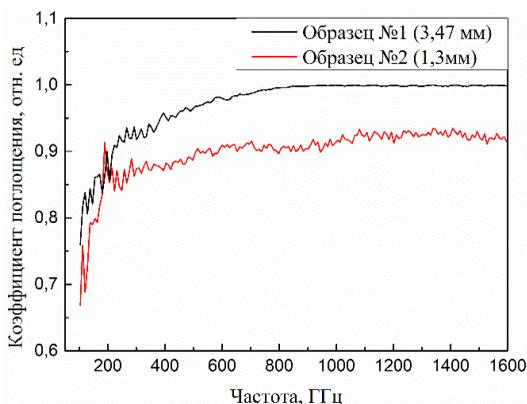


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента поглощения образцов гексагональных структур № 1 и № 2

При этом поглощение электромагнитного излучения структурой толщиной 1,3 мм (Образец № 2) не превышает 90% во всем исследуемом частотном диапазоне. Структура толщиной 3,47 мм (Образец № 1) на частотах выше 800 ГГц полностью поглощает электромагнитное излучение.

**Заключение.** Полученные результаты показывают перспективность использования технологии 3D-печати для

создания элементов, экранирующих и поглощающих КВЧ излучение. Гексагональная симметрия позволяет плотно располагать в материале элементарные ячейки, добиваясь малого веса и высокой прочности требуемой конструкции.

*Исследование выполнено при поддержке совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-1709.2020.8.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлева Л.М. Повышение пропускной способности оптических линий связи // Проблемы передачи и обработки информации. – 2010. – С. 20–26.
2. Development of multifunctional nanocomposites with 3-D printing additive manufacturing and low graphene loading / B.E. Yamamoto, A.Z. Trimble, B. Minei et al. // J. Thermoplast. Compos. Mater. – 2019. – Vol. 32, No. 3. – P. 383–408.
3. Бадьин А.В., Дорожкин К.В., Кулешов Г.Е. Диэлектрические свойства композитов на основе полимерных матриц и высокодисперсного углерода в Суб-ТГц диапазоне // Новые материалы и перспективные технологии. Шестой междисциплинарный научный форум с международным участием. – М., 2020. – С. 39–42.
4. Матлахов В.В., Бадьин А.В. Электромагнитный отклик от многослойного материала, изготовленного по 3d технологии // Актуальные проблемы радиофизики (АПР 2019). VIII Международная научно-практическая конференция. – Томск, 2019. – С. 191–192.
5. Anisotropy of electrical properties of 3D-printing MWCNT composites at the THz frequency range / A.V. Badin, G.E. Kuleshov, K.V. Dorozhkin et al. // International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz. – 2018. – P. 8509938.

## **РЕЗОНАТОРНАЯ ДИАГНОСТИКА ВОЛОКНА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ**

**Д.Д. Тетерина**

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук И.О. Дорофеев*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: teterinadar@gmail.com

**Аннотация.** Работа посвящена оценке возможности бесконтактной диагностики диэлектрического волокна для 3D-печати в открытом резонаторе сантиметрового диапазона длин волн. Получены значения сдвигов резонансных частот основных типов колебаний открытого резонатора в диапазоне от 8 до 16 ГГц.

**Ключевые слова:** открытый резонатор, 3D-печати, диэлектрическая проницаемость.

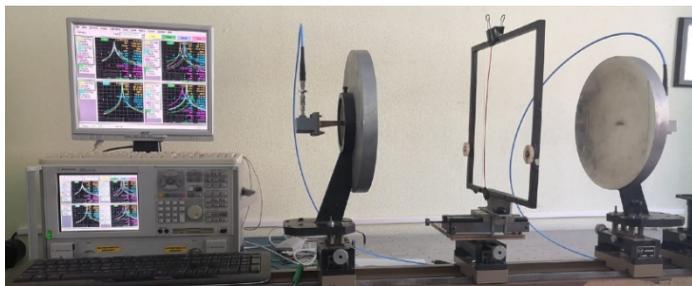
**Введение.** В настоящее время активно развивается технология 3D-печати, позволяющая создавать объекты сложной формы и структуры из различных материалов за небольшое время с минимальными отходами.

В качестве материала для 3D-печати методом послойного наплавления используются различные запатентованные полимерные материалы [1], например, полилактид (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полиэтилентерефталат-гликоль (PETG, PET, PETT), нейлон (Nylon), высокопрочный полистирол (HIPS). Производство филаментов происходит путем экструзии композитного материала, при которой сложность обеспечения однородности филаментной нити. В материале возможно наличие не только неоднородностей диаметра, но также и неоднородностей, связанных с наличием воздушных полостей. Неоднородности материала негативно сказываются на качестве напечатанного изделия, поэтому существует необходимость осуществления контроля качества радиофиламента перед печатью изделия (образца). Целью работы является исследова-

ние однокомпонентных полимерных волокон, применяемых, прежде всего, в трехмерных печатающих устройствах.

Для диагностики диэлектриков применяется метод открытого резонатора (ОР). ОР обладает рядом преимуществ, таких, как удобство размещения исследуемых образцов, разреженный спектр основных колебаний, простота осуществления селекции высших мод. ОР уже успешно применялся для осуществления контроля характеристик остеклованного микропровода [2].

**Методы и материалы.** Измерительная установка, изображенная на рисунке 1, представляла собой ОР следующей конфигурации: два сферических отражателя радиусом кривизны 39,21 см и диаметром 28,65 см, расположенных на расстоянии 53,5 см друг от друга. Между отражателями возбуждается основной тип колебаний и в центре между зеркалами волна имеет плоский фронт.



*Рис. 1. Экспериментальная установка, состоящая из векторно-го анализатора цепей Agilent E8363B и измерительного открытого резонатора трехсантиметрового диапазона*

Объектами исследования являются однокомпонентные тонкие диэлектрические цилиндры из ABS, PLA, ASA пластика диаметром 1,75 мм. В качестве регистрируемых характеристик, показывающих изменения диаметра или диэлектрической проницаемости образцов используются

сдвиг резонансной частоты и уширение резонансной кривой. Образцы располагались в центре резонатора ортогонально его оси, параллельно вектору электрического поля в его пучности. Для того чтобы избежать смещения образца относительно максимума поля, перед измерением каждой моды выполнялась пространственная подстройка образца.

**Результаты.** В результате измерений получены значения сдвига резонансной частоты и уширения полосы пропускания открытого резонатора с образцами промышленного пластика (рис 2, 3). Построенные с помощью математической модели кривые, показанные на рисунках 2 и 3 пунктирными линиями, позволяют оценить значения диэлектрической проницаемости образцов, стоит отметить, что даже визуально можно наблюдать отличия параметров различных пластиков. Однако при сравнении с известными данными установлено, что погрешность полученных значений действительной части диэлектрической проницаемости, рассчитанной по формуле (1) составляет 15-20% по сравнению с [3].

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [A + \sqrt{A^2 + 4tg^2\varphi}] \quad (1)$$

где

$A = 1 - \frac{\Delta f \lambda_0 \sqrt{1 + 4tg^2\varphi}}{F_0 d} - tg^2\varphi$ ,  $\Delta f$  – сдвиг резонансной частоты,  $F_0$  – межвидовой интервал, а  $\lambda_0 = c/f_0$ ,  $\varphi$  – угол падения волны на образец,  $d$  – толщина образца,  $f$  – резонансная частота резонатора с образцом,  $c$  – скорость света.

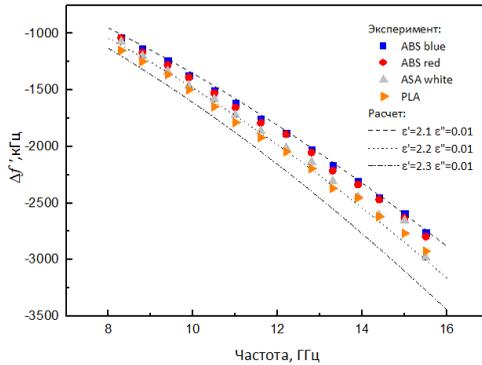


Рис. 2. Частотная зависимость сдвига резонансной частоты от открытого резонатора для различных образцов и расчетных данных

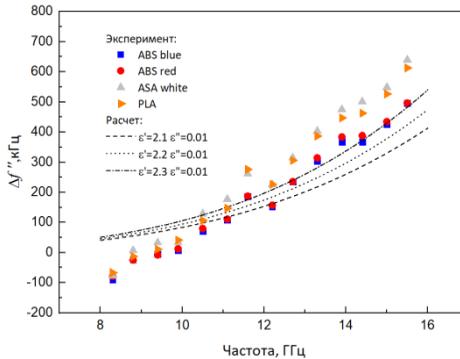


Рис. 3. Частотная зависимость уширения полосы открытого резонатора для различных образцов и расчетных данных

В случае с уширением полосы пропускания наблюдается эффект увеличения добротности из-за аддитивности потерь. Данная проблема характерна для центрального расположения объекта и связана с уменьшением потерь на дифракцию на краях зеркал. Предполагается, что наиболее универсальной является оценка действительной части диэлектрической проницаемости по сдвигу частоты.

**Заключение.** Проведенные измерения позволяют оценить действительную часть диэлектрической проницаемости. Полученные в результате данной работы данные могут быть положены в основу резонаторного метода диагностики диэлектрического полимерного волокна в процессе производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дожделев А.М., Лаврентьев А.Ю. Оптимальный выбор пластика для 3d печати // Юность и знания – гарантия успеха. – 2019. – С. 180–183.
2. Дорофеев И.О., Дунаевский Г.Е. Устройство квазиоптической резонаторной диагностики остеклованного литого микропровода // Дефектоскопия. – 2014. – № 12. – С. 50–57.
3. Lamb J.W. Miscellaneous data on materials for millimetre and submillimetre optics // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1996. – Vol. 17, No. 12. – P. 1997–2034.

## ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ С ГЛУБОКИМИ ЦЕНТРАМИ

**М.С. Трофимов**

*Научный руководитель: И.Д. Щербаков*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: mihant1999@yandex.ru

**Аннотация.** Одним из важнейших параметров, определяющих эффективность работы детекторов ионизирующих излучений, является дрейфовая подвижность носителей заряда. В данной работе проведено исследование подвижности электронов в HR-GaAs:Cr детекторах времяпролетным методом монополярного дрейфа.

**Ключевые слова:** твердотельный детектор, арсенид галлия, подвижность носителей заряда, метод монополярного дрейфа.

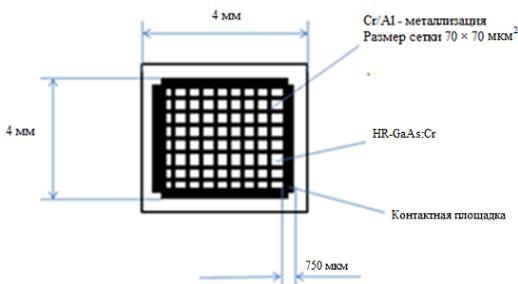
**Введение.** Серьезной и актуальной проблемой при разработке твердотельных детекторов, для регистрации ионизирующих излучений на станциях синхротронного излучения и коллайдерах, является выбор полупроводникового материала, который обладал бы наиболее подходящими электрофизическими свойствами для этих целей. В настоящее время наибольший интерес из бинарных и тройных полупроводниковых соединений представляет арсенид галлия (GaAs), компенсированный хромом диффузионным методом. Эта примесь хорошо изучена и используется для изготовления высокоомных HR-GaAs:Cr структур (где HR – High Resistivity). Экспериментальные значения удельного сопротивления структур на основе данного материала, составляют более  $10^9$  Ом·см, что позволяет минимизировать уровень темнового тока в цепи и повысить соотношение сигнал-шум [1,2].

Анализ литературных данных показывает, что значение подвижности электронов в материале на основе HR-

GaAs:Cr до сих пор в точной степени не определено и варьируется в пределах  $(2500-4500) \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$  [2,3]. В рамках данной работы проведено измерение подвижности электронов в HR-GaAs:Cr образцах методом монополярного дрейфа.

**Экспериментальные образцы и методы исследования.** Экспериментальные образцы представляют собой полупроводниковые детекторы с толщиной активной области  $\approx 500 \text{ мкм}$  и площадью  $4 \cdot 4 \text{ мм}^2$  на основе арсенида галлия, компенсированного глубокой акцепторной примесью, в качестве которой выступает хром. Компенсация хромом производилась диффузионным методом. Для этого, на поверхность пластин был напылен слой хрома и диоксида кремния (в качестве термостойкого, защитного слоя). Диффузия производилась в высокотемпературной печи, при температурах отжига  $(900-1100) \text{ }^\circ\text{C}$  [4]. Для формирования контакта металл-полупроводник использовалась установка электронно-лучевого и магнетронного напыления. Используя методы фотолитографии, верхний контакт был сформирован в виде «сетки», размером  $70 \times 70 \text{ мкм}^2$  (рис. 1).

Таким образом, на основе HR-GaAs:Cr пластины были сформированы семь детекторов в виде следующей структуры: Al/Cr/NiV-HR-GaAs:Cr-NiV/Cr/Al.



*Рис. 1. Топология исследуемой HR-GaAs:Cr структуры*

На рисунок 2 представлена схема экспериментальной установки для измерения дрейфовой подвижности методом монополярного дрейфа. Внешним генератором задавалась рабочая частота 5 ГГц, а лазерным контроллером – интенсивность импульсов излучения. В качестве источника излучения использовался инфракрасный (ИК) лазер, с длиной волны 830 нм и длительностью импульсов 1 нс.

При засветке ИК-импульсами HR-GaAs:Cr детектора, происходила приповерхностная генерация электронно-дырочных пар в результате которой возможно было регистрировать только одну компоненту тока в зависимости от полярности приложенного смещения. При подаче напряжения смещения на детектор в диапазоне (30–500) В, в активной области индуцировалось электрическое поле, в результате которого происходил дрейф носителей заряда до противоположного электрода.

Сигнал с детектора поступал на вход усилителя с коэффициентом усиления 53 дБ, что позволяло фиксировать изначально низкую амплитуду. Затем усиленный сигнал поступал на осциллограф, синхронизованный с лазерным контроллером.

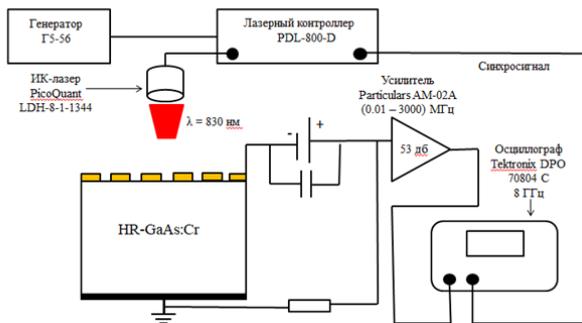


Рис. 2. Экспериментальная установка для измерения подвижности носителей заряда методом монополярного дрейфа

Для определения дрейфовой скорости электронов использовалось выражение

$$V_d = \frac{d}{t} \quad (1)$$

где  $d$  – толщина активного слоя HR-GaAs:Cr детектора, величина которой варьировалась в пределах (500 – 535) мкм

Время пролёта определялось из импульсов фототока, наведенных дрейфующими электронами на уровне полной ширины на половине высоты (ПШПВ).

Напряженность электрического поля рассчитывалась по выражению

$$E = \frac{U}{d}, \quad (2)$$

где  $U$  – напряжение, подаваемое на HR-GaAs:Cr детектор.

Среднее значение дрейфовой подвижности электронов определялось, используя выражение

$$\mu_d = \frac{V_d}{E} \quad (3)$$

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** На рис. 3 представлены импульсы фототока, наведенные дрейфующими электронами.

Рассчитав значения дрейфовой скорости и напряженности электрического поля по формулам (1) и (2) соответственно в исследуемом диапазоне напряжений, были построены зависимости средней дрейфовой скорости по HR-GaAs:Cr пластине от напряженности электрического поля в активной области детектора (рис. 4).

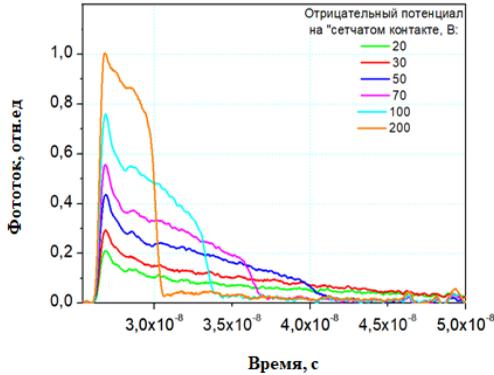


Рис. 3. Импульсы фототока, наведенные электронами в HR-GaAs:Cr детекторе

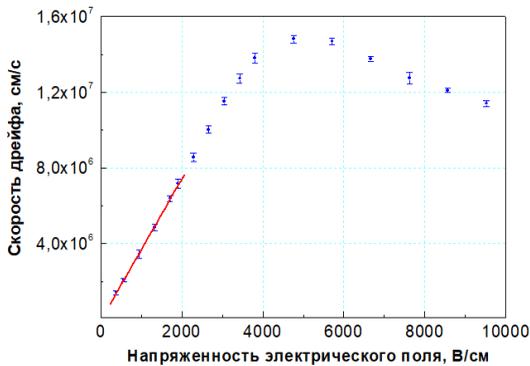


Рис. 4 Зависимость дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля, построенная в среднем интервале значений для семи HR-GaAs:Cr детекторов

Проведя линейную аппроксимацию было установлено, что линейный участок зависимости  $V_d(E)$  для семи исследуемых HR-GaAs:Cr образцов, наблюдается до напряженности электрического поля 2000 В/см. Анализируя данный участок по тангенсу наклона аппроксимирующей прямой, было рассчитано по формуле (3) среднее значение дрейфовой подвижности электронов  $\mu_n = 3740 \pm 110 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ .

**Заключение.** Проведено исследование дрейфовой подвижности электронов в HR-GaAs:Cr детекторах методом монополярного дрейфа. Среднее значение подвижности электронов составило  $\mu_n = 3740 \pm 110 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ . Определить подвижность дырок с использованием данной методики не удалось, в связи с их сверхмалым временем жизни.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. GaAs detector material made from 3-inch wafers / G.I. Ayzenshtat, D.L. Budnitsky, O.B. Koretskaya et al. ; edited by A.V. Tyazhev // Nucl. Instr. and Meth. In Phys Res. Section A. – 2004. – Vol. 531. – P. 121–124.
2. Response of HR-GaAs:Cr sensors to subnanosecond X-and  $\beta$ -ray pulses / I. Chsherbakov, P. Chsherbakov, A. Lozinskaya et al. // Journal of Instrumentation. – 2019. – Vol. 14. – C12016.
3. Detailed analysis of quasi-ohmic contacts to high resistive GaAs:Cr structures / A. Lozinskaya, I. Chsherbakov, I. Kolesnikova et al. // Journal of Instrumentation. – 2019. – Vol. 14. – C11026.
4. Хлудков С.С., Толбанов О.П., Вилисова М.Д. Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия с глубокими примесными центрами: монография. – Томск : Издательский Дом ТГУ, 2016. – 258 с.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЛУЧЕВОЙ АНТЕННЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ С ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

**Т.И. Чурикова**

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, Е.В. Балзовский*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: ch98tanya@gmail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены особенности и применение приемо-передающих многолучевых антенн. Описаны схемы построения многолучевых антенн. Описана модель шестилучевой приемо-передающей антенны с линейной поляризацией.

**Ключевые слова:** многолучевая антенна, диаграммообразующая схема, диаграмма направленности.

**Введение.** Одной из актуальных проблем современной антенной техники является построение многофункциональных пассивных и активных антенных систем, обеспечивающих высокоэффективную работу различных радиотехнических комплексов. Возможный путь реализации таких антенных систем состоит в использовании многолучевых антенн (МА). Интерес к МА определяется их способностью формировать в пространстве набор диаграмм направленности (ДН), каждой из которых соответствует определенный входной канал. Использование МА обеспечивают увеличение емкости радиосетей при более высоком качестве обслуживания. Что позволяет использовать МА в качестве, как приемных, так и передающих антенн в системах спутниковой связи [1], в устройствах, обеспечивающих цифровую связь [2, 3], а также в радиолокационных станциях[4].

Целью работы является получение модели МА цилиндрической формы, работающей в заданном диапазоне час-

тот 862...870 МГц и 902...928 МГц, с коэффициентом усиления не менее 11 дБ. В работе представлены результаты моделирования шестилучевой приемо-передающей антенны с линейной поляризацией.

**Особенности и применение многолучевых антенн.** Обычно МА состоит из антенных элементов (излучающая часть) и диаграммообразующей схемы (ДОС) – устройства, предназначенного для формирования амплитудно-фазового распределения токов, возбуждающих антенные элементы. Излучающая часть может быть выполнена в виде антенной решетки или в виде раскрытия апертурной антенны. В МА число входов ДОС соответствует количеству формируемых лучей, а к выходам ДОС присоединены антенные элементы, то есть число выходов равно количеству элементов антенной решетки.

ДОС может представлять собой совокупность облучателей с зеркалом или линзой для апертурных антенн. Для антенных решеток ДОС проектируется на основе матриц Бласса (последовательная схема) или матриц Батлера (параллельная схема). С развитием быстродействующих АЦП получили распространение антенные решетки, в которых каждый элемент независимо регистрирует и осуществляет первичную обработку сигнала, а суммарные характеристики антенны формируются после оцифровки при математической обработке. Такие антенны получили название цифровые антенные решетки.

**Модель многолучевой антенной решетки с линейной поляризацией.** На рисунке 1 представлена модель МА цилиндрической формы с конусообразной излучающей частью. Излучающая часть разделена на шесть излучателей, к каждому из которых подведен питающий порт. Высота антенны 460 мм, ширина 414 мм.

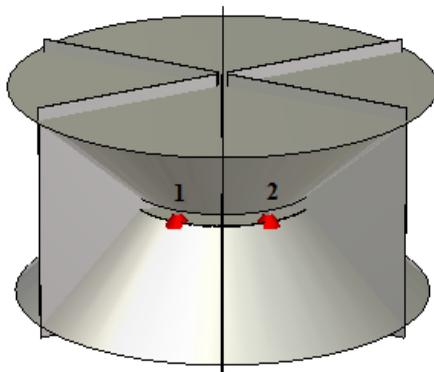


Рис. 1. Модель многолучевой антенны

**Результаты численного моделирования.** Моделирование антенны проводилось в лицензионной версии программы CST Studio Suite. Результаты расчета частотной зависимости модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  при питании одним из портов приведены на рисунке 2. Поскольку порты 1–6 идентичны друг другу, приведены характеристики только для порта 1. Антенна имеет минимальный коэффициент отражения на частоте 900 МГц. Полоса пропускания антенны по уровню  $|S_{11}| \leq -10$  дБ составляет 845...960 МГц.

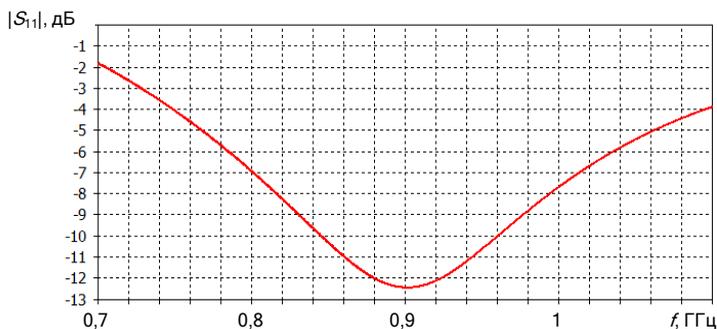


Рис. 2. Модуль коэффициента отражения от 1 порта антенны

Были исследованы ДН антенны на частотах 800, 900 и 1000 МГц. На рисунке 3 приведены результаты расчета ДН в  $E$ -плоскости при возбуждении антенны портом номер 1. Здесь ДН антенны умножена на максимальное значение коэффициента усиления  $G$ . Для остальных портов 2-5 результаты аналогичные.

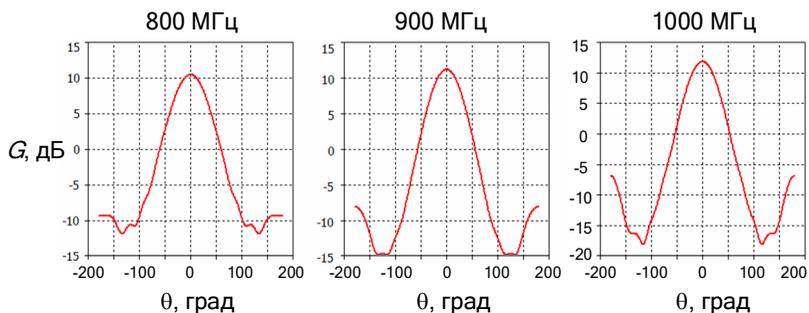


Рис. 3. Диаграмма направленности антенны

Излучение антенны линейно поляризовано, вектор напряженности электрического поля параллелен оси конусов антенны.

Анализ полученных результатов моделирования МА позволяет заключить, что с увеличением частоты растет значение коэффициента усиления, уменьшается ширина ДН, также незначительно увеличивается уровень боковых лепестков. На центральной частоте рабочего диапазона 900 МГц при возбуждении от каждого порта антенна имеет следующие характеристики направленности: ширина ДН по уровню  $-3$  дБ от максимума составляет  $54^\circ$ , коэффициент усиления равен 11,2 дБ, уровень боковых лепестков  $-19,3$  дБ.

**Заключение.** Предложена модель шестилучевой приемо-передающей антенны и численно исследованы её характеристики. Полоса пропускания антенны 845...960 МГц. Излучение антенны линейно поляризовано, ширина ДН

антенны составляет  $54,4^\circ$  при коэффициенте усиления, равном 11,2 дБ. Полученные результаты соответствуют цели исследования. Дальнейшая работа будет направлена как на улучшение характеристик рассмотренной выше антенны, так и на создание многолучевой антенны с круговой поляризацией.

*Автор благодарит доцента кафедры радиофизики ТГУ канд. физ.-мат. наук Ю.И. Буянова за предоставленную модель антенны и консультации.*

*Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0038*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антепов В.Р., Шишлов А.В., Эйдус А. Многолучевые антенные системы HTS // Спутниковая связь и вещание. – 2014. – С. 54–67.
2. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. – London : Academic Press, 2018. – 441 p.
3. Osseiran A., Monnerat J. F., Marsch P. 5G Mobile and wireless communications technology. – Cambridge : Cambridge University Press, 2016. – 406 p.
4. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М. : Радиотехника, 2005. – 368 с.

## **РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ ЧАСТИ УСТРОЙСТВА УСКД-АГРО И МОДЕРНИЗАЦИЯ ЕЕ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛА**

**Д.И. Фильченко, М.С. Южаков, А.К. Берзин,  
Д.А. Пидотова**

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: Filchenko-Daniil@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются разработка, испытание и совершенствование конструкции печатных плат и корпусов для устройства сбора климатических данных. Также представлены результаты исследования автономности устройства и результаты тестирования печатной платы и устройства в сборе в термокамере.

**Ключевые слова:** система автоматизированного проектирования, топология платы, корпус устройства, климатические данные.

**Введение.** При развитии любого инициативного проекта наступает момент, когда необходимо переходить от теории к созданию прототипов, а затем и к готовым, рабочим вариантам устройства. На этом этапе начинается разработка аппаратной и программной частей устройства. Актуальность работы состоит в том, что результаты позволят создать компактное и дешевое, по сравнению с существующими на рынке аналогами, устройство для проведения измерений, исследований и сбор метеорологических данных об окружающей среде в автономном режиме. Данное устройство в дальнейшем послужит основой для модернизации и создания новых устройств.

Цель работы – разработка аппаратной части устройства сбора климатических данных «УСКД-агро». Задачи: разработать печатную плату, спроектировать модели корпуса, и провести испытания устройства «УСКД-агро».

**Методы и материалы.** «УСКД-агро» представляет собой устройство для сбора климатических данных и состоит из платы, корпуса и внешних устройств. Разработка составных частей устройства предполагает проведение разнообразных работ: конструирование и прототипирование.

Основным назначением корпуса является размещение внутри него электрической платы, аккумуляторной (АКБ) и солнечной батарей. При этом необходимо обеспечить хорошую циркуляцию воздуха внутри корпуса и снизить вероятность попадания в него воды. Для этого под углом к стенке корпуса сделаны отверстия диаметром 6 мм. Корпус представляет из себя круглый стакан с направляющими под плату, местами для крепления батарей типоразмером 18650 и резьбой в верхней части корпуса для закручивающейся крышки под резьбу 76×4мм. Габариты корпуса составили 75×75×106 мм при массе 101 г. При проектировании корпуса использовалась студенческая версия системы автоматизированного проектирования (САПР) Autodesk Fusion 360. Производство корпусов осуществлялось из ABS пластика с использованием 3D принтеров Лаборатории терагерцовых исследований.

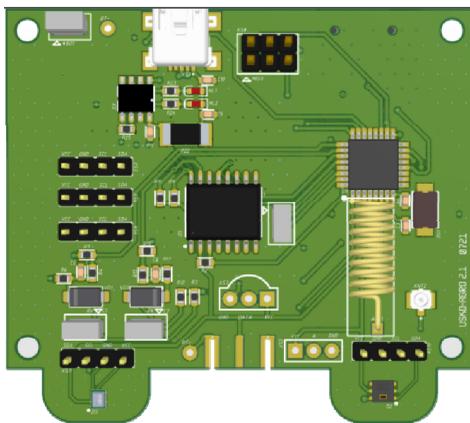
При проектировании печатной платы основным параметром являлся ее размер, который у готовой платы составил 65мм×57,5мм. В течение разработки и тестирования плата претерпела несколько изменений по сравнению с первой версией [1]. В последней версии на плате появилась отдельная позиция для подключения датчика уровня осадков. При изменении уровня воды у датчика меняется емкость. Эта емкость вместе с резистором, расположенным на плате, образует фильтр нижних частот, и изменение емкости приводит к изменению частоты среза. Сигнал детектируется детектором амплитудно-модулированных сигналов и при помощи делителя приводится к опорному уровню аналого-цифрового преобразователя.

При разводке печатной платы использовалась САПР Altium Designer. Плата была разработана по стандартному классу точности на двухслойном текстолите FR-4 с толщиной готовой печатной платы 1,6 мм с толщиной меди 35 мкм ( $1\text{oz}/\text{ft}^2$ ). Платы заказывались и производилось в Китае. Сборка осуществлялась на месте.

Исследование энергоэффективности устройства проводилось следующим образом. В качестве источника питания использовалось два литий-ионных аккумулятора, подключенных параллельно. Показания датчиков передавались 1 раз в мин при комнатных условиях.

Исследование точности измерений температуры воздуха устройством проводилось в камере тепла-холода ТНС-80 фирмы «Теста».

**Результаты и обсуждение.** В результате работы были разработаны: печатная плата, представленная на рисунке 1, и корпус для печатной платы. Произведены первичные испытания устройства и собраны климатические данные.



*Рис. 1. Печатная плата устройства УСКД-агро.*

По полученным с устройства климатическим данным построены графики изменения температуры внутри каме-

ры и показания температуры датчика (рис 2). Скорость изменения температуры внутри камеры составляла 2 град./мин. Как можно видеть из рисунка 2, абсолютную погрешность устройства не превышает 5–6 °С, что может быть обусловлено инерционностью используемых датчиков к изменению температуры, а также недостаточной конвекцией воздуха внутри корпуса устройства. Для проверки этого утверждения необходимо провести дополнительные исследования по влиянию изменения температуры окружающей среды на показания датчиков.

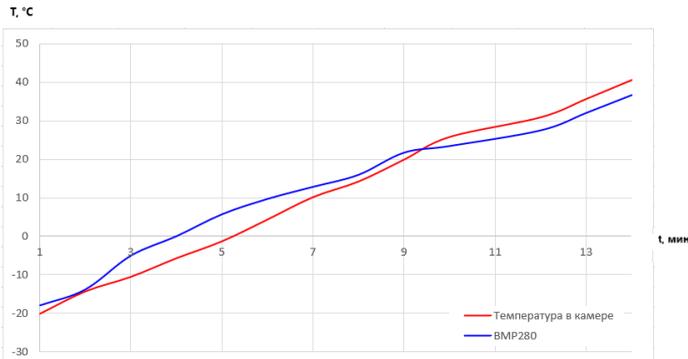


Рис. 1. График изменения температуры внутри камеры и показания температуры датчика

Исследование энергоэффективности показало, что за 1280 часов непрерывной работы напряжение АКБ изменилось на 0,82 В. Исходя из этого получаем среднее потребление 640 мкА/час с учетом отношения времени передачи/приема данных 1:20. В предыдущей версии прототипа потребление прибора составляло в среднем 2-3 мА/ч. Полученный результат говорит о улучшении энергоэффективности в 4 и более раз по сравнению с предыдущей версией устройства.

**Заключение.** Проведенные испытания показали, что аппаратная часть показывает устойчивую работу и хорошую энергоэффективность. Продолжаются работы по усовершенствованию печатной платы и корпуса, а также апробация устройства в условиях, приближенных к реальным.

При выполнении работы использовалось оборудование Лаборатории терагерцовых исследований и ЦКП «Центр радиоизмерений» ТГУ. Выражаем благодарность доценту Доценко О.А., и доценту Бадьину А.В., за оказанную всестороннюю помощь в разработке и создании устройства сбора климатических данных «УСКД-агро», а также проведении измерения температурных характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фильченко Д.И. Разработка схемотехнического решения для устройства сбора климатических данных УСКД-АГРО // Труды семнадцатой Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов, г. Томск, 11–15 мая 2020 г. – 2020. – С. 95–98. – (URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000795396> (дата обращения 19.04.2021)).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ И ФЕРРИМАГНЕТИКОВ

**Т.Н. Шематило**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук,  
Г.Е. Кулешов*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: shematilo2404@mail.ru

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию электромагнитных характеристик композиционных материалов с включением сегнетоэлектрика и гексаферрита в КВЧ диапазоне. Представлены результаты экспериментальных исследований электромагнитного отклика на измерительных установках ЛОВ-спектрометре СТД-21 и терагерцовом спектрометре реального времени T-Spec 1000. Проведено сравнение полученных результатов.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, электромагнитный отклик, КВЧ, аддитивные технологии, сегнетоэлектрики, диэлектрическая проницаемость, ферримагнетики, акрилонитрилбутадиенстирол.

**Введение.** В настоящее время из-за активного технологического перехода современного радиооборудования во все более высокочастотные диапазоны рабочих частот возникает потребность в материалах, которые эффективны для согласования и защиты различных узлов аппаратуры. В этих аспектах особое внимание привлекает разработка новых материалов, которые могут быть использованы для аддитивной технологии 3D-печати [1,2]. С их помощью можно получать структуры с уникальными электрофизическими свойствами, с плавно или резко меняющимися значениями диэлектрической проницаемости конструкции, высокими или низкими уровнями экранирования (погло-

щения) в широком диапазоне частот, заданной электропроводностью и т.д. Подобные материалы дают большой спектр возможностей по созданию трёхмерных структур эффективно взаимодействующих с электромагнитным излучением в СВЧ и КВЧ диапазонах [3,4]. При создании материала с высокой диэлектрической проницаемостью и низкими потерями особый интерес представляет использование ABS с внесением  $\text{BaTiO}_3$  и  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ . Цель работы заключается в разработке и исследовании композиционных материалов на основе сегнетоэлектрика  $\text{BaTiO}_3$  и гексаферрита  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ .

**Методы и материалы.** Для исследования были изготовлены образцы из ABS с 25 мас.% гексаферрита  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  и 25 мас.% сегнетоэлектрической керамики  $\text{BaTiO}_3$  с частицами менее 100 микрон. Порошки добавляли в растворенный ацетоном пластик, и полученная смесь подвергалась ультразвуковой диспергации мощностью 75 Вт в течении 4 минут. Измельченную полимеризованную смесь пропускали через экструдер для формирования филаментной нити для 3D принтера. Далее печатались плоскопараллельные пластины с толщиной 1,2 мм. После печати образцы подвергались механической обработке для последующих измерений.

**Таблица 1.** Параметры Экспериментальных образцов

№	ABS (мас. %)	$\text{BaTiO}_3$ (мас. %)	$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (мас. %)	$\epsilon'$	$\epsilon''$
1	100	0	0	2,64	0,05
2	50	50	0	4,98	0,10
3	50	0	50	4,44	0,05

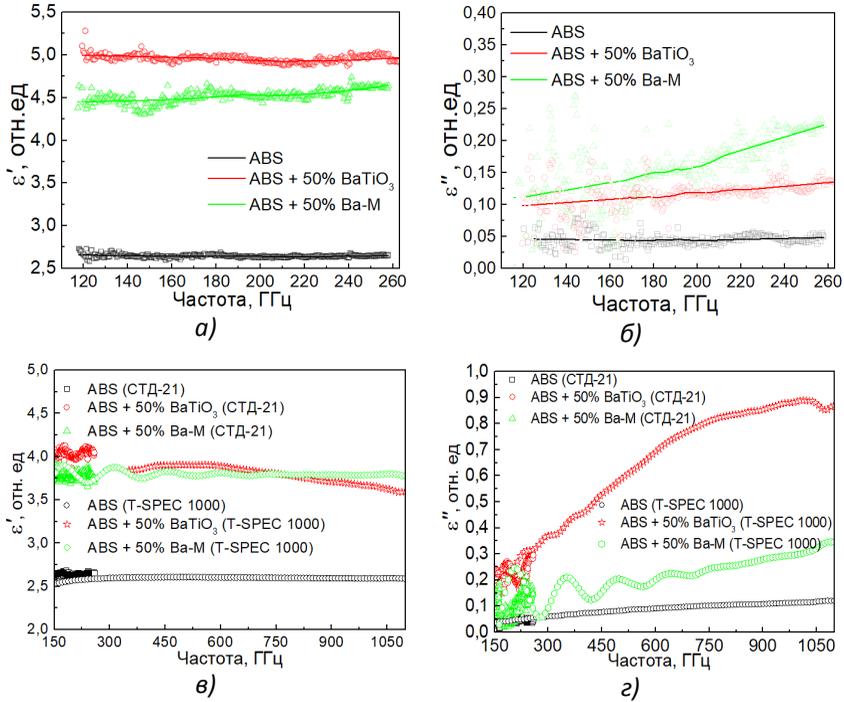


Рис. 1. Действительные (а) и мнимые (б) части комплексной диэлектрической проницаемости композитов 1-3 в диапазоне частот 115–258 ГГц на спектрометре СТД-21, (в) и (г) действительные и мнимые части измеренные на терагерцовом спектрометре реального времени T-Spec 1000

Измерения электромагнитного отклика исследуемых образцов композитов производились двумя установками ЛОВ-спектрометром и спектрометром с временным разрешением (TDS) T-Spec 1000.

**Результаты.** На рисунке 1 представлены результаты исследования комплексной диэлектрической проницаемости образцов композитов на основе ABS пластика с гексаферритом и сегнетоэлектриком. Можно наблюдать, что при включении феррита в образец значения действительной части комплексной диэлектрической проницаемости

меньше, чем в образце, содержащий 50% мас. сегнетоэлектрической керамики. Так же стоит обратить внимание на значения мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости, при добавлении феррита в композиционный материал. Потери в образце на низких частотах значительно увеличиваются и больше чем в композите с BaTiO<sub>3</sub>. Данное явление вероятнее всего характеризуется проводимостью материала. Измерения композита, содержащего 100% ABS пластика на двух измерительных установках, совпадают.

**Заключение.** Экспериментальные исследования мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости с использованием измерительных установок на основе ЛОВ-спектрометра СТД-21 и терагерцового спектрометра реального времени T-Spec 1000 совпадают в пределах погрешности. Материал на основе ABS пластика с гексаферритом можно использовать в качестве согласующего поглощающего слоя для снижения уровня отраженного излучения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Investigations for thermal and electrical conductivity of ABS-graphene blended prototypes / R. Singh, G.S. Sandhu, R. Penna et al. // *Materials journal*. – 2017. – Vol. 10. – P. 1–13.
2. Fabrication and electromagnetic properties of carbon-based iron nitride composite / L. Dai, S. Xie, M. Yu et al. // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2018. – Vol. 466. – P. 22–27.
3. Badin A.V., Kuleshov G.E., Zhuravlev V.A. Ferromagnetic resonance in 3D-printing hexagonal ferrite BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> composite at the EHF frequency range // *Proc. 44<sup>st</sup> Int. Conf. Infrared Millimeter and Terahertz waves (IRMMW-THz)*. – Paris, 2019. – P. 1–2.
4. Kanehashi S. Development of biobased microwave absorbing composites with various magnetic metals and carbons // *Sci.* – 2016. – Vol. 133, No. 44. – P. 1–9.

*Секция 2*

**Оптика, фотоника и оптоинформатика**

## **К ВОПРОСУ О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ДАТЧИКА СМЕЩЕНИЯ МАЯТНИКА ЦЕЛЬНЕРА**

**А.А. Гунько, И.Д. Кравцов, Д.А. Лузянин**

*Научный руководитель: профессор, докт. техн. наук,  
Г.Е. Дунаевский*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия

E-mail: [kravsov-iliy@mail.ru](mailto:kravsov-iliy@mail.ru), [dmitry.clashing@gmail.com](mailto:dmitry.clashing@gmail.com)

**Аннотация.** Работа посвящена изучению чувствительности лазерного датчика смещения маятника Цельнера, фиксирующего воздействия Солнца и Луны на земную поверхность. Закреплённый в земной коре маятник Цельнера при движении тектонических плит совершает колебания, для наблюдения которых используется лазер, установленный в горизонтальном стержне маятника. Траектория движения изображения луча лазера фиксируется камерой и оцифровывается. Поскольку полупроводниковый лазер из-за малых размеров резонатора не всегда обеспечивает высокую направленность излучения, актуально изучение его расходимости и возможности применения для индикации отклонений маятника. Исследована расходимость пучка лазера, непосредственно влияющая на возможность фиксации малых смещений маятника.

**Ключевые слова:** маятник Цельнера, малые смещения, лазер, расходимость пучка.

**Введение.** Маятник Цельнера является прибором, показания которого позволяют наглядно продемонстрировать кратковременные смещения Земной коры из-за воздействия Луны и Солнца на Земную поверхность. Ограничивающим чувствительность маятника звеном является система регистрации смещений маятника. Для надежной фиксации явления необходимо обеспечить регистрацию малых смещений величиной менее 0,1 мм. Для увеличения чувствительности маятника можно использовать лазер, установленный в горизонтальном стержне маятника, и фотокаме-

ру. При этом чувствительность маятника будет определяться расходимостью пучка лазера и размерами пиксельного поля фотокамеры. Размер пиксельного поля известен из характеристик фотокамеры, а расходимость пучка полупроводникового лазера не является жестко фиксированной характеристикой и может варьироваться. Целью работы является исследование угловой расходимости пучка лазера.

**Методы и материалы.** В рассматриваемом варианте конструкции маятника Цельнера в подвешенном горизонтальном стержне расположен полупроводниковый лазер с плоскопараллельным резонатором с площадью излучения поверхности  $1 \times 1$  мм. Применена фотокамера с типом матрицы CMOS с пиксельным полем  $3000 \times 4000$  пикселей. Луч лазера направлен на чёрный непрозрачный экран, на котором отображается изображение пятна лазера.

Угловая расходимость пучка лазера  $\theta$  может быть вычислена по формуле [1]:

$$\theta = 1,22 \times \lambda/d \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны лазера,  $d$  – диаметр апертуры лазера.

Угол расходимости лазера – это плоский или телесный угол, характеризующий диаграмму направленности лазерного излучения в дальней зоне по заданному уровню плотности энергии или мощности излучения по отношению к их максимальному значению [2].

Высший тип колебаний – это монотонно возрастающая напряжённость поля, направленная от центра к периферии в радиальном направлении [3].

Применяя соотношение (1) можно найти угловую расходимость пучка лазера. Согласно сертификату к лазеру, его длина волны может лежать в пределах 635–670 нм. Диаметр апертуры лазера равен 2 мм.

Линейный диаметр светового пятна  $D$  можно рассчитать по формуле [4]:

$$D = d + 2L \times \tan \theta, \quad (2)$$

где  $L$  – расстояние от лазера до экрана.

**Результаты.** Проведен расчет угла расходимости пучка и проведены измерения диаметра пятна излучения лазера на расстояниях от 10 см до 160 см.

Из расчётов следует, что угол расходимости лазера лежит в пределах  $2,79''$ – $2,94''$ . Для оценки значений линейного диаметра светового пятна  $D$  используем среднее значение угла –  $2,865''$ .

На рис. 1 приведены результаты расчета линейного диаметра светового пятна  $D$  для луча с углом расхождения  $2,865''$  на расстояниях от 10 см до 160 см (рис. 1).

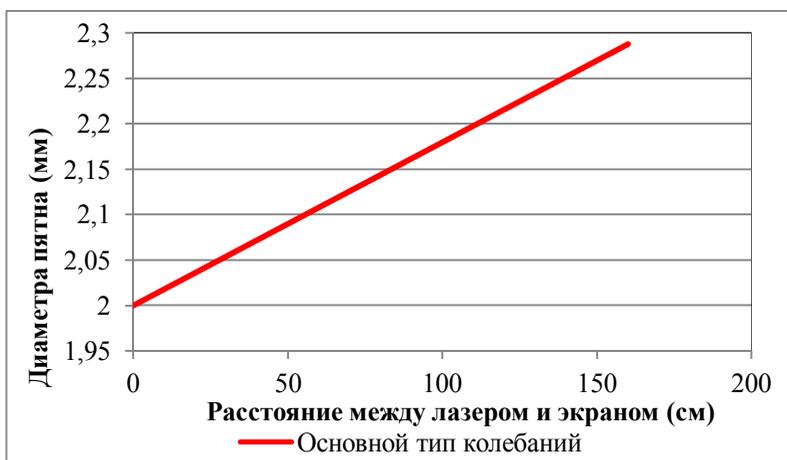


Рис. 1. Теоретический расчёт зависимости диаметра пятна от расстояния между лазером и экраном

На рис. 2 приведены результаты измерений диаметра видимого пятна излучения лазера высших типов колебаний и основного типа колебаний на экране (оно заведомо шире

рассчитанного по формулам (1) и (2), описывающим диаметр пучка на уровне 1/2 от максимальной мощности).

Из результатов измерений следует, что при расстоянии до 100 см от лазера до экрана высшие типы колебаний не проявляются на фоне основного типа колебаний. На расстоянии в 110 см от лазера до экрана высшие типы колебаний начинают проявляться, и далее наблюдаются со значительно большими углами раскрыва.

Угловая расходимость пучка лазера  $\theta$ , полученная по результатам измерений диаметра пятна лазера на чёрном экране, составила  $7,9''$ .

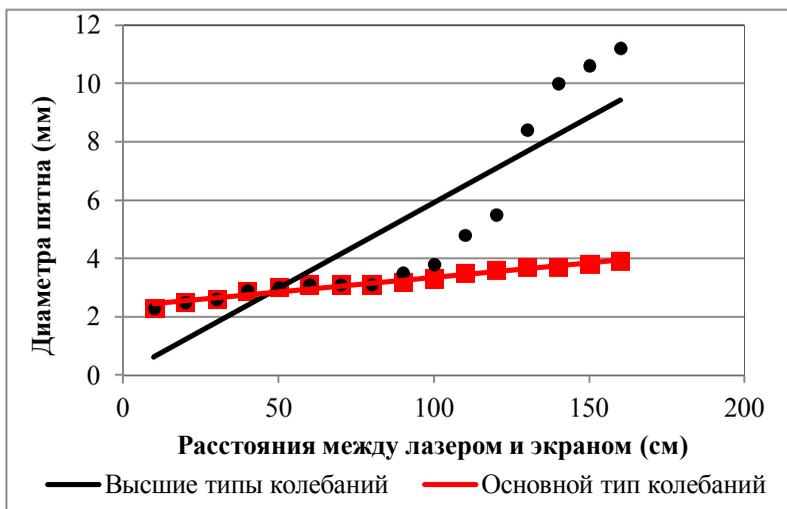


Рис. 2. Зависимость диаметра пятна от расстояния между лазером и экраном

**Заключение.** В результате проведенных исследований были найдены значения расходимости пучка полупроводникового лазера. Полученные значения расходимости пучка достаточны для фиксации малых отклонений маятника Цельнера.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Установка для калибровки/поверки и способ калибровки средств измерений угла расходимости лазерного пучка : пат. 2684435 : МПК G01J1/04 C 04/19.
2. Климков Ю.М., Хорошев М.В. Лазерная техника : учебное пособие. – М. : МИИГАиК, 2014. – 144 с.
3. Белов И.Ю. Физические основы оптической дальнометрии : учебно-методическое пособие. – Казань : КГУ, 2009. – 72 с.

## ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ДИФРАКЦИОННЫХ КАРТИН В ПРОЦЕССЕ СИНТЕЗА НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР Ge/Si И GeSi/Si НА УСТАНОВКЕ МОЛЕКУЛЯРНО- ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

**В.В. Дирко, А.С. Соколов**

*Научный руководитель: профессор, докт. физ.-мат. наук,  
А.П. Коханенко*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: vovenmir@gmail.com

**Аннотация.** В данной работе представлены особенности анализа дифракционных картин при эпитаксиальном росте германия и твердого раствора германий-кремний на поверхности Si(100), так как эта поверхность является основной при производстве нанoeлектроники.

**Ключевые слова:** кремний, германий, молекулярно-лучевая эпитаксия, дифракция быстрых электронов, наногетероструктуры, квантовые точки, твердые растворы.

**Введение.** Оптоэлектроника – одна из бурно развивающихся научно-технических направлений. Создание оптоэлектронных приборов на основе наногетероструктур позволяет значительно улучшить существующие технологии и получить новый класс совершенных приборов за счет проявляемых квантово-механических эффектов [1].

Одним из основных методов получения наногетероструктур для оптоэлектроники является метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). В свою очередь формирование эпитаксиальных слоев невозможно без определения основных факторов определяющих синтез формируемых наногетероструктур. Для эпитаксии германия или твердого раствора германий-кремний традиционно используются чистые поверхности кремния с кристаллографической ориентацией (100). Целью работы является разработка метода

контроля параметров синтеза наногетероструктур *in situ* с помощью анализа картин дифракции быстрых электронов (ДБЭ) [2–4].

**Методы и материалы.** Синтез Ge на подложку Si (100) проводился в высоковакуумной установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь – 100», при значении уровня вакуума  $1 \cdot 10^{-9}$  торр. Изменение картин дифракций регистрировалось цифровой камерой с Full-HD разрешением.

Перед экспериментом кремниевая пластина подвергалась предэпитаксиальной подготовке, в которую входит химическая отмывка, отжиг пластины при 1000 °С и напыление кремниевого буферного слоя порядка 200 нм. Ускоряющее напряжение электронов составляло 28 000 В.

**Результаты исследования.** На рисунке 1 показаны дифракционные картины на разных этапах роста и при различных параметрах синтеза.

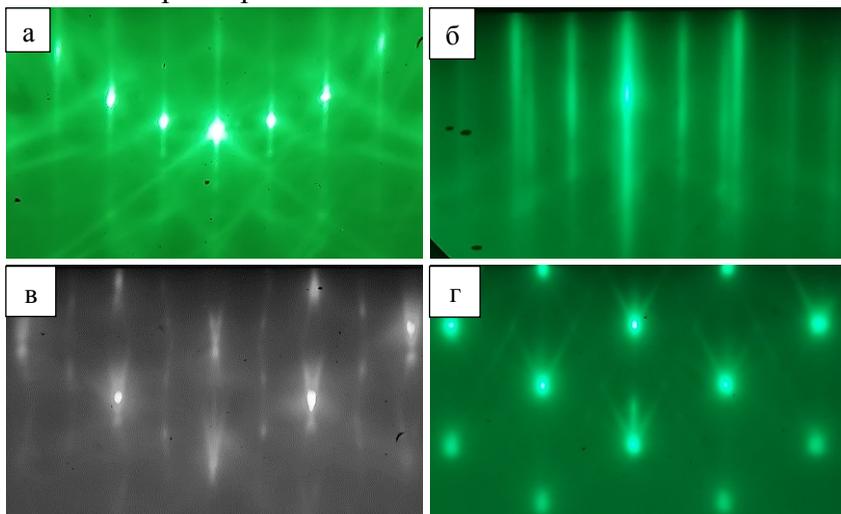


Рис. 1. Дифракционные картины, а – чистая поверхность Si(100), б – дифракционная картина с образованием структуры 1/N при росте Ge/Si(100), в – дифракционная картина сформированная квантовых точек Ge/Si(100), г – дифракционная картина сформированная от «dome» кластеров Ge/Si(100)

Метод дифракции быстрых электронов очень чувствителен к изменению поверхности пластины. Осаждение нескольких атомов на поверхность пластины сразу внесет изменения в дифракционную картину. Например, электроны, отражаясь от ровной поверхности Si (100) будут формировать яркую характерную дифракционную картину, но при осаждении нескольких атомов Si на эту поверхность, яркость дифракционной картины уменьшится за счет рассеивания электронов на осажденных атомах.

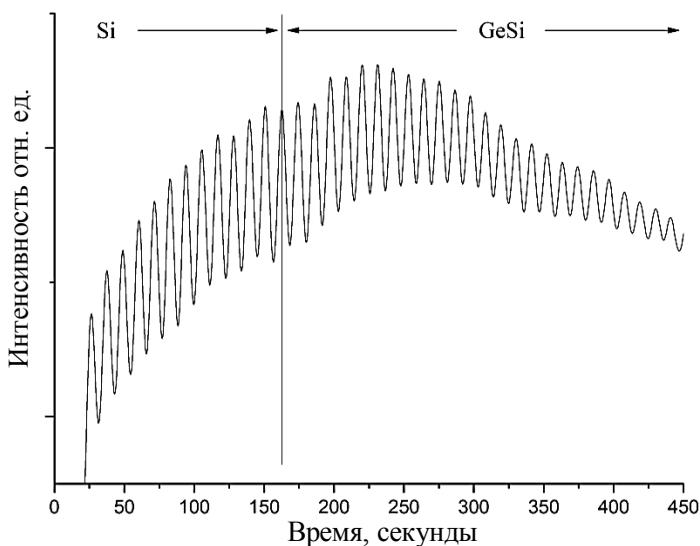


Рис. 5. Осцилляции интенсивности дифракционных картин при напылении GeSi на Si(100)

Благодаря тому, что в МЛЭ рост материала происходит ориентированно за счет термодинамических процессов, осаждаемые атомы Si будут стремиться вставать в узлы кристаллической решетки, что приведет к полному заполнению атомного слоя и рассеивание электронов будет минимальным, а дифракционная картина максимально яркой.

Таким образом, по яркости можно отследить рост каждого атомного слоя. Пользуясь данным приемом, возможно и оценивать процентное содержание твердых растворов в процессе эпитаксиального роста. На рисунке 5 приведен пример из эксперимента по напылению твердого раствора GeSi.

Для определения точного значения процентного содержания твердого раствора в самом начале на пластину напыляется кремний, после нескольких зафиксированных осцилляций открывается заслонка Ge и происходит напыление GeSi. После окончания синтеза, анализируются картины дифракции и по отношению скоростей GeSi и Si определяется процентное содержание Ge. Для более точного контроля роста эпитаксиальных слоев совместно с ДБЭ используется кварцевый измеритель толщины.

**Заключение.** Таким образом, в работе показано, что метод дифракции быстрых электронов позволяет анализировать изменения структуры поверхности в процессе напыления Ge и твердого раствора GeSi на Si(100), определять изменение постоянной решетки при росте Ge/Si(100) и других материалов, а также оценивать процентное содержание Ge и анализировать огранку hut-кластеров Ge/Si(100). Регистрация изменения картин дифракции на камеру с последующей обработкой видеофайла позволяет оценить морфологию поверхности и провести оптимизацию параметров синтеза для получения эпитаксиальных пленок для создания приборов нано- и оптоэлектроники.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90195.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wirths S., Buca D., Mantl S. Si–Ge–Sn alloys: From growth to applications // Prog. Cryst. Growth Characteriz. Mater. – 2016. – Vol. 62. – P. 1–39.

2. Nanostructures with Ge -Si quantum dots for infrared photodetectors / I.I. Izhnin, O.I. Fitsyha, A.V. Voitsekhovskii et al. // Opto – electronics review. – 2018. – Vol. 26. – P. 195–200.
3. New strategies for producing defect free SiGe strained nanolayers / T. David, J.N. Aqua, K. Liu et al. // Scientific reports. – 2018. – Vol. 8. – P. 1–8.
4. Quantum dot optoelectronic devices: lasers, photodetectors and solar cells / W. Jiang, C. Siming, S. Alwyn et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2015. – Vol. 48. – 363001. – P. 1–28.

# **АНАЛИЗ РОСТА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК КРЕМНИЯ НА СВЕРХСТРУКТУРАХ 1Х2 И 2Х1 МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ**

**О.И. Кукунов**

*Научный руководитель: профессор, докт. физ.-мат. наук,  
А.П. Коханенко*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: okukenov@mail.ru

**Аннотация.** Метод молекулярно-лучевой эпитаксии позволяет получать качественные, бездефектные полупроводниковые наноструктуры. Используемый в установке молекулярно-лучевой эпитаксии метод дифракции быстрых электронов даёт возможность исследовать поверхность получаемой наноструктуры непосредственно во время её синтеза. Анализ дифракционных картин позволяет определить временную морфологию поверхности. В работе представлены результаты синтеза эпитаксиальных плёнок кремния на Si(100) со сверхструктурой 1x2 и 2x1. Определены скорости роста кремния на сверхструктурах 1x2 и 2x1.

**Ключевые слова:** молекулярно-лучевая эпитаксия, дифракция быстрых электронов, дифракционные картины, наноструктуры, сверхструктуры, кремний.

**Введение.** Полупроводниковые наноструктуры играют ключевую роль в развитии современной нанoeлектроники. Устройства, основанные на таких структурах, обладают лучшими характеристиками по сравнению с их микроэлектронными предшественниками [1].

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) благодаря сверхвысокому вакууму, позволяет синтезировать чистые, бездефектные наноструктуры. Используя метод дифракции быстрых электронов (ДБЭ), при отражении потока высокоэнергетичных электронов от поверхности образ-

ца формируются дифракционные картины на флуоресцентном экране, по которым можно определять морфологию выращиваемой наноструктуры [2–3].

При получении структур нанoeлектроники ставятся высокие требования к контролю параметров эпитаксиального роста. Цель работы состоит в исследовании особенностей эпитаксиального роста кремния на подложке Si (100) со сверхструктурой 1x2 и 2x1. Это позволит использовать метод ДБЭ для контроля параметров синтеза по характерному изменению дифракционных картин.

**Методы исследования.** За счёт того, что метод ДБЭ используется непосредственно во время синтеза, он позволяет определять параметры роста, устанавливать время перехода от одной сверхструктуры к другой, время перехода от 2D к 3D росту наноструктур и т.д.

Изменения дифракционных картин регистрируются на видеокамеру для дальнейшей обработки информации. С помощью компьютерных программ строятся графики зависимости интенсивности от времени.

**Результаты.** Графики изменений интенсивности дифракционных картин изображён на рис. 1 для наноструктуры Si/Si(100) в различных направлениях.

На рис. 1а наблюдается бимодальный характер локальных максимумов интенсивности дифракционных картин. Величина максимума зависит от вида формирования сверхструктуры на поверхности. Меньший максимум соответствует росту сверхструктуры 2x1 (перпендикулярное направление к электронному пучку). Большой максимум формируется, когда наблюдается сверхструктура 1x2 (параллельное направление к электронному пучку). Такое явление вызвано последовательным ростом одного из типов димеров на террасе при росте Si/Si(100). Вначале формируется слой одного вида димеров, а потом другого.

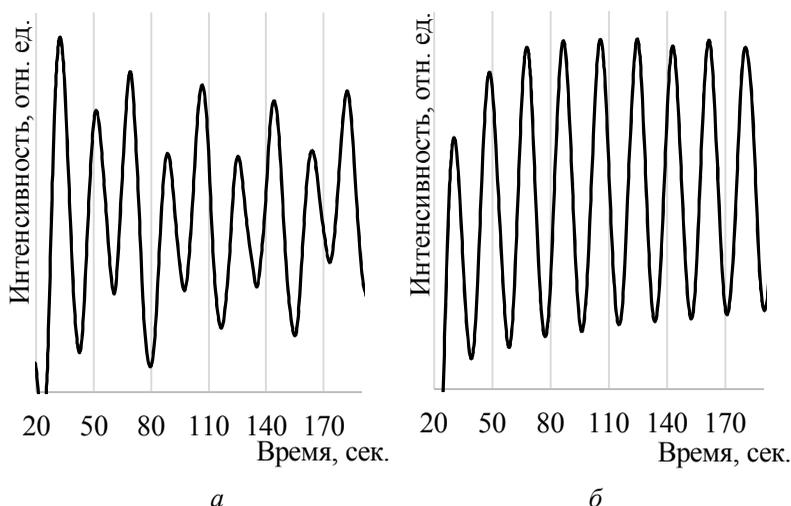


Рис. 1. Изменение интенсивности дифракционных картин во времени, вблизи центрального таяжа «00» при синтезе Si/Si(100) в направлении [110] (а) и в направлении [100] (б)

Перейдём к рассмотрению осцилляций интенсивности дифракционных картин при росте Si/Si(100) в направлении [100], которые изображены на рис. 1б.

Интенсивность локальных максимумов находится на одном уровне. В данном направлении дифракции невозможно разделить пики при росте конкретных димеров, поскольку они все повёрнуты под углом 45 градусов к электронному пучку и рассеивание электронов на сверхструктурах одинаково.

**Вывод.** В ходе анализа роста эпитаксиальных плёнок кремния на сверхструктурах 1x2 и 2x1 методом дифракции быстрых электронов были построены зависимости осцилляций интенсивности от времени для наноструктур в различных направлениях. Определён принципиально разный характер колебаний интенсивности в различных направлениях Si. Анализируя рост эпитаксиальных плёнок в направлении [110] можно не только рассчитать

скорость синтеза, но и увидеть чередующееся формирование димеров. В обоих экспериментах скорость роста составила 0,056 ML/сек.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Nanostructures with Ge -Si quantum dots for infrared photodetectors / I.I. Izhnin, O.I. Fitsyha, A.V. Voitsekhovskii et al. // Opto-electronics review. – 2018. – Vol. 26. – P. 195–200.
2. New strategies for producing defect free SiGe strained nanolayers / T. David, J.N. Aqua, K. Liu et al. // Scientific reports. – 2018. – Vol. 8. – P. 1–8.
3. Thickness-dependent elastic strain in Stranski–Krastanow growth / V.V. Dirko, K.A. Lozovoy, A.P. Kokhanenko et al. // Russian Physics Journal. – 2020. – Vol. 22. – P. 19318–19325.

## **ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ВДВТ АЛМАЗОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТАДИИ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

**А.С. Попова<sup>1</sup>, В.С. Рипенко<sup>1, 2</sup>**

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, Е.И. Липатов<sup>1, 2</sup>*

<sup>1</sup>Томский государственный университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

E-mail: popova\_31\_03@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты расчетов спектров поглощения алмазных образцов при комнатной температуре, синтезированных методом температурного градиента при высоких давлениях и высокой температуре (ВДВТ). Проведено сравнение спектров поглощения трех ВДВТ-алмазов и их визуальное отличие в зависимости от стадии радиационно-термической обработки.

**Ключевые слова:** алмаз, высокое давление, высокая температура, спектры поглощения, NV-центр.

**Введение.** Алмаз является одним из наиболее ценных кристаллических твердых веществ, встречающихся в природе как с научной, так и с технологической стороны. Алмаз обладает уникальным сочетанием превосходных механических, физических и химических свойств, например, таких как: сопротивление электрическому заряду, высокая теплопроводность, большой набор фотоактивных центров, не выцветающих под воздействием интенсивных лазеров. Из-за его необычных свойств и коммерческой ценности его синтетическое производство долгое время было целью многочисленных предприятий и исследователей по всему миру.

На сегодняшний день выделяют два метода получения синтетических алмазов – это метод газохимического осаждения

дения (ГХО) и метод высокого давления, высокой температуры (ВДВТ). В силу технологических особенностей ГХО-алмазы содержат много дефектов внутренней структуры, что сильно сужает их область применения. С другой стороны, технология ВДВТ синтеза позволяет получать как бесцветные алмазы (не содержащие каких-либо примесей), так и контролируемо получать алмазы с нужными центрами окраски [1].

Целью настоящей работы является исследование этапов создания примесных дефектов ВДВТ-алмаза, в зависимости от стадии его радиационно-термической обработки, на примере NV-центра.

**Методы и материалы.** В эксперименте использовались 3 алмазные пластины, соответствующие определенной стадии радиационно-термической обработки: С62 – ВДВТ-алмаз (без обработки); С44 – образец, облученный электронами; С97 – алмаз после облучения электронами и отжига. Для регистрации спектров пропускания алмазных образцов использовался спектрометр Ocean Optics HR2000 в диапазоне 190-1100 нм. В качестве источника света выступала галоген-дейтериевая лампа. Показатель поглощения определялся из формулы:

$$T(\lambda) = \frac{(1-r(\lambda))^2 \cdot e^{-\alpha(\lambda)d}}{1-r(\lambda)^2 \cdot e^{-2\alpha(\lambda)d}}, \quad (1)$$

где  $T(\lambda)$  – коэффициент пропускания,  $r(\lambda)$  – коэффициент отражения от одной грани брался из [1],  $\alpha(\lambda)$  – показатель поглощения.

Для получения изображений алмазных пластин использовался цифровой лабораторный микроскоп МБС-10.

**Результаты.** В ходе работы были рассчитаны показатели поглощения трех алмазных образцов по формуле (1).

На рис. 1 представлен спектр поглощения и изображение ВДВТ-алмаза с азотными вакансиями. Пластина имеет характерный желтоватый цвет.

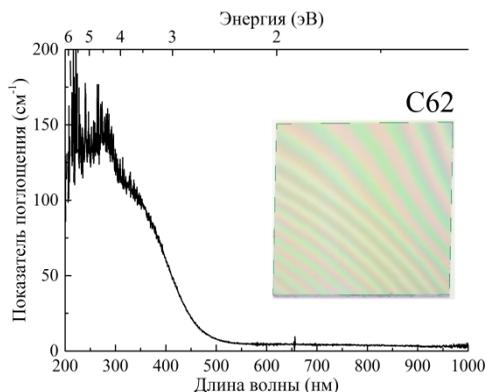


Рис. 1. Спектр поглощения ВДВТ-алмаза и его микроскопическое изображение

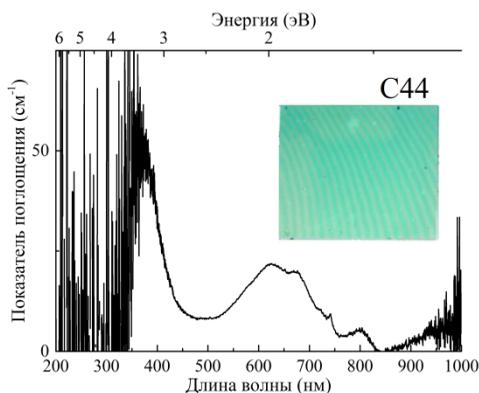


Рис. 2. Спектр поглощения ВДВТ-алмаза, облученного электронами и его микроскопическое изображение

При облучении подобного алмаза пучком электронов происходит образование так называемого вакансионного дефекта GR1 (нейтральная вакансия), о чем свидетельствует наличие безфононной линии на 741 нм в спектре поглощения [2, 3]. Как правило, алмазные пластины облучают электронами с энергией  $\sim 3$  МэВ и

плотностью  $10^{18}$ – $10^{19}$  см $^{-2}$ . Алмаз становится зеленого цвета (рис. 2).

Далее, если алмаз, представленный выше, отжечь, то возникнут существенные изменения в его спектре поглощения (рис. 3), а его цвет изменится на фиолетовый. Отжиг образцов проводят при температурах 800–1000 °С в инертной среде (в данном случае в атмосфере аргона) [4]. Такой метод обработки алмазной пластины позволит создать NV-центры в кристаллической решетке, что и наблюдается в рассчитанных спектрах поглощения – вакансии связываются с замещающими атомами азота и производят комплексы азот-вакансия в нейтральном зарядовом состоянии [5]. Наличие таких комплексов (NV $^-$ -центров) легко определяется по наличию безфононной линии на 637 нм в спектре поглощения такого алмаза, как видно на рис. 3.

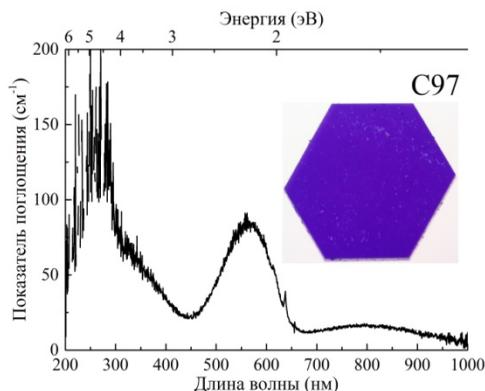


Рис. 3. Спектр поглощения ВДВТ-алмаза, облученного электронами и отожженного в атмосфере аргона и его микроскопическое изображение

**Заключение.** В результате проведенной работы исследованы этапы создания примесных дефектов, а также рассчитаны спектры поглощения ВДВТ-алмазов, в зависимости от их стадии радиационно-термической обработки. Показано не только изменение спектров поглощения исследуемых образцов, но и их визуальное отличие.

*Исследование было выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0048.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Физические свойства алмаза : справочник / под ред. Н.В. Новикова. – Киев : Наукова думка, 1987. – 190 с.
2. Dobrinets I.A., Vins V.G., Zaitsev A.M. HPHT-Treated Diamonds // Springer Series in Materials Science. – Berlin : Springer, 2013. – Vol. 181. – 270 p.
3. Photoluminescence decomposition analysis: a technique to characterize N-V creation in diamond / S.T. Alsid, J.F. Barry, L.M. Pham et al. // Physical review applied. – 2019. – Vol. 12. – 044003.
4. Трансформация дефекта GR1 в природном алмазе типа Па при его отжиге / А.Г. Алексеев, В.Н. Амосов, А.В. Красильников и др. // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26, № 12. – С. 1–7.
5. Diamond p-i-n diode with nitrogen containing intrinsic region for the study of nitrogen-vacancy center electroluminescence / M.A. Lobaev, D.B. Radishev, S.A. Bogdanov et al. // Physica Status Solidi. – 2020. – Vol. 14, No. 11. – P. 1–5.

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С ТРИФЕНИЛАМИНОВОЙ ЭЛЕКТРОН- ДОНОРНОЙ ГРУППОЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИНИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

**Е.В. Сапожникова**

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, К.М. Дегтяренко*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: esapozhnikova9@gmail.com

**Аннотация.** Целями данной работы являются поиск органических соединений, которые могут использоваться для создания синих органических светоизлучающих диодов, а также исследование люминесцентных свойств изучаемых соединений. В ходе работы были измерены спектры флуоресценции и поглощения растворов органических соединений в полярных и неполярных растворителях. OLED ячейки были созданы методом термовакuumного напыления и с применением технологии допирования. Характеристики созданных устройств показывают перспективность использования изученных органических соединений для практического применения.

**Ключевые слова:** органические светоизлучающие диоды, допирование, электролюминесценция

**Введение.** В настоящее время область создания органических светоизлучающих диодов (OLED) активно развивается [1]. На их основе создаются источники освещения и цифровые дисплеи. К достоинствам OLED можно отнести высокую яркость, возможность создания гибких экранов и др. Одной из проблем является создание синих светодиодов, так как известные органические соединения уступают по своим характеристикам соединениям красного и зеленого цветов [2]. Целью работы является поиск органических соединений, которые могут использоваться для создания синих органических светоизлучающих диодов.

**Методы и материалы.** В данной работе были изучены два соединения, представленные на рисунке. В качестве электрон-донорной группы у обоих соединений выступал трифениламин. В качестве электрон-акцепторной группы у соединения 1a выступал пиразин, у 1b – пиразин с циано-группой. На основе данных соединений были созданы растворы в полярных и неполярных растворителях. Растворы использовались для измерения спектров флуоресценции и поглощения органических соединений [2].

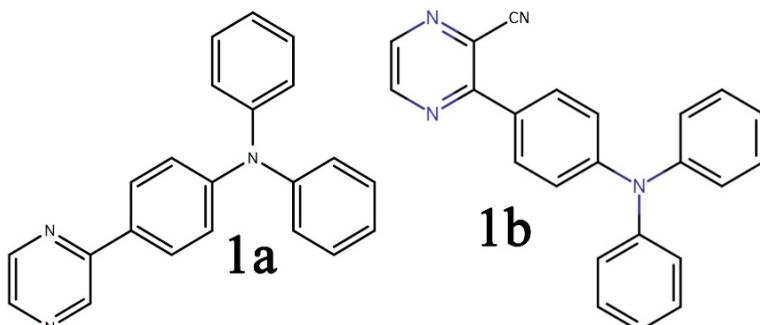


Рисунок. Органические соединения с трифениламиновою электрон-донорной группой

На основе соединений 1a и 1b были созданы OLED ячейки. Основой устройства являлась стеклянная подложка с тонким слоем ИТО в роли анода. Инжекционный слой PEDOT был нанесен на подложку методом центрифугирования. Дырочно-транспортный слой NPD, светоизлучающий слой, дырочно-блокирующий слой ВСР, слой диэлектрика LiF и катода Al были нанесены методом термовакuumного напыления. Также для соединений 1b были созданы две ячейки с использованием технологии допирования. Соединения СВР и NPD были допированы соединением 1b в соотношении 10:1.

Затем проводилось измерение спектров электролюминесценции, вольт-амперных и вольт-яркостных характеристик созданных светодиодов.

**Результаты.** Проведенные измерения спектров органических соединений в растворителях показали, что спектры поглощения растворов в полярных и неполярных растворителях лежали в синей области спектра для обоих соединений. Спектры флуоресценции находились в синей области спектра для неполярных растворителей и были сдвинуты в красную область спектра при использовании полярных растворителей.

Спектр электролюминесценции OLED ячейки на основе соединения 1a лежал в синей области спектра. Для соединения 1b наблюдался сдвиг спектра электролюминесценции в красную область, что может быть связано с образованием эксимеров. Для подтверждения этого были созданы OLED ячейки с допированным светоизлучающим слоем. В результате этого спектры электролюминесценции полученных ячеек оказались сдвинуты в синюю область.

Вольт-амперные и вольт-яркостные характеристики полученных OLED ячеек представлены в таблице.

Таблица. Вольт-амперные и вольт-яркостные характеристики созданных OLED, где  $\lambda_{EL}$  – длина волны электролюминесценции

Соединение	$\lambda_{EL}$ , нм	U, В	Яркость, Кд/м <sup>2</sup>	Эффективность, Кд/А
1a	445	12	47	0,05
		14	170	0,07
1b	529	9	1872	0,81
		10	3017	0,8
NPD допировано 1b	487	9	1528	0,18
		10	1651	0,16
CBP допировано 1b	460	9	975	0,2
		10	1108	0,16

Наибольшие значения яркости и эффективности были получены для светодиодов на основе соединения 1b, однако излучение светодиода происходило в зеленой области спектра. При допировании светоизлучающего слоя значения характеристик полученных устройств стали меньше, однако излучение происходило в синей области спектра. OLED на основе соединения 1a показал самые низкие значения яркости и эффективности, но излучение происходит на длине волны 445 нм.

**Заключение.** В данной работе были созданы органические светодиоды на основе соединений с трифениламино-вой электрон-донорной группой. Из полученных результатов можно увидеть, что добавление цианогруппы к пирозину приводит к улучшению характеристики созданных OLED, однако спектр излучения сдвигается в зеленую область. При использовании технологии допирования излучение происходит в синем диапазоне спектра. Органические соединения, использованные в данной работе, показывают перспективность их использования в качестве светоизлучающего слоя для создания синих органических светодиодов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарев М.Н., Витухновский А.Г., Каткова М.А. Органические светоизлучающие диоды. – Н. Новгород : ДЕКОМ, 2011. – 351 с.
2. Blue organic light-emitting diodes: current status, challenge, and future outlook / J. Lee, C. Chen, P. Lee et al. // J. Mater. Chem. C. – 2019. – No. 7. – P. 5874–5888.
3. Паркер С. Фотолюминесценция растворов. – М. : Мир, 1972. – 510 с.

## КВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ В АСПЕКТЕ ПОПУЛЯРИЗАЦИИ НАУКИ И РАЗВИТИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КВАЛИФИКАЦИИ

Л.И. Стефаненко<sup>1</sup>, А.Г. Сергеев<sup>2</sup>, Ю.В. Курочкин<sup>2,3,4</sup>,  
В.Е. Родимин<sup>2,3,4</sup>

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, В.Е. Родимин*

<sup>1</sup>Институт новых материалов и новых технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский квантовый центр, Сколково, Россия

<sup>3</sup>Центр квантовых коммуникаций НТИ, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

<sup>4</sup>ООО «КуРэйт», Сколково, Россия  
E-mail: lis@rqc.ru

**Аннотация:** ореол загадочности вокруг квантовой физики затрудняет продвижение квантовых технологий. Для демистификации нужны методические приемы, объясняющие основы квантовых технологий без метафор и абстрактной математики. Статья дает пример такого объяснения для протокола квантового распределения ключа BB84 на базе фазового кодирования. Это позволяет органично перейти к знакомству с реальной криптографической установкой QRate, используемой на конкурсе WorldSkills в компетенции «Квантовые технологии».

**Ключевые слова:** оптика, квантовая оптика, образование, популяризация науки, квантовая криптография, квантовая физика, квантовые технологии, WorldSkills, Future Skills, интерферометр Маха–Цендера, протокол BB84, протоколы шифрования.

**Введение.** С момента появления квантовой механики прошло уже около 100 лет. Мы каждый день пользуемся техническими устройствами, основанными на ее достижениях, такими как лазеры и полупроводниковые приборы. При этом уровень понимания даже самых основных идей квантовой механики вне физического сообщества остается

чрезвычайно низким. Он уступает даже уровню понимания основ теории относительности. Хотя у релятивистской физики почти нет повседневных применений (одно из немногих исключений — спутниковые навигационные системы), большинство образованных людей имеет какое-то представление о замедлении времени при больших скоростях и об искривлении пространства вблизи массивных объектов. В то же время образы, связанные с квантовой механикой, обычно не идут дальше пресловутого кота Шредингера, который «одновременно жив и мертв».

Недостаток понимания идей квантовой физики приводит к тому, что само слово «квантовый» начинает восприниматься как синоним чего-то загадочного, непостижимого, а то и сомнительного. Возникающие из-за этого ошибки порой приводят к неадекватному медийному отражению развития квантовых технологий, как это было с невежественной реакцией прессы в июне 2016 года на заявление российских представителей власти о перспективах квантовой телепортации, которую некоторые СМИ преподнесли как телепортацию из научной фантастики. Такие недоразумения могут мешать формированию необходимого доверия к квантовым технологиям со стороны бизнес-сообщества, политиков и публики.

Отчасти причиной подобного положения дел может быть недостаточное внимание самих физиков к разработке научно-популярного и педагогического дискурса, позволяющего корректно вводить идеи квантовой механики в контекст общей культуры. Десятилетиями физики бравировали своего рода эзотеричностью квантовой механики. Журналисты любят цитировать классиков квантовой физики: «Тот, кто не шокирован квантовой теорией, просто ее не понимает» (Нильс Бор); «Можно смело сказать, что квантовую механику не понимает никто» (Ричард Фейн-

ман); «Квантовая механика абсолютно лишена смысла» (Роджер Пенроуз) [1].

Действительно, для многих явлений квантового масштаба пока не найдено аналогов в обыденном мире, и их трудно выразить нашим повседневным языком. В результате введение в квантовую механику начинается с описания математического формализма, что становится препятствием для неподготовленного слушателя и не годится для популяризации. Более того, такой подход создает проблемы и для самих физиков: многие из них, изучая математический формализм квантовой механики и убеждаясь на практике в его эффективности, не задаются вопросом о том, как основатели этой науки смогли пройти в обратную сторону и, отталкиваясь от опыта, найти нужный формализм. В результате даже из поля зрения профессиональных физиков могут выпадать важные проблемные и эвристические моменты развития их науки.

С учетом сказанного важной задачей является поиск эффективных объяснительных приемов, позволяющих рассказывать о квантовых явлениях без обращения к математическому аппарату и без злоупотребления сомнительными метафорами. В настоящей статье делается попытка найти такой подход к объяснению квантовой криптографии. Выбор в ее пользу определяется тем, что это одна из самых зрелых квантовых технологий второго поколения, которая уже начинает порождать спрос на технических специалистов для наладки и обслуживания линий защищенной квантовой связи. Для этой деятельности необходимо общее понимание идей квантовой механики, лежащих в основе технологии, но в то же время не требуется полное владение математическим аппаратом, который используется в исследованиях и разработках. В соответствии с этим была поставлена задача изложить принцип квантовой криптографии без обращения к таким абстрактным

концепциям, как пространство состояний квантовой системы, его базисы и выбор между ними при квантовом измерении.

В научно-популярном смысле преимущество квантовой криптографии в том, что она достаточно проста для понимания. Наш опыт показывает, что ее основные положения можно объяснить студентам примерно за полчаса без экстраординарных умственных усилий. Также она загадочна и увлекательна, поскольку, с одной стороны ассоциируется со шпионскими шифрами, а с другой — обеспечивает защиту, основанную на законах природы. В методическом плане ценен позитивный аспект квантовой криптографии. Многие фундаментальные положения квантовой физики носят негативный характер: невозможность провести любое измерение без воздействия на систему, принцип неопределенности Гейзенберга, теорема о запрете клонирования. При этом квантовая криптография напротив *разрешает* абсолютно безопасное распределение ключа шифрования.

Мы предлагаем способ научно-популярного объяснения ряда идей квантовой физики на примере реализации протокола BB84 с использованием фазового кодирования передаваемой информации. На базе этого объяснения можно органично переходить к знакомству с реальной установкой квантового шифрования, созданной Российским квантовым центром и компанией QRate [2]. В свою очередь эта установка стала базой для формирования и развития новой компетенции «Квантовые технологии» в рамках всемирной системы профессиональных конкурсов WorldSkills.

**Материалы и методы исследования.** Интерферометр Маха–Цендера (ИМЦ) состоит из двух светоделителей — полупрозрачных зеркал — и двух обычных зеркал (см. рис. 1) Входящий луч делится пополам, разводится по разным плечам, затем лучи сводятся вновь на втором светоделе-

ле-зеркале и расходятся на детекторы. Если пути, которые проходят два луча, одинаковые, то такой интерферометр называется равноплечим.

На первый взгляд, лучи на выходе равноплечего ИМЦ должны иметь одинаковую интенсивность, равную половине интенсивности исходного луча. Так и происходит, если запускать в ИМЦ обычный некогерентный (например, естественный) свет и измерять освещенность на двух выходах. Однако при использовании когерентного лазерного излучения результат оказывается существенно иным. Это связано с волновой природой света и особенностями работы светоделителей, а именно с тем, что отраженная и преломленная световые волны по-разному сдвигаются по фазе. Не умаляя общности, можно считать, что между отраженной волной и той, которая прошла светоделитель насквозь, возникает фазовый сдвиг на четверть длины волны ( $\lambda/4$ ) или, в терминах фазы, на  $\pi/2$  [3].

Луч, который выходит из ИМЦ на  $D1$ , формируется двумя составляющими, испытанными по одному отражению на светоделителях. В равноплечем интерферометре они имеют одну и ту же фазу и демонстрируют конструктивную интерференцию. Луч же, выходящий из ИМЦ на  $D2$ , складывается из двух составляющих, испытанных, соответственно, ноль и два отражения на светоделителях. Это дает разность хода  $\lambda/2$  и фазовый сдвиг  $\pi$ , то есть, составляющие находятся в противофазе и испытывают деструктивную интерференцию. В результате для когерентного входящего луча равноплечий ИМЦ формирует только один исходящий луч на  $D1$ , равный по интенсивности исходному (потерями пренебрегаем). На другом выходе  $D2$  световые колебания полностью гасятся.

Если теперь в одно из плеч интерферометра добавить фазовый модулятор ( $PM$ ), вызывающий сдвиг фазы электромагнитной волны на полпериода ( $\pi$ ), то ситуация изме-

нится на противоположную. Теперь на  $D1$  интерференция будет деструктивной, а на  $D2$  — конструктивной.

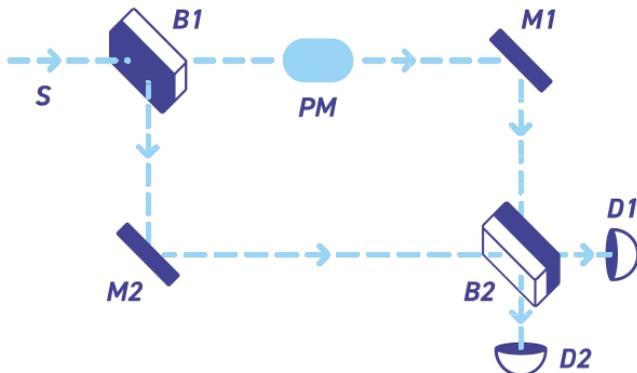


Рис. 1. Схема интерферометра Маха-Цендера.  $S$  — источник света,  $PM$  — фазовый модулятор,  $B1, B2$  — полупрозрачные зеркала,  $M1, M2$  — обыкновенные зеркала,  $D1, D2$  — детекторы одиночных фотонов

Включая и выключая такой фазовый модулятор, можно переключать выход луча с  $D1$  на  $D2$ . Если с помощью фазового модулятора сделать сдвиг  $\pi/2$  или  $3\pi/2$ , то свет будет попадать на оба детектора  $D1$  и  $D2$ , на каждый детектор интенсивность приходящего света будет равна половине интенсивности входящего.

**Однофотонный режим.** Теперь от классического рассмотрения работы ИМЦ перейдем к квантовому приближению. Будем ослаблять интенсивность входящего света до тех пор, пока мы не выйдем на уровень дискретизации света — на квантовый уровень. Для этого детекторы  $D1$  и  $D2$  должны быть достаточно чувствительными, чтобы регистрировать одиночные фотоны. Слабый свет от лазера будет регистрироваться детекторами в виде одиночных срабатываний. Эти срабатывания по времени будут носить случайный, хаотический характер. При этом в среднем ко-

личество срабатываний в единицу времени будет соответствовать интенсивности света.

Как было показано выше, в случае классического, волнового рассмотрения света, в равноплечем интерферометре на  $D1$  происходит конструктивная интерференция. Согласно принципу соответствия [4], переходя на квантовый уровень по мере ослабления света, переход должен происходить естественно и плавно в плане наблюдаемых явлений. Поэтому и на однофотонном уровне конструктивная интерференция будет на  $D1$ , т.е. все фотоны будут приходить на первый детектор.

Концептуальная проблема понимания происходящего возникает, если вдуматься, как получается, что одиночный фотон приходит на первый детектор. Ведь именно так следует из эксперимента. Более того, вместо лазера можно использовать источник одиночных фотонов, который используется в лабораториях, и контролируемо посылать в ИМЦ только один фотон, всякий раз убеждаясь, что сработал  $D1$ . Отдельный фотон не может разделиться на два. Иначе разделилась бы его энергия, и частота излучения снизилась вдвое. Но нельзя и предположить, что каждый отдельный фотон случайным образом проходит через ИМЦ по какому-то одному пути — верхнему или нижнему. Тогда фотонам было бы не с чем интерферировать на выходе, и они бы с равной вероятностью регистрировались обоими детекторами, а это противоречит эксперименту.

Любая попытка зафиксировать прохождение фотона по одному из путей приводит к тому, что он попадает на второй светоделитель с известного направления и далее случайным образом перенаправляется в один из детекторов. Причем такой результат имеет место даже тогда, когда предпринятая попытка зарегистрировать фотон в одном из плеч интерферометра оказалась неудачной, поскольку в этом случае известно, что фотон прошел по другому плечу.

Таким образом, одиночный неотслеживаемый фотон и не разделяется, и не выбирает один из двух путей через ИМЦ, а каким-то образом проходит через интерферометр сразу по двум путям, оставаясь при этом единой частицей. О таком фотоне говорят, что он находится в состоянии квантовой суперпозиции фотона, идущего по верхнему пути, и фотона, идущего по нижнему пути. Квантовая суперпозиция — это математическая абстракция, лежащая в основе квантовой физики. Достоверно неизвестно, какие свойства материального мира приводят к квантовой суперпозиции.

Каждая составляющая этой суперпозиции математически описывается аналогично максвелловской волне и имеет ту же частоту. И хотя в данном случае нельзя говорить о колебаниях вектора электрического поля, тем не менее, такие волны также испытывают влияние фазовых модуляторов и интерферируют друг с другом. Когда составляющие суперпозиции после второго светоделителя ( $B_2$ ) складываются, они гасят или усиливают друг друга на детекторах соответственно разности своих фаз.

В равноплечем ИМЦ разность фаз по двум путям равна нулю. Поэтому при интерференции составляющих суперпозиции одиночного фотона получается тот же результат, что и в случае классической электромагнитной волны: конструктивная интерференция на детекторе  $D_1$ , который щелкает на каждый фотон, и деструктивная интерференция на  $D_2$ , который, соответственно, молчит.

Добавление в плечи ИМЦ оптических элементов, меняющих фазу волны, влияет на интерференцию фотона с самим собой на выходе. В частности, при относительном сдвиге фаз на  $\pi$ , реакция детекторов меняется на противоположную —  $D_2$  щелкает, а  $D_1$  молчит.

**Результаты и обсуждения.** Рассмотрим задачу конфиденциальной передачи информации из пункта А в пункт Б.

С 70-х годов прошлого столетия такой приемник и передатчик принято именовать Алисой и Бобом, соответственно. Пусть плечи ИМЦ будут длинными, так что с одной стороны будет находиться Алиса, а с другой стороны — Боб. Эти персонажи могут использовать ИМЦ для передачи двоичной информации на однофотонном уровне. Алиса включает фазовый модулятор, когда передает «1», и выключает его для передачи «0». А у Боба меняются условия интерференции и срабатывает, соответственно, детектор  $D1$  или  $D2$ . Несмотря на однофотонный режим, такой информационный канал не защищен от прослушивания. Злоумышленник, традиционно именуемый Евой, может проникнуть в такой разнесенный интерферометр, провести измерение вместо Боба, и отправить Бобу результат измерения в виде фотона в суперпозиции прохождения по двум плечам, не отличимый от того, как это делает Алиса. Иначе говоря, вместо одного ИМЦ, соединяющего Алису и Боба, будет работать два ИМЦ, соединяющих Алису и Еву, а затем — Еву и Боба.

Чтобы получить секретный канал передачи информации, процедуру приготовления и измерения фотона надо усложнить. Это сделано в протоколе BB84, разработанном еще в 1984 году [5]. Пусть, как и выше,  $D1$  отвечает за бит «0»,  $D2$  – за бит «1». Пусть теперь Алиса будет прикладывать фазовые сдвиги  $\pi/2$  и  $3\pi/2$ . Если при этом Боб на своем модуляторе приложит сдвиг  $\pi/2$ , то они опять смогут передавать информацию на однофотонном уровне. Когда Алиса шифрует бит, прикладывая 0 или  $\pi$ , а Боб проводит измерение, не делая фазового сдвига, то говорят, что Алиса готовит фотон в базисе I, а Боб измеряет фотон в базисе I. Когда Алиса шифрует бит, прикладывая  $\pi/2$  или  $3\pi/2$ , а Боб проводит измерение, прикладывая фазовый сдвиг  $\pi/2$ , то говорят, что Алиса готовит фотон в базисе II, а Боб измеряет фотон в базисе II. Если Алиса и Боб работают в

одинаковом базисе, то они могут передавать информацию; если они работают в разных базисах, то у Боба будет срабатывать случайный детектор. В итоге они затевают такую игру:

- Алиса случайным образом выбирает базис приготовления фотона, значение бита, готовит фотон и пересылает Бобу
- Боб выбирает случайный базис измерения фотона, проводит измерение и записывает получившееся значение бита
- В половине случаев он случайно угадал базис приготовления фотона, тогда у него получился тот бит, который ему послала Алиса. В другой половине случаев результат Боба получился случайным
- По открытому каналу Алиса и Боб сообщают друг другу, какие базисы приготовления и измерения они использовали. Но держат в секрете приготовленные и измеренные значения бит!
- Алиса и Боб выбрасывают те значения, которые соответствуют разным базисам. В идеальном случае оставшиеся битовые последовательности Алисы и Боба будут одинаковые.

Это самый первый и самый распространенный протокол квантовой криптографии — квантового распределения ключа. Можно сказать, что квантовое распределение ключа — это такой способ генерации случайной битовой последовательности (ключа) в двух удаленных друг от друга местах. В обоих местах ключ получается одинаковым, и при этом секретным.

Если Ева захочет вмешаться, она немного сможет сделать. Ей придется случайным образом решать, какой базис измерения выбирать.

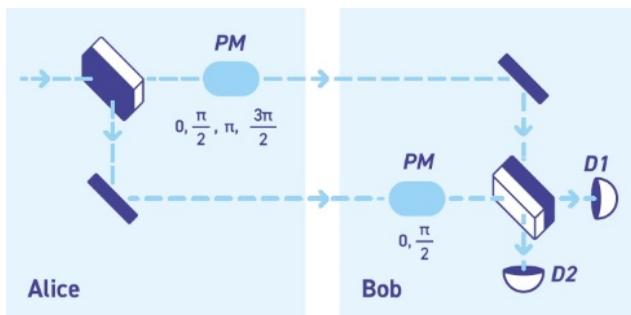


Рис. 2. Схема разнесенного интерферометра Маха–Цендера. PM — фазовый модулятор, D1, D2 — детекторы одиночных фотонов

В результате она начнет генерировать ошибки в ключах, рандомизированными окажутся три четверти переданных битов, Алиса и Боб при сверке не смогут отсеять «испорченные» биты и в итоге получают разные ключи. Достаточно сверить их фрагменты или контрольные суммы, чтобы обнаружить постороннее вмешательство и прекратить передачу данных до его устранения.

Осмысленной информации ключ не несет, т.к. это случайная битовая последовательность. Но Алиса и Боб могут использовать свои ключи для шифрования и дешифровки сообщений. Квантовая криптография дает возможность осуществлять безусловно секретную передачу данных, секретность такого шифрования доказывается строго математически.

**Заключение.** Сегодня большая часть интернет-трафика передается по оптическим линиям связи. Поэтому у крупных компаний в штате или на аутсорсе есть специалисты, умеющие настраивать такие линии. Ожидаемый рост спроса на линии связи, защищенные квантовым шифрованием, создаст потребность в специалистах, умеющих работать с этой квантовой технологией. Это означает, что формировать соответствующую компетенцию и обрабатывать под-

готовку и проверку квалификации будущих специалистов необходимо уже сейчас.

С пониманием этой перспективы РКЦ и QRate присоединились к международному проекту WorldSkills, целью которого является повышение статуса различных профессий и развитие стандартов профессиональной подготовки и квалификации. Достигается это через организацию конкурсов профессионального мастерства на региональном и международном уровне.

В 2017 году в рамках проекта Future Skills WorldSkills Russia была учреждена новая компетенция «Квантовые технологии». На сегодня значительная часть навыков, по которым проводится соревнование в этой компетенции, относится к налаживанию квантово-защищенного канала связи на базе академической установки квантового распределения ключа QRate.

В ходе соревнований участники должны выполнить полный спектр задач по запуску стабильного распределения квантового ключа с помощью одиночных фотонов: создать оптоволоконный канал, собрать оптические схемы Алисы и Боба, которые будут обслуживать квантовый канал, провести калибровку квантово-оптической линии и запустить процесс распределения квантового ключа, а также презентовать результаты настройки системы.

Дополнительно выполняются задания по исследованию характеристик однофотонных детекторов, которые используются в системе, а также по реализации алгоритма, выполняемого на свободно доступном для публичных экспериментов квантовом процессоре IBM. Последнее задание включено в программу соревнований с тем, чтобы квалификация «Квантовые технологии» не сводилась к одной только квантовой коммуникации, а также с целью популяризации идеи квантовых вычислений и квантовых компьютеров.

С 2017 по 2021 год было проведено 24 чемпионата, включая соревнования на Чемпионате мира в Казани в 2019 году, выступления на национальном финале и представление компетенции на международном уровне в Китае. Компетенция включена во все линейки чемпионатов: региональные, вузовские, корпоративные, национальные, международные.

Кроме того, специалистами компетенции был создан комплект оценочной документации для проведения Демонстрационного экзамена, проведена сертификация экспертов, разработаны методические рекомендации и комплект конкурсной документации.

Прделанная работа по развитию Компетенции позволила сформировать специальность 11.02.13 Твердотельная электроника (Лот № 3 Информационные и коммуникационные технологии) в перечне профессий и специальностей среднего профессионального образования.

*Авторы благодарят Татьяну Вадимовну Казиеву за консультации по работе установки QRate, ценные советы в планировании исследования и погружение в фундаментальные основы квантовой физики. А также Павла Георгиевича Селезнева за помощь в редакторской работе над статьей и поддержку в течение времени подготовки статьи.*

*Исследования проведены в рамках реализации Гранта РФФИ 17-71-20146.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мюллер Р.А. Сейчас. Физика времени. – М. : Манн, Иванов и Фербер, 2017. – С. 213.
2. Modular Platform for Photonic Optical Experiments and Quantum Cryptography / V. Rodimin, M. Ponomarev, T. Kazieva et al. // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2019. – P. 1–3.

3. DeWeerd A.J. Interaction-free measurement = Измерения без взаимодействий / перевод М.Х. Шульмана [Электронный ресурс] // American Journal of Physics. – 2002. – Vol. 70, No. 3. – P. 272–275. – (URL: [http://www.timeorigin21.narod.ru/rus\\_translation/Interaction\\_free\\_meas.pdf](http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Interaction_free_meas.pdf)).
4. Bogdanov Yu.I. Correspondence principle and evolution of physics [Электронный ресурс]. – 2005. – URL: <https://arxiv.org/abs/physics/0510153> (дата обращения: 16.04.2021).
5. Bennett C.H., Brassard G. Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing // Proceedings of International Conference on Computers, Systems & Signal Processing, Dec. 9–12, 1984, Bangalore, India. – IEEE, 1984. – P. 175.
6. Wootters W.K., Zurek W.H. A single quantum cannot be cloned // Nature. – 1982. – Vol. 299, Is. 5886. – P. 802–803.
7. Клод Шеннон. Теория связи в секретных системах / перевод В.Ф. Писаренко. – М. : ИЛ, 1963. – С. 333–369. – (URL: [https://www.enlight.ru/crypto/articles/shannon/shann\\_i.htm](https://www.enlight.ru/crypto/articles/shannon/shann_i.htm) ; Shannon C. Communication Theory of Secrecy Systems // Bell System Technical Journal. – 1949. – Vol. 28, No. 4 – P. 656–715)).
8. Quantum-Safe Security White Paper. Understanding Quantum Cryptography. ID Quantique [Электронный ресурс]. – Geneva, May, 2020. – URL: [https://www.quantumcommshub.net/wp-content/uploads/2020/09/Understanding-Quantum-Cryptography\\_White-Paper.pdf](https://www.quantumcommshub.net/wp-content/uploads/2020/09/Understanding-Quantum-Cryptography_White-Paper.pdf).
9. Квантовая криптография. Методическое пособие для World Skills [Электронный ресурс]. – URL: [https://rqc1.cdn.prismic.io/rqc1/e50ca859-07bd-442d-a2b1-5467ae168b47\\_Методическое+пособие+для+World+Skills.pdf](https://rqc1.cdn.prismic.io/rqc1/e50ca859-07bd-442d-a2b1-5467ae168b47_Методическое+пособие+для+World+Skills.pdf) (дата обращения: 16.04.2021).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ НА РАССЕЯННОМ ИЗЛУЧЕНИИ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ

**В.Я. Тен<sup>1</sup>**

*Научный руководитель: Е.С. Познахарев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия  
E-mail: vladimirten30@gmail.com

**Аннотация.** В работе представлены результаты полевых исследований каналов оптической связи на рассеянном излучении в атмосферной и водной средах. Установлено, что в дневное время суток в атмосферной среде на длине волны  $\lambda=510$  нм возможна стабильная связь на базовом расстоянии 3 км. В водной среде на той же длине волны возможна стабильная связь на базовом расстоянии до 40 м.

**Ключевые слова:** видимый диапазон, атмосферный канал, водный канал, оптическая связь на рассеянном излучении.

**Введение.** В настоящее время в связи с увеличением объёмов данных, хранящихся на электронных носителях, возникает потребность в быстрой и качественной передаче информации при этом могут быть выдвинуты дополнительные требования к безопасности передачи этих данных. Современные системы связи, не всегда могут удовлетворить всем требованиям, которые предъявляются к ним.

Одним из способов решения этой проблемы является создание систем беспроводной оптической связи.

Несмотря на то, что системы беспроводной оптической связи в прямой видимости обладают высокой скоростью передачи данных, удовлетворить всем требованиям, выдвигаемым к системам связи они не могут. Беспроводная оптическая связь на рассеянном излучении позволяет пе-

редавать информацию независимо от наличия на линии связи препятствий и меньше подвержена влиянию турбулентности. Кроме того, оптическая связь на рассеянном излучении является многоадресной. В этом направлении работают как отечественные, так и зарубежные учёные.

Для атмосферной среды решаются следующие задачи: определение оптимальной геометрии связи [1,2], оценка влияния погодных условий на качество передачи данных [1-4].

В водной среде решаются следующие задачи: исследование влияния затухания оптических сигналов в водной среде [5], оценка потерь на линии связи для различного типа воды [6].

Целью экспериментальных исследований является оценка предельных дальностей оптической связи на рассеянном излучении на длине волны  $\lambda=510$  нм в атмосферной и водной средах.

**Аппаратура и схема экспериментов.** Экспериментальные исследования каналов оптической связи на рассеянном излучении проводились в атмосферной среде по геометрической схеме на (рис. 1) и в водной среде по схеме представленной на (рис. 1б). Полевые исследования были разделены на 2 части. В 1-ой части определялись оптимальные геометрические условия для атмосферного канала связи в дневное время суток. Во 2-ой части для водного канала связи в ночное время суток.

Исследования проводились в следующей постановке. Из лазерного источника  $S$  на длине волны  $\lambda=510$  нм под зенитным углом  $\theta_s$  и азимутальным углом  $\alpha_s$  в атмосферный или водный канал отправлялся сигнал с время-импульсной модуляцией. На базовом расстоянии  $Y_N$  в точке  $D$  приёмной системой регистрировался рассеянный лазерный импульс под зенитным углом  $\theta_d$  и азимутальным углом  $\alpha_d$ . Приемная система включала в себя телескоп, узкополос-

ный фильтр, фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) и демодулятор. После демодуляции принятый сигнал обрабатывается на персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ) и по значениям вероятности ошибок и ее среднее квадратическое отклонение (СКО) определяется качество связи.

**Результаты.** Из экспериментальных данных была получена оценка вероятностей ошибок и СКО связи в реальном масштабе времени в атмосферной среде (рис. 2) в видимом диапазоне на базовом расстоянии 3 км в дневное время, при метеорологических условиях – облачно, снегопад. Средняя мощность источника составляла – 9 Вт, а углы места источника и приемника –  $8^\circ$ .

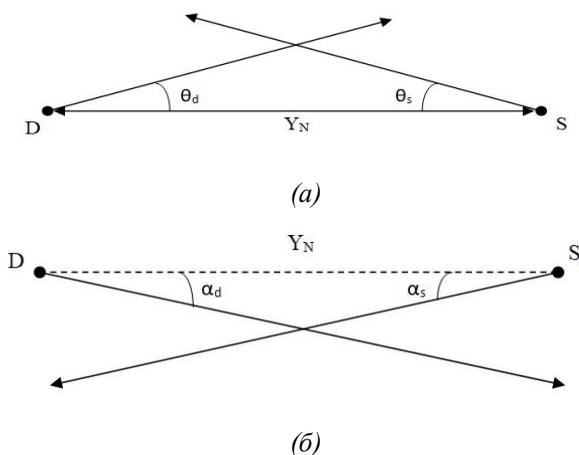


Рис. 1. Геометрическая схема канала оптической связи на рассеянном излучении в атмосферной и водной средах.

(а) – вид сбоку; (б) – вид сверху

$S$  – источник;  $D$  – приёмник;  $\theta_d$  – угол места приёмника;  $\theta_s$  – угол места источника;  $Y_N$  – базовое расстояние;  $\alpha_s$  – азимутальный угол источника;  $\alpha_d$  – азимутальный угол приёмника

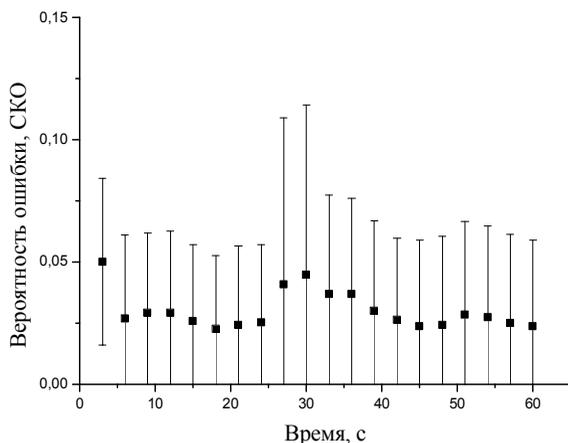


Рис. 2. Оценка вероятностей ошибок и СКО связи в реальном масштабе времени в атмосферной среде, при  $Y_N = 3$  км

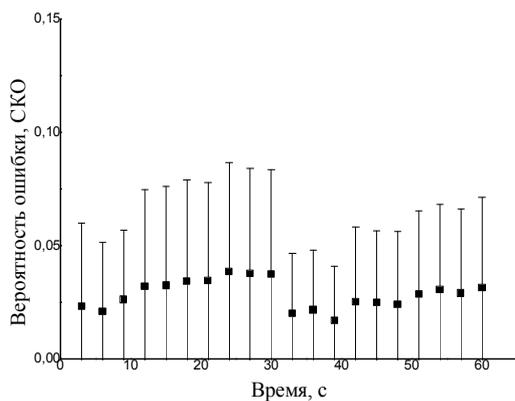


Рис. 3. Оценка вероятностей ошибок и СКО связи в реальном масштабе времени в водной среде, при  $Y_N = 40$  м

В качестве приемо-передающей системы использовался лазерный источник с генерацией излучения на длине волны 510 нм и частотой следования импульсов 11 кГц; ФЭУ

УФК 4Г-2 со спектральным диапазоном фотокатода 200-750 нм, полосовой фильтр setgоск, линзовый рефрактор.

Рассмотрим результаты оценки вероятностей ошибок и СКО связи в реальном масштабе времени в водной среде в ночное время на озере Боярское (рис. 3).

Эксперимент проводился на базовом расстоянии 40 м, в передающей части использовался мобильный лазерный источник с генерацией излучения на длине волны 510 нм и частотой следования импульсов 14 кГц, а в приемной части ФЭУ УФК 4Г-2 со спектральной чувствительностью фотокатода 200 – 750 нм, полосовой фильтр setgоск. Средняя мощность источника  $P=4,5-5,5$  Вт; базовое расстояние  $Y_N=40$  м; приёмная система ориентирована в точку расположения источника.

**Заключение.** В результате проведенных исследований установлено, что в атмосферной среде в дневное время суток на базовом расстоянии 3 км возможна стабильная связь в видимом диапазоне с вероятностью ошибки не более 0,05. В водной среде на базовом расстоянии до 40 м возможна стабильная связь с вероятностью ошибки не более 0,04.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Атмосферные бистатистические каналы связи с рассеянием. Часть 1. Методы исследований / В.В. Белов, М.В. Тарасенков, В.Н. Абрамочкин и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26, № 4. – С. 261–267.
2. Атмосферные бистатистические каналы связи с рассеянием. Часть 2. Полевые эксперименты / В.В. Белов, М.В. Тарасенков, В.Н. Абрамочкин и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 8. – С. 659–664.
3. Борисов Б.Д., Белов В.В. Влияние погодных условий на параметры короткого лазерного импульса, отраженного атмосферой // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24, № 4. – С. 263–267.
4. Бритвин А.В., Поллер Б.В., Щетинин Ю.И. Использование ультрафиолетового канала связи с рассеянием в беспроводных информа-

- ционных системах и микросистемах // ГЕО-Сибирь. – 2007. – Т. 4, № 1. – С. 174–179.
5. Оптико-электронные бистатистические коммуникационные системы. Полевые эксперименты на искусственном и естественном водоемах / В.В. Белов, М.В. Тарасенков, В.Н. Абрамочкин и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30, № 1. – С. 82–86.
  6. Channel Modeling for Underwater Optical Communication / C. Gabriel, M.A. Khaligh, S. Bourennane et al. // IEEE GLOBECOM Workshops. – 2011. – Vol. 9781. – 4673004. – P. 833–837.

## ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРА ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ ДЛЯ КВАНТОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ

**К.И. Хомякова**

*Научный руководитель: профессор, докт. физ.-мат. наук,  
А.П. Коханенко*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: homiackowa.kristina@yandex.ru

**Аннотация.** В настоящее время лучшими однофотонными детекторами, работающими на длине волны 1,55 мкм, являются лавинные фотодиоды на основе InGaAs/InP. В данной работе исследуются характеристики таких детекторов, работающих в режиме Гейгера. Проведены измерения зависимости квантовой эффективности и уровней шума от температуры и напряжения смещения лавинных фотодиодов.

**Ключевые слова:** детектор одиночных фотонов, лавинный фотодиод, регистрация слабого излучения, фотоника, оптоволоконные линии связи, квантовая эффективность, темновой счет, напряжение смещения

**Введение.** Детекторы одиночных фотонов (ДОФ) нашли применение в различных областях науки и техники. Регистрация слабого излучения в спектроскопии, космических исследованиях, атомной и молекулярной физике, мониторинг при производстве интегральных схем и окружающей среды, входят в состав биомедицинского оборудования: потоковые цитометры, ДНК-ридеры, оптические томографы и т.д. В последние годы они широко применяются в области квантовых телекоммуникаций и при построении оптических квантовых процессоров.

На сегодняшний день наилучшими однофотонными детекторами в ближнем инфракрасном диапазоне для практического использования в области квантовых телекоммуникаций являются лавинные фотодиоды (ЛФД) на основе InGaAs/InP. Преимущество таких ЛФД в том, что они спо-

собны зарегистрировать слабые оптические сигналы за счет внутреннего усиления благодаря процессу ударной ионизации [1].

В работе представлены экспериментальные результаты измерений характеристик детекторов одиночных фотонов, работающих в режиме Гейгера, при различных температурах и приложенных напряжений на стенде Российского квантового центра.

**Методы и материалы.** В работе измерения проводились ДОФ, изготовленных на основе лавинных фотодиодов со структурой InGaAs/InP, для двух режимов работы: ждущего и стробированного. Для измерения характеристик на ДОФ подавались импульсы полупроводниковым лазером с длиной волны 1550 нм, с частотой следования 100 кГц, ослабленные на величину 0,1 фотон/имп с помощью переменного и постоянного аттенуаторов. С помощью специального программного обеспечения производилось изменение температуры (от  $-40$  до  $-60$  °С) и напряжения смещения ЛФД. Измерение характеристик ДОФ: квантовая эффективность, темновой шум (темновой счет), проводилось с помощью осциллографа и частотомера.

Квантовая эффективность рассчитывалась по формуле:

$$\eta = \frac{f_{\text{sin}} - f_D}{\nu \cdot \mu},$$

где  $\nu$  – частота следования лазерных импульсов,  $\mu$  – среднее число фотонов на импульс,  $f_{\text{sin}}$  – частота импульсов на выходе детектора при подаче лазерных импульсов с различным средним числом фотонов,  $f_D$  – частота темновых счетов с выключенным лазером.

Темновые шумы берут своё начало из механизмов теплового или туннельного возбуждения. При достаточно высоких температурах использования ЛФД тепловое возбуждение будет вносить основной вклад в темновой счет (DCR), в то время как при низких температурах, но при

сильном электрическом поле основной вклад в DCR будет вносить именно туннельное возбуждение, вызываемое избыточным смещением [2].

**Результаты.** На рис. 1 представлена зависимость темнового счета от температуры при квантовой эффективности 10% и постоянных напряжениях смещения для трех детекторов. Видно, что с ростом температуры ЛФД резко растут значения DCR для ждущего режима работы ДОФ. Значения DCR ДОФ в режиме стробирования значительно ниже и рост более пологий.

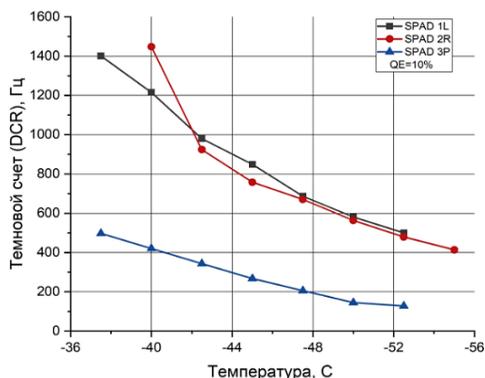


Рис. 1. Зависимость темнового счета от температуры при квантовой эффективности 10% и постоянных напряжениях смещения.

Анализ зависимости темнового счета от избыточного напряжения смещения для ждущего режима 1L, 2R и режима стробирования 3P ДОФ проводился при температуре  $-40^{\circ}\text{C}$ . Сравнение экспериментальных данных (рис. 2) показывает преимущество использования ДОФ в режиме стробирования. Зависимости квантовой эффективности от избыточного напряжения смещения представлены на рис. 3.

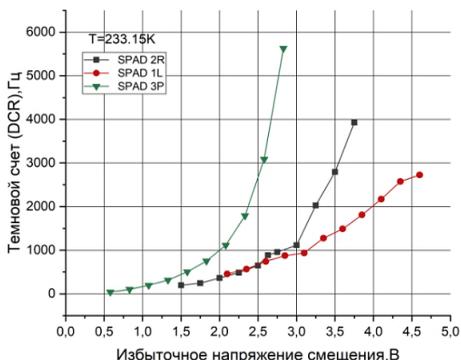


Рис. 2. Зависимость темнового счета от избыточного напряжения смещения. Температура ЛФД – 40 °С.

Видно, что при увеличении напряжения смещения квантовая эффективность растет, связано это, с тем что вероятность образования электронно-дырочной пары возрастает. Получаемые значения квантовой эффективности значительно выше для стробированного режима ДОФ.

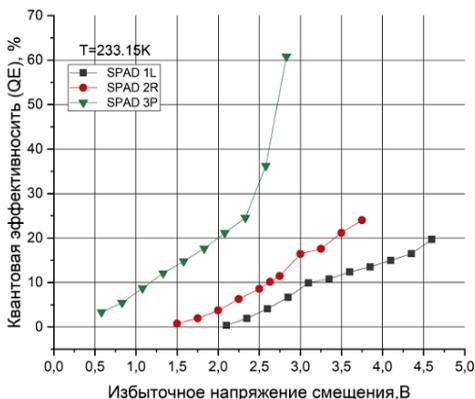


Рис. 3. Зависимость квантовой эффективности от избыточного напряжения смещения. Температура ЛФД – 40 °С.

**Заключение.** В результате проведенных экспериментальных исследований зависимостей параметров ДОФ от

температуры ЛФД и подаваемого на него напряжения смещения, было показано, что квантовая эффективность ДОФ, работающего в режиме стробирования, превосходит квантовую эффективность ДОФ в ждущем режиме. Данные зависимости позволяют выбрать рабочую точку для оптимального режима регистрации одиночных фотонов, исходя из допустимого уровня ложных срабатываний и квантовой эффективности.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0048.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Single photon avalanche diode detectors based on group IV materials / I.I. Izhnin, K.A. Lozovoy, A.P. Kokhanenko et al. // Applied Nanoscience. – 2020. – P. 1–11. – DOI: 10.1007/s13204-021-01667-0.
2. Dependence of InGaAs/InP avalanche photodiode based single photon detector's noise characteristics on the photodiode's active area / V. Zavodilenko, A. Losev, A. Miller et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 917. – P. 062034.

## **СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ ГЛУБИНЫ**

**А.В. Шалеев**

*Научный руководитель: канд. техн. наук, А.И. Елизаров*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: artem.shaleev@mail.ru

**Аннотация.** Работа посвящена обзору и сравнению пассивных и активных методов, которые на данный момент широко используются для построения карты глубины и определения расстояния до различных объектов. Особое внимание уделяется технологиям, активно применяемым при разработке систем управления беспилотным транспортом. По результатам анализа предложен пассивный базисный метод определения расстояния до объекта с использованием алгоритмов машинного зрения.

**Ключевые слова:** карта глубины, машинное зрение, стереозрение.

**Введение.** Актуальность исследования обуславливается тем, что в настоящее время наблюдается значительное повышение интереса [1] к управлению комплексами взаимодействующих сложных технических систем. Определение расстояния до различных объектов играет важную роль во многих областях, таких как робототехника, дорожное движение, геодезия, исследования окружающей среды. Существует множество методов по определению расстояния до различных объектов (препятствий, целей). Методы можно разделить на два класса – активные и пассивные. Активные методы [2] основаны на взаимодействии электромагнитного излучения (радио или оптического диапазона) с объектом. В такой схеме излучаемый сигнал отражается от объекта и возвращается на приемник, вследствие чего, зная скорость распространения сигнала в среде, быстро и точно определяется расстояние до объекта. Но их применение не всегда является целесообразным, в силу ограниченности

по диапазону измерений, а иногда даже невозможным, в связи с их высокой стоимостью, существенными размерами и сильной зависимостью от погодных условий. Пассивные методы [3] основаны на применении камер и систем компьютерного зрения. Такой подход позволяет определить дальность с помощью обработки изображений. Методы компьютерного зрения находят активное применение во многих областях, таких как распознавание и определение движущихся целей, отслеживании объектов. Целью данной работы является анализ существующих методов компьютерного зрения, используемых для построения карты глубины, и выбор методики вычисления расстояния пассивными методами.

**Методы и средства.** При разработке систем управления беспилотным транспортом важно помнить, что необходимо пользоваться картами, содержащими информацию о местоположении светофоров и знаков, постоянно анализировать объекты, находящиеся в поле зрения (определение скорости и направления), пытаться предсказать последующее действие какого-либо объекта. Классическая реализация беспилотного транспорта включает в себя комплекс из набора различных камер, радара и лидара, предназначенного в первую очередь для определения расстояния до различных объектов. Лидары имеют ряд недостатков, основной из которых – сложность конструкции (сканирование происходит за счет вращающихся зеркал), за счет чего нельзя назвать конструкцию надежной, при этом этот сенсор является самым дорогим компонентом. Поэтому многие компании пытаются создать надежный, недорогой лидар и параллельно ведут активные разработки систем пассивного оптического зондирования. В настоящее время разрабатывается технология BaseTracK [4], для решения данных проблем, с использованием компьютерной платформы NVIDIA DRIVE AGX.

Можно определять расстояние до объекта с помощью одного детектора изображений (ПЗС камеры). При таком подходе предполагается осуществлять механическое смещение камеры на фиксированное расстояние и определять размер изображения объекта в плоскости изображения до и после перемещения, после чего определяется расстояние до объекта измерения по формуле

$$Z = s \frac{y_1}{y_2 - y_1},$$

где  $s$  – расстояние, на которое была смещена камера,  $y_1, y_2$  – размер изображения объекта в плоскости изображения до и после перемещения.

При таком подходе сложность заключается в осуществлении смещения, что критично для систем, находящихся в движении. Поэтому среди пассивных методов распространение получили те, которые основаны на стереоскопическом (базисном) методе измерения [1, 3]. Глубина  $Z$  может быть найдена при помощи подобия треугольников (рис. 1).

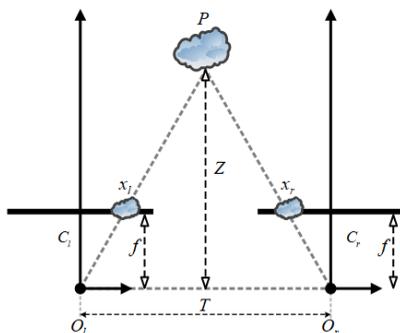


Рис. 1. Схема «идеальной» системы стереозрения для определения расстояния до объекта. Основные лучи начинаются от точек  $O_l$  и  $O_r$  и проходят через основные точки двух плоскостей изображения  $c_l$  и  $c_r$  соответственно [5]

В общем случае расстояние до точки наблюдения рассчитывается в соответствии со следующим выражением [3, 5]:

$$Z = \frac{f \cdot T}{x_l - x_r},$$

где  $f$  – фокусное расстояние;  $T$  – база;  $x_l$  и  $x_r$  – координаты проекций на левом и правом изображениях.

При известных размерах объекта (ширины), расстояние вычисляется [3] с помощью формулы:

$$Z_H = \frac{T \cdot H}{\operatorname{tg} \alpha (x_l - x_r)},$$

где  $H$  – горизонтальное разрешение изображения;  $\alpha$  – угол обзора камеры.

**Результаты.** Для решения задачи построения карты расстояний по двум изображениям [5, 6] предлагается использовать методику, состоящую из следующих основных этапов:

1. Устранение радиальных и тангенциальных искажений объектива с помощью калибровочных коэффициентов;
2. Процедура ректификации стереопары, т.е. пересчет полученной пары изображений в единую прямоугольную систему координат с приведением изображения к эпиполярной стереопаре;
3. Поиск особенностей на изображениях для построения карты несоответствий;
4. Расчёт триангуляционной карты диспаратности, в результате чего получается карта расстояний (глубины).

**Заключение.** В результате анализа пассивных методов, основанных на компьютерной обработке изображений, были сформулированы основные требования для построения карты глубины. Не учёт информации о взаимном расположении устройств регистрации и искажениях оптичес-

ской системы приводит с значительным погрешностям при определении расстояния до объектов. Тестирование разработанной программы, без учета этих факторов выявило наличие средней погрешности измерения порядка 2% на расстояниях более 100 см. Программная реализация, выполненная на языке Python, с использованием функционала библиотеки компьютерного зрения OpenCV [7], позволит использовать её при разработке системы на базе одноплатного компьютера.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методические и практические аспекты использования стереосистем компьютерного видения для наземных мобильных средств / С.М. Соколов, А.А. Богуславский, М.Г. Гаврилов и др. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3. – С. 112–122.
2. Singh S., West J. Cyclone: A Laser Scanner for Mobile Robot Navigation // Technical Report CMU-RI-TR-91-18 / The Robotics Institute, Carnegie Mellon University. – 1991. – 64 p.
3. Локтев Д.А., Алфимцев А.Н. Измерение расстояния до движущегося объекта с помощью комплексной системы видеомониторинга [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: наука и инновации. МГТУ им. Н.Э. Баумана : электрон. журн. – 2013. – № 11. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/996.html>.
4. Кто делает беспилотники для суровой русской зимы. История стартапа BaseTrack [Электронный ресурс]. – URL: <https://incrussia.ru/concoct/basetrack>.
5. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV computer vision with the OpenCV library. – Sebastopol : O'Reilly Media, 2008. – 556 p.
6. Kanade T., Yoshida A., Oda K. et al. A stereo machine for video-rate dense depth mapping and its new applications // Proc. Cvpr'96. – 1996. – P. 196–202.
7. OpenCV: [Электронный ресурс]. – URL: <http://opencv.org/>.

*Секция 3*

**Информационные технологии  
и телекоммуникационные системы**

## **ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ТОКОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР**

**А.Б. Аюрзанаев**

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, С.М. Дзядзук*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: Ayurzanaev98@mail.ru

**Аннотация.** В докладе представлены результаты разработки программно-аппаратного комплекса для измерения малых сквозных токов, протекающих через различные полупроводниковые структуры. Комплекс позволяет проводить измерения зависимостей величины протекающего через исследуемый образец тока приложенного напряжения смещения в широком диапазоне температур.

**Ключевые слова:** вольтамперные характеристики, измерительный комплекс, автоматизация

**Введение.** Непрерывное развитие электронной промышленности, проявляющееся в стремлении к уменьшению размеров электронных устройств дает неоспоримые преимущества экономя при производстве дорогостоящие материалы, повышая быстродействие устройств и повышает время работы от батареи для портативных приборов за счет снижения величины протекающих токов. Однако, усовершенствование технологии производства полупроводниковых структур влечет за собой необходимость совершенствования методов технологического контроля параметров готовых структур. Так и методик экспериментальных исследований тестовых образцов с целью дальнейшего усовершенствования технологии производства. Исследование темновых токов матричных фотоприемных устройств, обладающих малым поперечным сечением каждого отдельно взятого фоточувствительного элемента, требует с одной

стороны наличие приборов способных измерять малые токи, а с другой стороны для исследований процессов генерации-рекомбинации требуется измерение темновых токов в широком диапазоне температур [1-2]. Что в свою очередь приводит к большим временным затратам. Решением данной проблемы является автоматизация измерений и обработки полученных данных.

Целью данной работы является создание автоматизированного программного-аппаратного комплекса для измерения малых токов полупроводниковых барьерных структур.

**Методы.** Аппаратная часть комплекса построена на следующем оборудовании: пикоамперметр Keithley 6487; вакуумный криостат Janis; контроллер температуры Lakeshore 335; вакуумный пост HiCUBE; персональный компьютер.

Программное обеспечение (ПО) создавалось в Lazarus – открытой среде разработки ПО на языке Object Pascal для компилятора Free Pascal. Основное преимущество Lazarus – это способность создавать исполняемые программы для различных операционных систем таких как Windows и Linux.

Для разработки программного обеспечения использовалась библиотека Synapse, которая предоставляет простой и удобный в использовании интерфейс для передачи данных через COM порт, который можно использовать совместно с Delphi, Kylix, Free Pascal и C++ Builder.

Одним из несомненных плюсов связки Lazarus и Synapse является то, что она позволяет проводить разработку программного обеспечения как для ОС Windows, так и для Linux. Выбор в пользу применения данных программных продуктов сделан для устранения возникновение возможных проблем с коммерческими лицензиями, а также рядом других преимуществ, дающих разработчикам использование в своей работе открытого ПО [3].

**Результаты.** На рис.1 представлен измерительный комплекс. Пикоамперметр Keithley 6487 обладает внутренним источником напряжения смещения для измеряемых образцов, и позволяет приводить измерение токов в диапазоне от 20 мА до 2 нА. Наличие в составе автоматизированной установки неоптического вакуумного криостата Janis, позволяет проводить измерения темновых токов полупроводниковых структур с температурой окружающего фона не выше 10 К. За поддержание заданной температуры образца в интервале от 8 до 475К, отвечает контроллер температуры lakeshore. Для достижения низких температур и предотвращения конденсации влаги на поверхности исследуемого образца, а также на внутренней и внешней поверхностях криостата внутренний объем криостата находится под глубоким вакуумом, который обеспечивается вакуумным турбомолекулярным постом HiCUBE.



*Рис. 1. Измерительный комплекс: 1 – пикоамперметр Keithley 6487, 2 – вакуумный криостат Janis, 3 – контроллер температуры Lakeshore 335, 4 – вакуумный пост HiCUBE, 5 – персональный компьютер*

При подключении контроллера температуры Lakeshore 335 при помощи USB кабеля к персональному компьютеру появляется виртуальный COM-порт, который обеспечивает передачу информации бит за битом согласно протоколу RS-

232. Пикоамперметр Keithley 6487 на задней панели имеет полноценный разъем RS-232.

Комплекс функционирует под управлением разработанного программного обеспечения AUTOD и позволяет в автоматизированном режиме проводить измерения ВАХ полупроводниковых барьерных структур. На рис. 2 представлен интерфейс разработанного программного обеспечения.

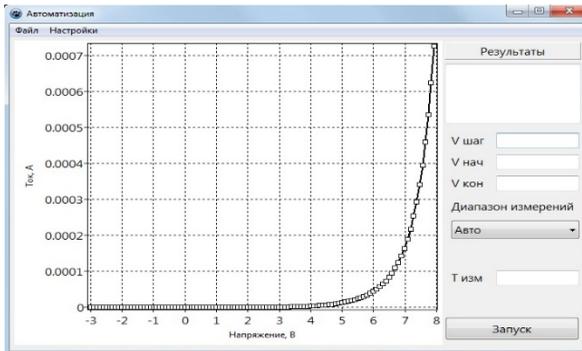


Рис. 2. Интерфейс программы AUTOD

Процесс проведения измерений заключается в следующем: оператор выполняет ввод параметров измерения, проводятся проверка и коррекция нуля, подключается исследуемый образец, производится запуск процесса измерений, производится автоматическое снятие показаний прибора в заданном диапазоне параметров эксперимента, полученные данные сохраняются в указанную директорию в виде текстового файла в формате удобном для дальнейшей обработки.

**Заключение.** Разработан программно-аппаратный комплекс для измерения малых токов полупроводниковых барьерных структур. Высокая степень автоматизации позволяет значительно упростить работу оператора. Аппаратная часть комплекса подобрана таким образом, что позволяет удовлетворять достаточно жесткие требования ме-

тодик измерения малых токов. Использование при разработке программной части бесплатных, свободно распространяемых библиотеки и среды разработки позволило избежать проблем лицензирования, как в процессе разработки, так и на этапе использования разработанного ПО.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Неоднородность темновых токов инфракрасных фотодиодов на основе  $\text{Cd}_{0,22}\text{Hg}_{0,78}\text{Te}$  / Г.Ю. Сидоров, Д.В. Горшков, И.В. Сабина и др. // Прикладная физика. – 2019. – № 3. – С. 45–52.
2. ВАХ матричных фотодиодов ультрафиолетового диапазона на основе ГЭС  $\text{AlGaIn}$ , полученных молекулярно-лучевой и МОС-гидридной эпитаксией / М.В. Седнев, К.С. Журавлев, А.В. Трухачев и др. // Труды XXV международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М., 2018. – С. 369–372.
3. von Krogh G., von Hippel E. The Promise of Research on Open Source Software // Management Science. – 2006. – Vol. 52, Issue 7. – P. 975–983.

## РАЗРАБОТКА СЕРВЕРНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ СБОРА КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

**А.К. Берзин, М.С. Южаков, Д.И. Фильченко,  
Д.А. Пидотова**

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, А.В. Бадьин*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, Томск, Россия  
E-mail: flerm.steam@ya.ru

**Аннотация.** В настоящей работе рассмотрены аспекты разработки серверного программного обеспечения системы сбора климатических данных. Описаны архитектуры TLS и HTTP серверов, используемых соответственно для осуществления коммуникации с базовыми станциями и для обслуживания пользовательского веб-интерфейса. Представлены результаты нагрузочного тестирования разработанных серверов.

**Ключевые слова:** сервер, база данных, нагрузочное тестирование, веб-интерфейс.

**Введение.** Интернет вещей все шире внедряется в различные сферы нашей жизни: к концу 2018 года было выпущено порядка 22 миллиардов умных устройств [1]. Интернет вещей нашел применение в точном земледелии. Известно, что сбор данных с сельскохозяйственных угодий позволяет улучшить планирование операций и снизить затраты на внесение азотных удобрений в почву. Нами разрабатывается система сбора климатических данных [2]. Однако недостаточно лишь собирать данные — их также нужно централизованно хранить, обрабатывать и предоставлять конечным пользователям системы. Целью настоящей работы является проведение нагрузочного тестирования программного обеспечения сервера разрабатываемой нами системы сбора климатических данных.

**Материалы исследования.** Архитектура серверного программного обеспечения продемонстрирована на рис. 1. Зонды, оборудованные датчиками для сбора данных о состоянии микроклимата, с требуемой периодичностью пересылают показания датчиков станции на связанную базовую станцию с использованием проприетарного протокола, построенного поверх технологии «LoRa». Базовая станция, в свою очередь, при первой возможности открывает зашифрованное соединение по протоколу защиты транспортного уровня (TLS) с центральным сервером, проходит процедуру аутентификации (во избежание попадания в систему сторонних данных) и передает все агрегированные данные на сервер, указывая при этом, от какого зонда они были получены. Использование зашифрованного соединения позволяет снизить риск утечки пароля, используемого для аутентификации базовой станции, и тем самым повысить безопасность всей системы.

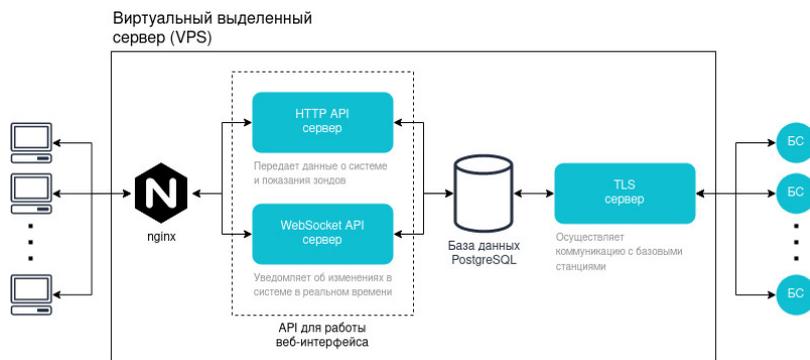


Рис. 1. Архитектура серверного программного обеспечения

TLS сервер, написанный на языке программирования Python с использованием стандартной библиотеки языка, осуществляет двустороннюю коммуникацию с прошедшими аутентификацию базовыми станциями: выполняет валидацию полученных данных и их последующее помещение в соответствующие таблицы реляционной базы дан-

ных. TLS сервер также в режиме реального времени отслеживает факт подключения базовых станций к системе, что упрощает отладку всей системы: и владелец станции, и администратор системы может в любой момент убедиться, что базовая станция подключена и готова передавать данные.

В разрабатываемой системе использована система управления базами данных PostgreSQL. Помимо производительных и надежных механизмов транзакции и репликации, хранения и обработки данных, PostgreSQL позволяет уведомлять подключенных к базе данных клиентов о различных событиях, например, о том, что новые данные о состоянии микроклимата были получены от зонда и готовы к дальнейшей обработке. Такие асинхронные уведомления позволяют снизить нагрузку на базу данных: клиенту не нужно с определенной периодичностью делать дополнительные запросы к базе данных, чтобы узнать о факте поступления новых данных.

Для удобства работы с собранными данными разработан веб-интерфейс, который позволяет просматривать и скачивать показания датчиков зондов в табличном и графическом виде с помощью браузера. Работа веб-интерфейса обеспечивается двумя программными интерфейсами (API): HTTP API и WebSocket API. HTTP API позволяет осуществлять аутентификацию и авторизацию пользователей, получать показания зондов и данные об актуальном состоянии системы в целом. WebSocket API позволяет в режиме реального времени уведомлять пользователя о новых событиях (в том числе о событиях, полученных от базы данных). Сервера, реализующие работу этих программных интерфейсов, написаны на языке программирования Python с использованием пакетов *fastapi* и *websockets*, исходя из соображений безопасности, скрыты за веб-сервером Nginx.

**Методы.** С целью оценки работоспособности разработанного серверного обеспечения в условиях увеличения нагрузки вследствие масштабирования системы сбора климатических данных, было проведено нагрузочное тестирование TLS сервера и сервера HTTP API, запущенных на тестовом выделенном сервере со следующими характеристиками: одно ядро процессора Intel Xeon, работающего на частоте 2,2 ГГц и 1 ГБ оперативной памяти. Нагрузочное тестирование TLS сервера моделировало сценарий с 75 подключенными базовыми станциями, каждая из которых сопряжена с 60 зондами, причем каждый зонд осуществляет передачу раз в 15 минут. Нагрузочное тестирование HTTP API, проведенное с использованием специального инструмента *k6* [3], моделировало сценарий с пиковой нагрузкой в 100 пользователей, каждый из которых в среднем совершает по 10 запросов к интерфейсу в минуту. Тестирование каждого сервера в отдельности производилось в течение часа.

**Результаты.** На использованном аппаратном обеспечении и TLS сервер, и сервер HTTP API оказались способны обработать смоделированную нагрузку. TLS сервер принял, проверил и разместил в тестовой базе данных всю принятую информацию. Сервер HTTP API обработал все пришедшие запросы, при этом максимальная задержка ответа на запрос к серверу не превысила 200 миллисекунд, а суммарное потребление оперативной памяти процессами HTTP API сервера составило порядка 90 мегабайт.

**Заключение.** Результаты нагрузочного тестирования показывают, что разработанные TLS и HTTP API сервера, предназначенные соответственно для сбора и предоставления конечным пользователям климатических данных, справляются с расчетной нагрузкой и могут быть использованы в реальной практике.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Global Connected and IoT Device Forecast Update [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.strategyanalytics.com/access-services/devices/connected-home/consumer-electronics/reports/report-detail/global-connected-and-iot-device-forecast-update> (дата обращения: 23.03.2021).
2. Network of agricultural probes for development of Russian digital farming / M.S. Yuzhakov, A.V. Badin, D.I. Filchenko et al. // JPCS. – 2020. – Vol. 1488. – P. 012026-1-012026-6.
3. K6: Open source load testing tool [Электронный ресурс]. – URL: <https://k6.io/> (дата обращения: 23.03.2021).

## **ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА LABVIEW-P2M**

**Р.А. Василенко, О.С. Жабин**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук,  
А.А. Жуков*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: rc9hb@mail.ru

**Аннотация.** В статье приведено описание лабораторной работы «Измерение электрофизических характеристик композиционных материалов на приборах серии P2M», которая посвящена программированию скалярного анализатора цепей для автоматизации процесса измерения электромагнитного отклика от композитов.

**Ключевые слова:** скалярный анализатор цепей P2M, композиционные материалы, электромагнитные характеристики, LabVIEW, Moodle.

**Введение.** Современная промышленность выдвигает все более жесткие требования к качеству радиоэлектронной продукции, при производстве которой необходимо учесть то, что она должна иметь минимальные масса-габаритные показатели и цену, достаточную надежность и электромагнитную совместимость. Одним из способов удовлетворения данным критериям может стать применение композиционных материалов. Но для качественного использования таких материалов при проектировании радиоаппаратуры необходимо знать их электромагнитные параметры [1]. Естественно, что для изучения и создания таких материалов нужны высококвалифицированные технические специалисты. Одной из задач при подготовке таких кадров является их междисциплинарная подготовка и умение работы с современным измерительным оборудованием [2].

**Используемое измерительное оборудование.** На радиофизическом факультете на ряду с различными измерительными приборами, также применяется скалярный анализатор цепей P2M, разработанный научно-производственной фирмой «Микран». Данный прибор предназначен для измерения модуля коэффициента отражения (КО), модуля коэффициента прохождения (КП), а также коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) в диапазоне от 10 МГц до 40 ГГц. Для обеспечения взаимодействия между скалярным анализатором цепей и пользователем НПФ «Микран» разработала программное обеспечение Graphit и SCPI команды к нему на различных языках программирования, таких как LabVIEW, C#, C++ [3].

При создании лабораторной работы был использован графический язык программирования LabVIEW, который является одним из лидеров для создания программного обеспечения измерительных приборов [4].

**Результаты.** Авторами разработана лабораторная работа «Измерение электрофизических характеристик композиционных материалов на приборах серии P2M», которая дает студентам следующие навыки: работа со скалярным анализатором цепей P2M; основы управления прибором с помощью программы, разработанной на графическом языке LabVIEW; организация удаленного управления прибором. Данный ресурс реализован в системе электронного обучения Moodle по курсу «Технологии организации приборных интерфейсов». На рисунке 1 приведен фрагмент электронного курса, содержащего описание лабораторной работы. Первое задание направлено на установление определенного частотного диапазона работы программы с возможностью выбора множителя частоты в соответствии с версией скалярного анализатора цепей P2M, на котором работает студент.

### Скалярный анализатор цепей P2M



Скалярный анализатор цепей P2M предназначен для измерения в коаксиальном тракте модуля коэффициента передачи (ослабления и усиления) и модуля коэффициента отражения или коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН); одновременного измерения модулей коэффициента передачи и отражения.

Область применения – производство и контроль ВЧ и СВЧ устройств и оборудования, исследование, настройка и испытания узлов, используемых в радиоэлектронике, связи, приборостроении, измерительной технике.

Информация о приборе на сайте производителя: <https://www.micran.ru/productions/115/kia/sna/r2m/>

-  Документация с сайта производителя "Микран"
-  Программа для управления прибором P2M — Graphit
-  Инструкция по управлению прибором P2M (эмулятором P2M) из среды программирования LabVIEW
-  Задание 1. Задание частотного диапазона
-  Задание 2. Отображение двух графиков (Коэффициентов отражения и прохождения)
-  Задание 3. Добавление калибровки и математических расчетов
-  Задание 4. Вывод текстовых файлов
-  Связь с дат "Управление скалярным анализатором цепей P2M с помощью среды..."

Рис. 1. Фрагмент электронного курса с описанием работы

Второе задание предусматривает вывод на лицевую панель программы двух графиков, на которые будут отображаться значения коэффициентов отражения и прохождения измеряемых композиционных материалов в дБм в зависимости от частотного диапазона.

Для того, чтобы обрабатывать результаты измерений электрофизических параметров композиционных материалов необходимо произвести калибровку измерительной ячейки для получения более точных данных. Для этого студент должен ознакомиться с методическими указаниями по третьему заданию и выполнить их. После реализации в программе возможности калибровки, студент должен преобразовать откалиброванные значения коэффициентов отражения и прохождения композитов из дБм в проценты. На этом этапе появится возможность получить не только значения коэффициентов отражения и прохождения

в процентах, но также и получить значения коэффициента поглощения в процентах. Данные параметры студент также должен вывести на отдельные графики.

На четвертом этапе работы студенту предлагается сохранить полученные электрофизические параметры в зависимости от частот, на которых проводились исследования композита, в формате .txt и .xls.

После выполнения всех этапов работы и проверки работоспособности программы студент отправляет отчет по реализации программы на проверку преподавателю.

Информационные и методические материалы по лабораторной работе включают:

- документацию по прибору P2M;
- программу для управления прибором P2M – Graphit;
- инструкцию по управлению прибором P2M из среды программирования LabVIEW;
- набор заданий по работе с прибором.

В курсе также предусмотрена возможность отправки студентами на проверку электронного отчета по лабораторной работе.

**Заключение.** Таким образом, была создана лабораторная работа, целью которой является познакомить студентов с возможностями использования графического языка программирования LabVIEW при автоматизации процесса измерений электрофизических характеристик композиционных материалов. Создание такого рода программы позволит студентам получить опыт работы на современном измерительном оборудовании и может пригодиться им при выполнении курсовых и квалификационных работ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lotgering F.K., Nucl J. Inorg. Topotactical reactions with ferromagnetic oxides having hexagonal crystal structures – I // Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry. – 1959. – Vol. 9. – P. 113–123.

2. Клена Л.И., Бурковская М.А. Междисциплинарность как важнейший фактор модернизации технического образования // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Педагогика. – 2020. – № 3. – С. 124–130.
3. Руководство по программному обеспечению R2M-04 [Электронный ресурс] – URL: [http://download.micran.ru/kia/Manual/Library/R2M/User\\_Manual/R2M-04-UM-001\\_part2.pdf](http://download.micran.ru/kia/Manual/Library/R2M/User_Manual/R2M-04-UM-001_part2.pdf) (дата обращения: 10.04.2021).
4. Использование информационных технологий в лабораторном практикуме по курсу «Измерительные приборы и устройства в радиотехнике» / О.С. Жабин, Р.А. Василенко, Г.И. Маленко и др. // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур. Материалы Тринадцатой Международной конференции / Томский государственный университет. – Томск, 2020. – С. 39–40.

## ОБНАРУЖЕНИЕ И ОТСЛЕЖИВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ИСКУССТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

**И.И. Гальцев**

*Научный руководитель: канд. техн. наук, А.И. Елизаров*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Российская Федерация

E-mail: e1.galtsev@gmail.com

**Аннотация.** Исследованы методы обнаружения объектов искусственного происхождения, на примере беспилотных летательных аппаратов. На основе известных алгоритмов обработки изображений предложен метод обнаружения объектов, основанный на анализе последовательности кадров и выявления межкадровых различий. Реализованный алгоритм позволяет обнаруживать движущиеся объекты в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** детектор движения, оптическая локация, алгоритм, Python, OpenCV, беспилотный летательный аппарат.

**Введение.** Анализ видеоинформации с каждым днём всё больше и больше находит применение в различных сферах человеческой деятельности. Совершенствование технологий способствует интенсивному внедрению видеоинформационных систем. Системы безопасности, видеонаблюдения, навигационные и метеорологические являются областями анализа видеопотока. Видеоаналитика решает широкий круг задач, таких как обнаружение объектов, слежение за перемещением и прогнозирование траектории движения. Решению задачи анализа движения уделяется все большее внимание со стороны различных национальных и международных проектов, особенно в рамках борьбы с различными беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) [1]. В связи с активным техническим развитием и производством недорогих БПЛА, все более вероятным становится их применение в различных целях злоумыш-

ленниками. А, следовательно, все более актуальной становится задача обнаружения БПЛА и защиты объектов от их воздействия. Целью работы является разработка алгоритма обработки видеопотока для обнаружения и слежения за объектами, как природного, так и искусственного происхождения, работающего в режиме реального времени.

**Методы обнаружения БПЛА.** Первым шагом в задаче борьбы с БПЛА является его обнаружение и локализация в пространстве. Обнаружения малоразмерных БПЛА в электромагнитном спектре может осуществляться с помощью камер оптического диапазона, различных радиолокационных станций, радиомониторинга, тепловизоров. Например, поиск и обнаружение БПЛА в инфракрасном диапазоне основан на том факте, что от объекта выделяется тепло как силовой установкой, так и электронными компонентами, точками торможения на несущих краях крыльев, пропеллеров и винтов. В данном случае возможность БПЛА быть обнаруженным определяется его излучательной способностью, контрастом и площадью излучения. БПЛА могут быть обнаружены и средствами радиотехнической разведки путем приема и анализа радиосигналов линий связи и управления, радиолокационных высотометров, постановщиков активных помех и радиолокационных станций [1].

Большинство из вышеперечисленных методов требуют существенных технических и материальных затрат, поэтому для обнаружения движущихся объектов актуальным является метод пассивной оптической локации. Метод заключается в обработке и анализе последовательности изображений, с использованием различных методов компьютерного зрения [2], с целью выявления самого факта движения и дальнейшего слежения за обнаруженным объектом. Анализ работ показывает, что задача обнаружения объектов активно изучается, но на сегодняшний день она не является полностью решённой [3, 4].

**Результаты работы.** Для поиска движения объектов на серии кадров, реализован алгоритм, схема которого представлена на рис. 1. Разработка ПО реализована на высокоуровневом языке программирования общего назначения – Python [5]. Python – это универсальный современный язык программирования высокого уровня, к преимуществам которого относят высокую производительность программных решений и развитое библиотечное окружение с открытым кодом, к недостаткам относятся отсутствие компилятора и невысокое быстродействие. В виду того, что Python адаптирован для работы в различных средах и операционных системах, разработанный алгоритм можно в дальнейшем использовать на практически всех известных платформах. При разработке программной системы предлагается использование библиотеки компьютерного зрения с открытым исходным кодом OpenCV, реализованной, в том числе, и для языка Python [6, 7]. Графический интерфейс, для организации ввода параметров работы программы, может быть реализован с помощью графической библиотеки Tkinter [8].

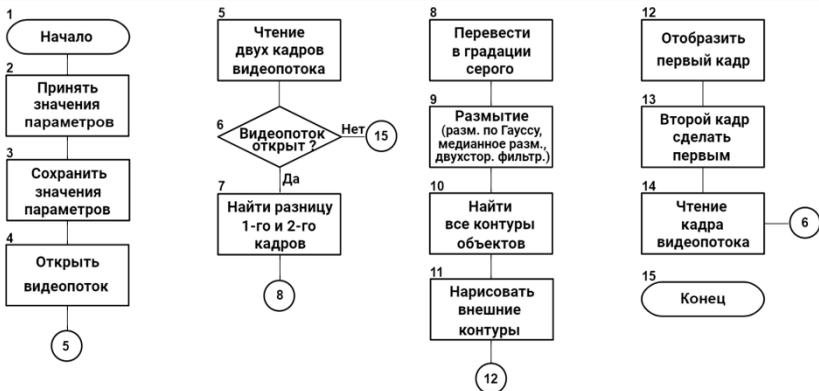


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

Рассмотрим некоторые элементы алгоритма подробнее.

1. Блоки 2, 3, 4 предназначены для ввода параметров работы алгоритма и выбора источника данных (файл либо видеопоток).
2. В блоке 7 реализовано вычисление абсолютной по-пиксельной разности двух кадров.
3. В блоке 9 для устранения точечных помех выполняется фильтрация разностного изображения с помощью одного из выбранного метода (фильтр Гаусса, медианный фильтр, билатеральный фильтр).
4. Блок 10 осуществляет поиск границ объектов на изображении с помощью алгоритма Кэнни.

В результате работы алгоритма формируется массив данных, элементы которого описывают местоположение и форму обнаруженного объекта (рис. 2).



*Рис. 2. Некоторые результаты работы программы*

Разработанный алгоритм, и созданная на его основе программа, были протестированы на различных изображениях (видеопотоках), на ноутбуке с процессором Core i7 2.8 GHz. Для серии кадров размером 1280x720 время, за-

траченное на обработку одной последовательности (два изображения), составило от 0.010 до 0.021 секунды. Такой разброс зависит от выбранного метода фильтрации. Наиболее качественный (визуальный) результат был получен с применением билатерального сглаживающего фильтра, поскольку он снижает шум и сохраняет края изображения.

**Заключение.** Предложенный в работе метод, и реализованный в виде программного модуля, за счет простоты и высокой скорости обработки, позволяет использовать его для первичного обнаружения местоположения движущихся объектов, в режиме реального времени. Полученная информация о форме объекта, также может активно использоваться при дальнейшем анализе. Для увеличения скорости обработки кадров можно предложить обработку кадров видеопотока с интервалом попуска (1, 2, 3, ...). Это позволит обнаружить малоподвижные объекты и значительно увеличить скорость обработки без потери качества и, в дальнейшем, усложнить алгоритм, например, распознаванием объектов или определением других необходимых параметров, при условии сохранения обработки в реальном времени. Дальнейшая работа будет посвящена слежению за обнаруженными объектами и поиску объектов с определенными параметрами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов / В. Карташов, В. Олейников, С. Шейко и др. // Радиотехника. – 2018. – Вып. 195. – С. 235–243.
2. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение – М. : Бином, Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
3. Анштедт Т., Келлер И., Лутц Х. Видеоаналитика: мифы и реальность. – М. : Security Focus, 2012. – 176 с.
4. Viola P. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features // Accepted Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001). – 2001. – P. 511–518.
5. Доусон М. Программируем на Python – СПб. : Питер, 2014. – 416 с.

6. OpenCV [Электронный ресурс] : документация по библиотеке. – URL: <http://opencv.org/> (дата обращения: 05.03.2021).
7. Джоши П. Искусственный интеллект с примерами на Python – СПб. : Диалектика, 2019. – 448 с.
8. Tkinter – создание графического интерфейса в Python [Электронный ресурс] : документация по библиотеке. – URL: <https://python-scripts.com/tkinter> (дата обращения: 10.03.2021).

## СРАВНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ АРХИТЕКТУР И DTW АЛГОРИТМА ДЛЯ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ

**Г.А. Долгов**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук,  
О.А. Доценко*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: gleb\_dolgov@mail.ru

**Аннотация.** В данной работе рассмотрены нейронные сети с различными архитектурами для распознавания жестов, вводимых с применением инерциальных измерительных датчиков, а также приведено сравнение с алгоритмом динамической трансформации временной шкалы. В результате было определено, что нейронные сети лучше подходят для задачи распознавания потока данных, в то время как алгоритм динамической трансформации временной шкалы имеет высокую точность на уже разделенных данных.

**Ключевые слова:** распознавание жестов, нейронные сети, алгоритм динамической трансформации временной шкалы, Google Colab, Data Capture Lab.

**Введение.** Распознавание жестов – перспективное направление в разработке интерфейсов для взаимодействия человека с техникой в реальном времени. Большинство методов распознавания жестов используют компьютерное зрение и методы обработки изображений. Но такой подход имеет ряд ограничений, связанных с получением данных с камеры, например, при низкой освещенности объекта или большого объема полученных данных. Существует другой способ определения жеста, основанный на анализе данных с измерительных инерциальных датчиков (IMU).

Нейронные сети (НС) – один из самых популярных методов создания систем, состоящих из вычислительных элементов – искусственных нейронов, которые объединя-

ются друг с другом для решения сложных задач [1]. Нейронные сети – это один из методов машинного обучения. Как следует из описания, НС обучают, но не программируются в явном виде. На вход НС поступает большое количество различных примеров, имеющих отношение к решаемой задаче, а она ищет во входных примерах некую статистическую структуру. В свою очередь, данная структура позволяет алгоритму определить правила для автоматического решения поставленной задачи (рис. 1) [2].



Рис. 1. Различие между классическими алгоритмами и нейронными сетями

Целью работы является сопоставление результатов обучения нейронных сетей различных архитектур для распознавания жестов, а также сравнение с алгоритмом динамической трансформации временной шкалы (DTW).

**Методы.** Искусственный нейрон (рис. 2) представляет собой следующую математическую модель (1):

$$a = \varphi\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i\right) \quad (1)$$

На входы поступают  $n$  вещественных чисел  $x_i$ . Входные значения умножаются на веса входов  $w_i$ . Полученные результаты складываются и к ним применяется функция активации  $\varphi$  [3].

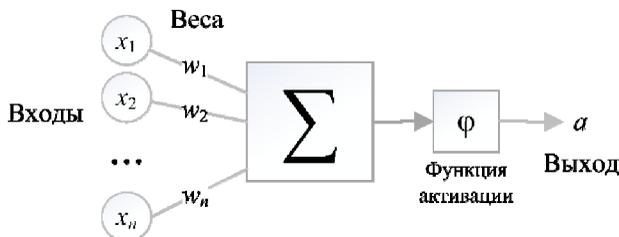


Рис. 2. Модель искусственного нейрона Мак-Каллока – Питтса

В данной работе был проведен анализ нейронных сетей следующих архитектур (видов связи искусственных нейронов): нейронная сеть прямого распространения (рис. 3, а), глубокая нейронная сеть прямого распространения (рис. 3, б), трехуровневая свёрточная нейронная сеть (рис. 3, в). Такие сети были выбраны для наглядного сравнения результатов того, что простые архитектуры в настоящее время не эффективны для решения сложных задач и лучше себя показывают в комплексе.

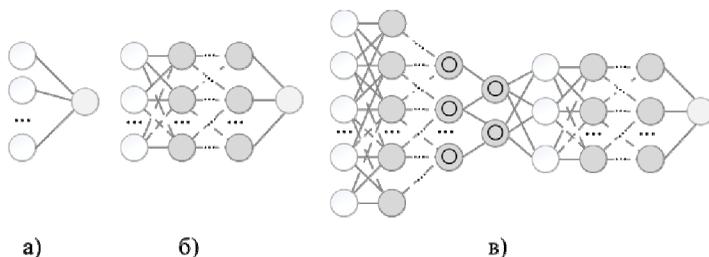


Рис. 3. Используемые архитектуры нейронных сетей:  
а) нейронная сеть прямого распространения, б) глубокая нейронная сеть прямого распространения, в) трехуровневая свёрточная нейронная сеть

Данным нейронным сетям необходимо распознать рукописные в воздухе цифры от 0 до 9, зафиксированные акселерометром IMU датчика. Обучающие данные представляют из себя 40 массивов по 80 точек на каждую цифру.

Разделение и маркировка данных подготавливалось в программе SensiML DataCapture Lab (рис. 4).

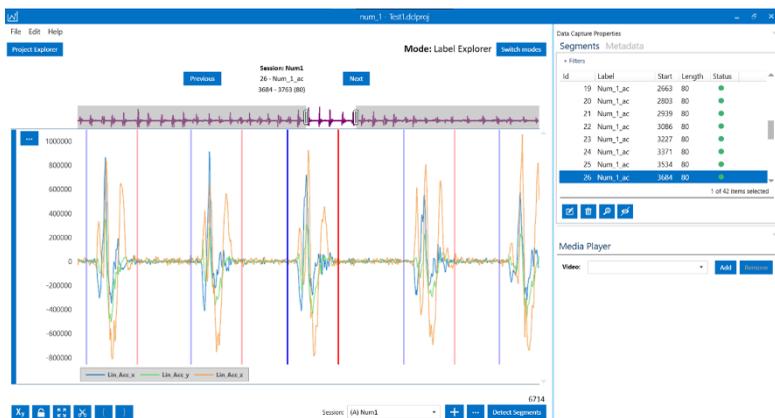


Рис. 4. SensiML DataCapture Lab

Разработка и обучение нейронных сетей проводились в интерактивной среде Google Colab.

**Результаты.** Лучший результат распознавания, представленный в таблице 1, показала нейронная сеть с архитектурой трехуровневой свёрточной сети.

Алгоритм динамической трансформации временной шкалы позволяет найти оптимальное соответствие между временными последовательностями. Для его реализации была использована программа на LabVIEW (рис. 5). В начале вводится название жеста в соответствующие поле, затем записывается эталонный жест, с которым будет производиться сравнение. Данные для него принимаются с микроконтроллера STM32F103C8 и акселерометра IMU датчика MPU9250. После заполнения базы эталонными жестами, можно запустить процесс распознавания. Если жест цифры 1 и 7 ввести схожими, то в половине случаев будет ошибка распознавания. Для остальных цифр в ходе эксперимента ошибок распознавания не наблюдалось. Ос-

новной недостаток данного алгоритма заключается в том, что точное распознавание происходит только тогда, когда вводиться строго один жест.

Таблица 1. Сравнение ошибки распознавания архитектуры сетей на тестовых данных

Архитектура сети	Структура	Доля неправильно определенных жестов (%), тестовый набор
Нейронная сеть прямого распространения	Одноуровневый перцептрон (слои 80-10)	97,60
Глубокая нейронная сеть прямого распространения	2-уровневая сеть (слои 80-100-50-10)	41,6
Трехуровневая свёрточная нейронная сеть	3-уровневая свёрточная сеть (слои 80-70-30-10-10)	10,12

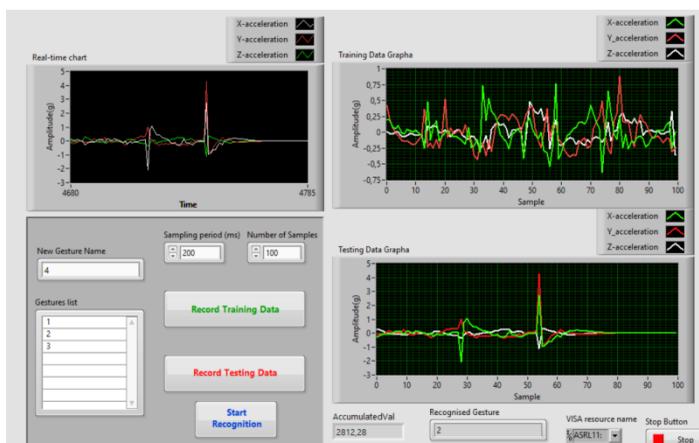


Рис. 5. DTW алгоритм, реализованный на LabVIEW

**Заключение.** По результатам работы наибольшую точность распознавания показала трехуровневая свёрточная

нейронная сеть. Если увеличить количество обучающих данных, можно повысить точность распознавания. Также было определено, что нейронные сети лучше подходят для задачи распознавания жестов из потока данных, так как они могут формировать правило для выделения необходимых жестов, в то время как алгоритм DTW имеет высокую точность на уже разделенных данных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шакла Нишант. Машинное обучение и TensorFlow. – СПб. : Питер, 2019. – 336 с.
2. Хайкин С. Нейронные сети : полный курс, 2-е издание / пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
3. Введение в искусственные нейронные сети [Электронный ресурс]. – URL: [https:// courses.openedu.ru/courses/course-v1:urfu +PYDNN+fall\\_2020/course/](https://courses.openedu.ru/courses/course-v1:urfu+PYDNN+fall_2020/course/) (дата обращения: 10.04.2021).
4. Распознавание жестов с помощью нейронной сети и применение этого подхода для создания игровых гаджетов нового поколения / А. В. Хельвас, Н. Г. Беляйкина, А. А. Гиля-Зетинов и др. // Труды МФТИ. Информатика, вычисл. техника и управление. – 2017. – Т. 9, № 2 – С. 164–175

## РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ШКОЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ПО ФИЗИКЕ В ПРОГРАММЕ UNREAL ENGINE 4

**Д.А. Егоров**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук,  
С.Н. Торгаев*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
Email: reiman.daniil@gmail.com

**Аннотация.** В работе представлены результаты разработки элементов программы виртуальной лаборатории по физике для школьников 7-9 классов. Результаты включают в себя интерфейс программы с возможностью просмотра методических материалов по лабораторным работам, комнату лаборатории и элементы, необходимые для выполнения лабораторных работ.

**Ключевые слова:** 3D моделирование, физика, Unreal Engine, VR технологии, лабораторные работы.

**Введение.** Задача создания виртуальной школьной лаборатории по физике является весьма актуальной [1,2]. Это связано с тем, что в сегодняшней ситуации необходимость подобного решения появляется при невозможности очного обучения и перехода к дистанционному. Также подобное решение является решением проблемы отсутствия необходимого для проведения лабораторных работ оборудования как в школе, так и дома. Целью работы, описанной в статье, является разработка элементов моделирования для виртуальной лаборатории (которая будет решением проблем, описанных выше) по физике для школьников. Уже существуют подобные решения. Например: <https://mediadidaktika.ru/>, <https://www.virtulab.net/> и т.п. Они имеют недостатки, которые в нашей ситуации будут решены: отсутствие статистики и мониторинга успехов учени-

ков, недостаточная реалистичность и недостаточный уровень интерактивности при проведении работ. При разработке подобной лаборатории необходимо обеспечить максимальную реалистичность и уровень погружения, т.е. разрабатываемая система должна передавать опыт, впечатления и знания, приближенные к тем, которые обучающийся получает во время выполнения лабораторных работ в реальной жизни. Это возможно обеспечить за счет более качественной реализации визуального представления лаборатории, процесса управления, физических взаимодействий всех компонентов системы, а также проработанного VR режима.

**Материалы и методы исследования.** Разработка виртуальной лаборатории осуществляется в среде Unreal Engine 4. Эта среда уже достаточно давно вышла за рамки простого игрового движка и используется как в разработке игр, так и в архитектуре, научных работах, и в других сферах. Также она имеет поддержку последних стандартов VR технологий, что позволит значительно повысить реалистичность выполнения лабораторных работ школьниками. Помимо среды для разработки, ведётся работа с учителями, которые консультируют в вопросах проведения работ, выбора оборудования, необходимой статистики для мониторинга, а также при составлении методических материалов, используемых в лабораторных работах. Все приборы созданы с помощью системы визуального программирования Blueprint, которая позволяет быстро прототипировать объекты, а благодаря гибкой системе классов и наследований, все эти приборы легко масштабируются и дорабатываются без замены старых объектов на новые, что заметно упрощает разработку в дальнейшем. Также используется код, написанный на C++ для более быстрых вычислений.

Там, где можно, происходит лишь имитация физики, примерные расчёты, которые сделаны для уменьшения потребления ресурсов и дополнительного ограничения от хаоса, который может создать физика. А там, где без реальной физики не обойтись, в дело вступает физическая система Unreal Engine, использующая также систему Chaos. Система Chaos – это новая система физики, которая делает её более реалистичной, масштабной и менее ресурсоёмкой. Поэтому, физические процессы могут моделироваться в необходимом объёме и проработке.

**Результаты и обсуждения.** В разрабатываемой системе лабораторные работы проводятся в виртуальной комнате, где заранее расставлены все необходимые приборы для проведения работы. Всего будет 25 лабораторных работ из школьной программы физики 7-9 классов, которые будут отобраны в ходе консультации с учителями. На данный момент уже создана одна лабораторная работа: “Определение плотности твёрдого тела с помощью весов и измерительного цилиндра”. Благодаря отличному рендеру удалось создать простую, но в то же время необходимую и достаточную комнату, с приятным для глаза визуальным отображением: материалы, мягкое освещение, объёмный свет, отражения, блики, рассеивание света и т.д. То же самое относится и к рендеру, который тоже легко масштабируется и меняется под разные платформы.

Ориентация в пространстве происходит посредством управления в VR или обычном режиме, с помощью клавиатуры и/или манипулятора (рис. 1,а). Также погружению способствует проработка разных деталей для режима VR: вибрация при прикосновении объектов, намывание экрана при взаимодействии с водой и т.д.



Рис. 1. Примеры реализации процесса управления в VR режиме – захват объекта (железного кольца) виртуальной рукой, управляемой пользователем (а) и прототипа интерфейса – на данном скриншоте показана панель с названием работы, время с начала работы, кнопки для переключения между разными окнами интерфейса, а также интерфейс, показывающий ход работы (б)



Рис. 2. Пример инструмента и раздела с методическими материалами: слева для создания разделов методического указания, посередине и справа демонстрация созданных разделов в самой программе

Большая интуитивность достигнута за счёт создания пользовательского интерфейса, отображаемого на экране, а также помогающего понять, что на данном этапе требуется от того, кто проводит работу (рис. 1,б). Также были созданы интерфейсы заметок, таймера, и т.п инструментов, делающих проведение лабораторной работы более комфортным и удобным. Для VRa был создан отдельный пользовательский интерфейс, адаптированный под особенности технологии (иное отображение шрифтов, иная структура самого интерфейса, и т.д).

Для обеспечения процесса выполнения лабораторных работ был создан раздел с методическими материалами

внутри самой программы, и специальный инструмент для удобного и быстрого создания методических указаний (рис. 2).

Также была создана таблица материалов и их параметров, которая постепенно расширяется и дополняется в зависимости от создания новых лабораторных работ. В ней собраны различные физические свойства материалов, необходимые для проведения лабораторных работ, и их физические параметры: масса, плотность, название и т.п. На рис. 3 представлены примеры моделируемой лаборатории.



а



б



в

Рис. 3. Примеры моделируемой лаборатории

**Заключение.** Таким образом, в статье представлены элементы, которые собираются в единое программное решение описанных выше проблем, созданное с использованием среды Unreal Engine 4 – виртуальная лабораторная работа по физике. На данный момент разработанный программный комплекс включает в себя лабораторные работы для обучающихся седьмых классов. В дальнейшем плани-

руется реализация лабораторных работ для обучающихся 7-9 классов. Использование VR технологий в системе позволит значительно повысить реалистичность процесса обучения и расширит методы преподавания такого предмета, как физика. Используя веб технологии Unreal Engine 4 будет создана система мониторинга, в которой учитель сможет смотреть у учеников не только их данные и прогресс работы, но и что они делают в данный момент, какие данные вычисляют и т.д.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Физика : тетрадь-практикум ; 7 класс: пособие для учащихся общеобразоват. учреждений / В.В. Белага, Н.И. Воронцова, В.В. Жумаев и др. – Просвещение, 2012. – 80 с.
2. Unreal Engine [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.unrealengine.com>.
3. Chaos Destruction Overview – Unreal Engine 4 Documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.unrealengine.com/en-US/InteractiveExperiences/Physics/ChaosDestruction/ChaosDestructionOverview/index.html>.
4. Виртуальные лабораторные работы по физике [Электронный ресурс]. – URL: <https://mediadidaktika.ru>.
5. Виртуальные лабораторные работы [Электронный ресурс]. – URL: [http://seninvg07.narod.ru/004\\_fiz\\_lab.htm](http://seninvg07.narod.ru/004_fiz_lab.htm).
6. Chaos Physics Overview [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.unrealengine.com/4.26/en-US/InteractiveExperiences/Physics/ChaosPhysics/Overview>.
7. Blueprint Overview [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.unrealengine.com/4.26/en-US/ProgrammingAndScripting/Blueprints/Overview>.
8. Unreal Engine VR Mode [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.unrealengine.com/4.26/en-US/BuildingWorlds/VRMode>.

## СИСТЕМА ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ УСТАНОВКИ КВАНТОВОЙ КОММУНИКАЦИИ

**А.Е. Иванов**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук,  
С.Н. Торгаев*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: genriepatters97@gmail.com

**Аннотация.** Работа посвящена практической реализации системы генерации лазерных импульсов для установки квантовой коммуникации на базе отладочной платы Cyclone V GX. В докладе описан алгоритм формирования трейнов лазерных импульсов, а также представлены экспериментальные результаты работы системы.

**Ключевые слова:** лазер, система генерации импульсов, квантовая коммуникация, ПЛИС.

**Введение.** На сегодняшний день квантовые технологии активно развиваются во всем мире. Одним из направлений квантовых технологий является квантовая коммуникация, которая обеспечивает максимально защищенные каналы связи [1,2]. Актуальность работы объясняется необходимостью создания аналога системы коммуникации, использующей для своей защищенности шифрование квантовым ключом. Цель работы является разработка системы управления, на основе программируемой логической схемы, установкой квантовой коммуникации.

**Методы и материалы.** Система генерации лазерных импульсов реализована в блоке управления лазером на языке программирования Verilog. Для программной реализации блока управления лазером была использована среда разработки Quartus Prime 18.1 Lite Edition. Регистрация импульсов осуществлялась посредством осциллографа KEYSIGHT MXR608A. Реализация системы управления

осуществлялась с использованием отладочной платы ПЛИС Cyclone V GX. Программный код разрабатывался на языке Verilog в программном пакете Quartus.

По завершению программной реализации блока управления лазером, необходимо было убедиться в работоспособности данной системы на имитированном канале связи. При проведении эксперимента, в качестве линии связи было выбрано оптическое волокно, для передачи оптических импульсов использовался лазер J724 компании производителя *Highland Technology*, а на приемной стороне использовался оптический детектор J730.

**Результаты.** Результатом проделанной работы является блок управления генерацией лазерных импульсов, который в дальнейшем будет использоваться для разработки собственной системы управления распределением квантового ключа в установке квантовой коммуникации.

Используя язык программирования Verilog, была программно реализована следующая логика:

1. Деление тактовой частоты, для получения рабочей частоты.
2. Формирование трейнов по N штук на рабочей частоте.
3. Управление периодом следования трейнов для тестирования системы.
4. Формированием трейнов по срабатыванию триггера.

Блок-схема блока управления, реализующего генерацию лазерных импульсов представлена на рисунке 1.

Для передачи сигнала по оптоволоконному каналу связи была задана частота следования импульсов равной 5 МГц, именуемая рабочей. Осциллограмма передачи трейна длиной в два импульса и с периодом между трейнами – 1000 нс представлена на рисунке 2. В связи с тем, что максимальная частота генератора отладочного макета Cyclone V составляет 125 МГц, то минимальная длительность импульса в трейне – 8 нс.

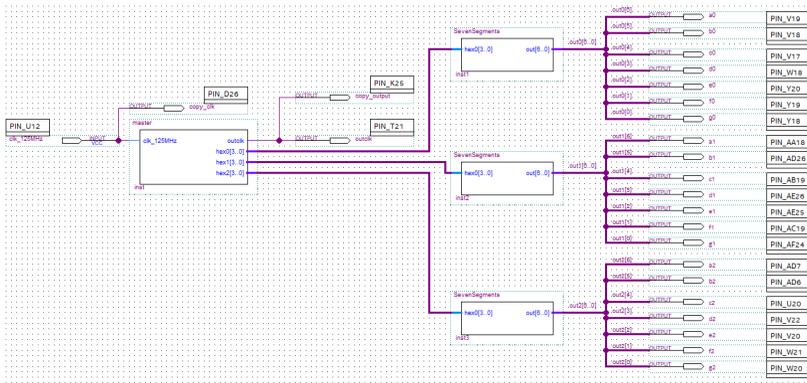


Рис. 1. Блок-схема генератора лазерных импульсов

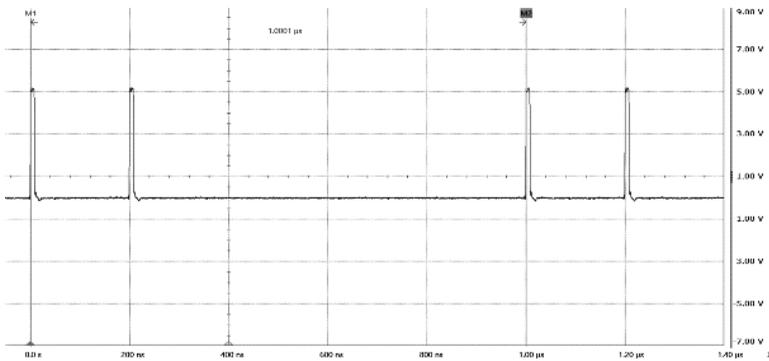


Рис. 2. Осциллограмма трейнов, состоящих из двух импульсов

На рисунке 3 представлена осциллограмма сформированных трейнов длиной в 100 импульсов и с периодом между трейнами – 48 мкс.

В работе блока управления основной режим формирования трейнов реализует логику отправки последовательности квантовых состояний и ожидание следующего сеанса обмена квантовыми состояниями для формирования квантовых ключей.

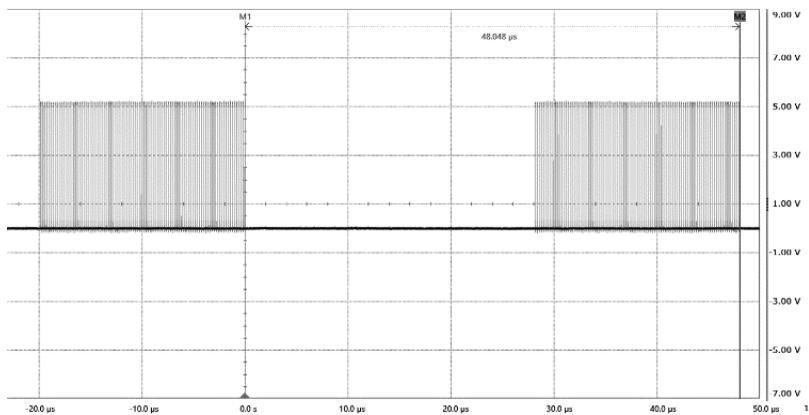


Рис. 3. Осциллограмма трейнов, состоящих из 100 импульсов

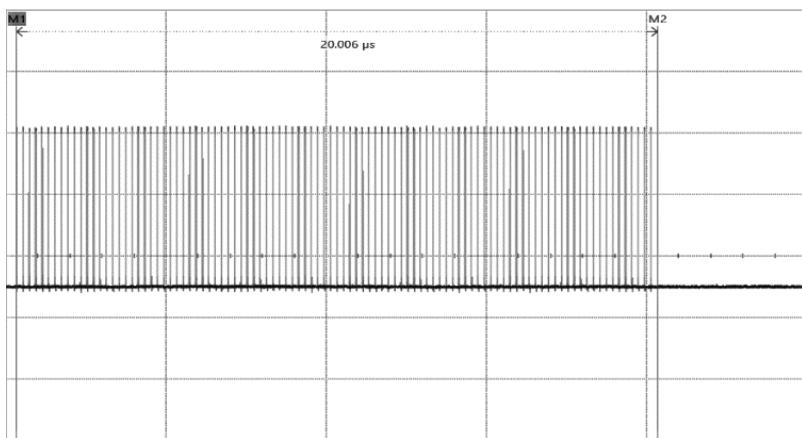


Рис. 4. Осциллограмма сформированного трейна из 100 импульсов

Данный режим формирования лазерных импульсов является основным результатом проделанной работы. Для наиболее безопасного шифрования сообщений между квантовыми системами необходим квантовый ключ длиной несколько тысяч битов, но для наглядного примера, на рисунке 4 изображена осциллограмма сформированного

трейна, состоящего всего лишь из 100 лазерных импульсов.

**Заключение.** В ходе работы были разработаны алгоритмы и выполнена реализация системы управления лазером установки квантовой коммуникации. Разработанная система позволяет получать на выходе импульсы управления различной частоты. Также система предполагает работу в двух режимах: режим непрерывных импульсов и режим генерации трейнов импульсов. Реализация системы управления с использованием микросхемы ПЛИС позволило получать импульсы управления длительностью порядка 8 нс.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wootters W.K., Zurek W.H. A single quantum cannot be cloned // Nature. –1982 – Vol. 299. – P. 802–803.
2. Что такое квантовые коммуникации и их развитие в РФ [Электронный ресурс]. – URL: <https://telecomtimes.ru/2018/12/kvantoviye-kommunikations-tehnologii> (дата обращения 18.04.2021).

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ НАБРАННОГО ТЕКСТА ПО ЗВУКУ ОТ НАЖАТИЯ КЛАВИШ**

**Э.Е. Ким**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук,  
М.Л. Громов*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
Email: eddudos.db@gmail.com

**Аннотация.** В данной работе используется метод корреляционного анализа для исследования возможности восстановления набранного текста по звуку от нажатия клавиш на клавиатуре компьютера. Была создана библиотека спектров нажатия различных клавиш. Экспериментально была показана возможность уверенного распознавания (с высокой точностью) клавиш «пробел» и «Enter», а также невысокой точности распознавания остальных клавиш в рамках использованного подхода.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, клавиатура, нажатие клавиши, анализ сигнала, спектр сигнала, быстрое преобразование Фурье, взаимнокорреляционный метод.

**Введение.** За последние десятилетия поток информации, которой человек обменивается через интернет, сильно возрос. Среди данных, передаваемых через телекоммуникационные сети, есть и конфиденциальные. Например, пароли, логины, номера телефонов, карт, и др. Если соблюдать правила цифровой гигиены (очищать кэш браузера, проверять адресную строку перед отправкой данных и т.д.), эта информация будет относительно защищена. Однако эта информация может быть перехвачена не только путём взлома прямых каналов передачи (фишинговые сайты, хищение носителей информации и т.д.), но и через побочные каналы утечки информации.

Одним из таких побочных каналов, популярный среди исследователей информационной безопасности, является

распознавание набранного текста по звуку от нажатия клавиш на клавиатуре компьютера или ноутбука или смартфона [1-5]. В этой работе исследуется взаимнокорреляционный метод анализа звуков нажатия клавиш с целью распознавания набранного текста, а также эффективность этого метода. Конечной целью работы является изучение особенностей разных методов распознавания текста по звуку и разработка контрмер для противостояния подслушиванию.

**Методы и материалы.** Звуки нажатия отдельных клавиш записывались с помощью микрофона и сохранялись в файл в формате .wav. Суммарно были записаны звуки от 35 клавиш (32 буквы русского алфавита без «ё», точка, «пробел» и «Enter»), т.е. только тех клавиш, которые необходимы для набора сырого текста без цифр и других символов. Использовать для анализа весь набор клавиш на клавиатуре (~104 шт.) не является целесообразным, т.к. злоумышленнику, как правило, интересен только набранный текст. Также этот выбор обусловлен неоднозначностью набора цифр и символов, т.к. в полноразмерной клавиатуре есть возможность набирать цифры и некоторые символы не только на буквенно-цифровом блоке, но и на цифровом блоке (Numpad). Для записи использовался конденсаторный микрофон (Trust GXT 212) находящийся на фиксированном расстоянии от мембранной клавиатуры (SVEN Standard 301). Для разных моделей клавиатур, в связи с их конструктивными особенностями, меняется сигнал и его спектр, поэтому, как правило, результаты для одной клавиатуры не применимы для другой [1]. Также, было учтено, что звук, издаваемый клавишами при нажатии, может меняться, в зависимости от стиля печати определенного человека [2]. Суммарно было проведено 350 измерений, 10 для каждой клавиши. Измерения проводились с использованием разных видов нажатия, т.е. произвольно

изменялись сила, время и угол нажатия. Затем, для каждой из них усредняли последовательности значений временных сигналов. В дальнейших экспериментах полученные данные считались эталонными.

В качестве инструментов использовались модули (библиотеки) для языка Python версии 3.8, такие как numpy (многомерные массивы) [6], matplotlib (библиотека для графиков) [7] и scipy (получение спектра из звукового файла) [8].

Было выяснено, что каждое нажатие клавиши определяется двумя пиками на графике амплитуды сигнала в зависимости от времени, первый соответствует короткому щелчку при нажатии, второй – щелчку при отжатии. Например, график сигнала нажатия клавиши «П» показан на рис. 1а.

В звуке нажатия клавиши присутствуют посторонние шумы, которые могут повлиять на точность распознавания, поэтому был создан простой цифровой полосовой фильтр, который «занимает» амплитуды гармоник в определенном диапазоне. Результат работы такого фильтра показан на рис. 1б.

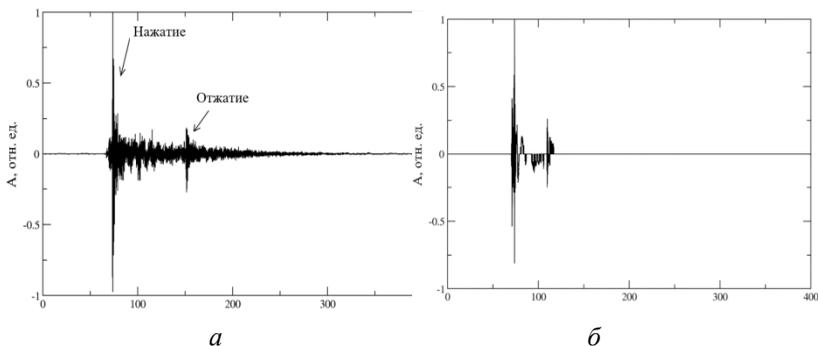


Рис. 1. Временной сигнал нажатия клавиши «П» (а) и нажатия клавиши «Ф» после прохождения через фильтр (б)

Затем, используя инструменты библиотеки `scipy` для дискретного преобразования Фурье, а именно – быстрое преобразование Фурье, были построены спектры эталонных сигналов, записанных ранее. Тем самым была сформирована библиотека эталонных спектров. Например, на рис. 2 изображена спектрограмма, построенная для сигнала, который состоит из поочередных серий нажатий клавиш «Ф» (0–3 сек.), «З» (3–6 сек.), «Т» (6–9 сек.), «Enter» (9–11 сек.) и «пробел» (11–13 сек.).

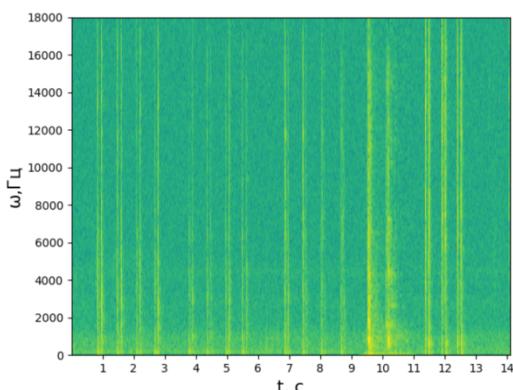


Рис. 2. Спектрограмма сигнала из серии нажатий клавиш «Ф», «З», «Т» и «пробел»

Из рис. 2. видно, что клавиши «пробел» и «Enter» имеют явные отличительные особенности, их амплитуды заметно превышают амплитуды других клавиш по причине конструкции этих клавиш.

Имея библиотеку эталонных спектров, для поиска коэффициентов сходства (корреляции) для двух спектров применялся взаимнокорреляционный метод. Использовалась следующая взаимнокорреляционная функция:

$$C = \frac{\sum_i (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_i (A_i - \bar{A})^2 \sum_i (B_i - \bar{B})^2}}$$

Здесь  $A_i$  и  $B_i$  – это значения двух сравниваемых спектров, а  $\bar{A}$  и  $\bar{B}$  – это средние значения спектров.

**Результаты.** В результате проведенных экспериментов были подсчитаны коэффициенты сходства для пар спектров из библиотеки эталонов. Для пары клавиш «Л» и «Д» (близкорасположенные) – 0,88, для «Л» и «Ц» (на расстоянии) – 0,42, «Ц» и «Д» – 0,41. Рассмотрев спектр произвольного фильтрованного сигнала «Л<sub>пр</sub>» и сравнив его с эталонными «Ц», «Л» и «Д», были получены коэффициенты сходства 0,54, 0,69, 0,70 соответственно. Отсюда видно, что при таком подходе близкорасположенные клавиши имеют высокий коэффициент сходства. Были проделаны аналогичные операции с другими выборками клавиш, они показали, что данная тенденция сохраняется. Стоит также отметить, что коэффициенты сходства для клавиш «Enter» и «пробел» из библиотеки эталонов сильно отличаются друг от друга (0,47) и от других клавиш из библиотеки (0,16–0,43). Также, в сравнении клавиш «Enter» и «пробел» с ними же, произвольно записанными в ходе эксперимента, они показывают высокие коэффициенты сходства (0,72–0,89).

**Заключение.** Таким образом, данный метод не позволяет однозначно определить, какая клавиша была нажата, но даёт возможность распознавания примерного её расположения. Также стоит отметить, что взимнокорреляционным методом с относительно высокой точностью можно распознать нажатия клавиш «пробел» и «Enter», что в итоге позволяет определить количество слов и набранных букв в тексте.

В дальнейшем планируется продолжить работу. В качестве методов для анализа планируется привлечь методы машинного обучения, в частности, рассмотреть использование сверточных и рекуррентных нейронных сетей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Don't Skype & Type! Acoustic Eavesdropping in Voice-Over-IP / A. Compagno, D. Lain, M. Conti et al. // Proceedings of the 2017 ACM on Asia Conference on Computer and Communications Security. – New York, 2017. – P. 1–13.
2. Behavioral Acoustic Emanations: Attack and Verification of PIN Entry Using Keypress Sounds / M.Q. Umair, P. Sourav, L. Yuanzhen et al. // Sensors. – 2020. – Vol. 20 (11). – P. 3015.
3. Abhishek A.S., Nitesh S. A Sound for a Sound: Mitigation Acoustic Side Channel Attacks on Password Keystrokes with Active Sounds // International Conference on Financial Cryptography and Data Security – FC 2016: Financial Cryptography and Data Security. – 2017. – P. 346–364.
4. Ilia S., Laurent S., Jeff Y., Ross A. Hearing your touch: A new acoustic side channel on smartphones [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/abs/1903.11137v1>.
5. Gerson S.F., Hae Y.K. Differential audio analysis: a new side-channel attack on PIN pads // International Journal of Information Security. – 2019. – Vol. 18. – P. 73–84.
6. NumPy user guide [Электронный ресурс]. – URL: <https://numpy.org/doc/1.20/user/index.html>.
7. Matplotlib Usage Guide – Current Release [Электронный ресурс]. – URL: <https://matplotlib.org/stable/contents.html>.
8. SciPy tutorial [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy-1.6.3/reference>.

## **ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ LoRaWAN ДЛЯ IoT**

**К.С. Кривов**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.- мат. наук,  
О.А. Доценко*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: k5283kc@gmail.com

**Аннотация.** В данной работе проводится обзор технологии беспроводной связи LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), которая является одним из решений беспроводных сетей типа LPWAN (Low Power Wide Area Networks). Появление таких сетей связано с потребностями межмашинного взаимодействия (Machine-to-machine, M2M) и передачи данных от устройств в рамках концепции IoT (Internet of Things). Также в статье представлен краткий обзор наиболее популярных версий промышленно выпускаемых радиомодулей стандарта LoRa от различных производителей.

**Ключевые слова:** LoRa, LoRaWAN, LPWAN, IoT, интернет вещей, беспроводная связь.

**Введение.** В наше время все чаще можно услышать термин IoT (Internet of Things – интернет вещей). Этот термин подразумевает концепцию сети передачи данных, главной особенностью которой является объединение в себе различного рода физических объектов (вещей), способных взаимодействовать между собой или внешней средой. Новые вертикали в рамках концепции IoT, такие как умные города, сельское хозяйство и другое, предъявляют жесткие требования к сети радиодоступа (Radio Access Network, RAN): покрытие, энергопотребление конечного узла и масштабируемость. Технологии, используемые для обеспечения сценариев IoT, например, беспроводная сенсорная сеть (Wireless Sensor Network, WSN) и сотовые технологии, не в состоянии одновременно справиться с этими тремя требованиями. Таким образом, появилось новое ре-

шение, известное как LPWAN – перспективная альтернатива для обеспечения недорогого и маломощного подключения к конечным узлам, расположенным на широкой территории. В частности, технология LoRaWAN, которая привлекает все большее внимание, как со стороны промышленности, так и со стороны научных кругов [1].

Цель работы заключается в обзоре технологии беспроводной связи LoRaWAN для IoT и существующих радиомодулей стандарта LoRa различных производителей.

**Технология LoRa.** Технология LoRa (Long Range) – это современная технология беспроводной передачи данных, разработанная компанией Semtech. Она объединяет одноименный метод модуляции (запатентованный компанией Semtech) в малопотребляющих сетях LPWAN и открытый протокол канального уровня LoRaWAN. LoRa – это метод модуляции, позволяющий передавать малые объемы данных на большие расстояния. Он основан на технике расширения спектра (Spread Spectrum Modulation) и вариации линейно-частотной модуляции (ЛЧМ, Chirp Spread Spectrum, CSS), при которой данные кодируются широкополосными импульсами с частотой, увеличивающейся или уменьшающейся на некотором временном интервале.

Математически ЛЧМ сигнал представляется в виде [2]:

$$x(t) = A_0 \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot t + \frac{\mu}{2} \cdot t^2\right), \quad (1)$$

где  $-\frac{T_c}{2} \leq t \leq \frac{T_c}{2}$  и описывается следующими параметрами:

$T_c = \frac{2^{SF}}{BW}$  – длительность радиосигнала;

$BW$  – ширина спектра радиосигнала;

$SF$  – коэффициент расширения спектра (изменяется в диапазоне от 7 до 12);

$f_0 = \frac{f_H + f_B}{2} = \frac{\omega_0}{2\pi}$  – центральная (несущая) частота радиосигнала;  $f_H = f_0 - BW / 2$  – нижняя частота радиосигнала;  $f_B = f_0 + BW / 2$  – верхняя частота радиосигнала;  $\mu = BW / T_C$  – скорость изменения частоты радиосигнала.

Из-за высокой чувствительности (-136 дБм) LoRa идеально подходит к устройствам с требованиями низкого потребления электроэнергии (конечные устройства работают несколько лет, питаясь от батарейки типа АА) и высокой устойчивости связи на больших расстояниях (до 15 км – сельская местность, 5 км – город) [3–4].

Типичная сеть LoRaWAN имеет базовую топологию «звезда» и состоит из: оконечных узлов, шлюзов, сетевого сервера и сервера приложений (рис. 1). Принцип работы: базовые станции (шлюзы) передают зашифрованные данные, полученные от оконечных устройств, на центральный сервер сети провайдера и далее — на сервер приложений сервис-провайдера, с которого информация поступает пользователям [5].

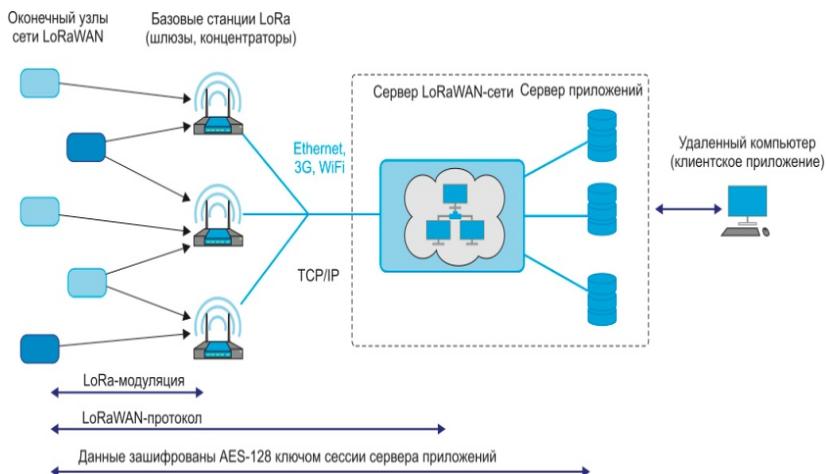


Рис. 1. Архитектура сети LoRaWAN [5].

**Радиомодули стандарта LoRa.** Рост сетей LoRaWAN увеличивает число производителей, предлагающих свои варианты модулей. Беспроводной модуль сети LoRaWAN, как правило, объединяет в своем составе приемопередатчик с необходимой для заданной частоты пассивной обвязкой и отдельный микроконтроллер для хранения стека протокола LoRaWAN. В большинстве случаев все преимущества модуляции LoRa реализуются с помощью трансиверов SX1272 или SX1276, выпускаемых компанией Semtech [5]. Основные технические характеристики наиболее популярных промышленно выпускаемых версий радиомодулей для узлов сети приведены в таблице.

**Результаты.** На основе проведенного обзора, можно выделить следующие преимущества технологии LoRaWAN: широкий радиус действия, низкое энергопотребление конечных устройств и высокая масштабируемость. С распространением сетей LoRaWAN растет и число производителей радиомодулей, каждый желающий может найти подходящий исходя из целей и задач.

*Таблица.* Основные характеристики серийно выпускаемых радиомодулей для сети LoRaWAN

Модуль	Производитель	Выходная мощность (макс.), дБм	Рабочая частота, МГц	Габаритный размер, мм
iM880A-L	IMST	19	868	20,0×25,0×2,0
MM002	Nemeus	14	868	14,4×26,4
LL-RLP-20	Link Labs	18	868; 902–928	15,8×29,0
EMB-LR1272	Embit	19	868/915	22,0×29,0
RFM95W	HopeRF	20	868	16,0×16,0×1,8

**Заключение.** В рамках данной статьи был проведен обзор технологии беспроводной связи LoRaWAN, которая

может эффективно использоваться для реализации концепции IoT, а также обзор существующих радиомодулей стандарта LoRa.

В дальнейшем планируется более углубленное изучение технологии с целью создания собственного радиомодуля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Sanchez-Iborra R., Sanchez-Gomez J., Ballesta-Viñas J. et al. Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18. – P. 772.
2. Исследование возможности применения технологии LoRa при проектировании систем позиционирования / К.Р. Каримова, Ю.М. Киреева, И.Р. Юмадилова и др. // *Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений*. – Уфа, 2019. – Т. 2. – С. 75–82.
3. Fargas B.C., Petersen M.N. GPS-free geolocation using LoRa in low-power WANs // *Global Internet of Things Summit (GIoTS)*. – Geneva, 2017. – P. 243–249.
4. Гусев О. Эксперимент по созданию системы мониторинга хозяйственных объектов с использованием LoRaWAN // *Беспроводные технологии*. – 2016. – № 2. – С. 72–76.
5. Верхулевский К. Особенности и тенденции развития технологии LoRaWAN // *Беспроводные технологии*. – 2017. – № 1. – С. 12–18.

## КОНЕЧНО-АВТОМАТНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ, СГЕНЕРИРОВАННЫХ ПО UML-ОПИСАНИЯМ

**Д.А. Лобанов**

*Научный руководитель: А.В. Лапутенко*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: lollop1@mail.ru

**Аннотация.** Данная статья посвящена описанию разрабатываемой системы мутационного тестирования, дополняющей инструмент MoMuT::UML конечно-автоматными тестами. На примере модели системы "Телефонная линия" описывается создание UML-модели и построение мутационного теста.

**Ключевые слова:** тестирование на основе модели, конечный автомат, Unified Modeling Language.

**Введение.** Тестирование является одним из важнейших этапов разработки программного обеспечения и представляет собой процесс подачи входных данных на программу и заключение о её качестве на основе полученных выходных данных. Тестирование на основе моделей основано на построении некоторой формальной модели, описывающей эталонное поведение тестируемой системы с последующей генерацией тестовых наборов на основе этой модели. Для описания модели используется Unified Modeling Language (UML) [1] – язык графического описания, который применяется для объектно-ориентированного анализа и проектирования различных систем, в том числе и программного обеспечения. Для мутационного тестирования на основе UML-моделей существует программный инструмент MoMuT::UML (MModel-based MUtation Testing) [2]. Однако, данный инструмент имеет недостаток в виде невысокого

тестового покрытия. Для устранения этого недостатка можно использовать конечный автомат [3], позволяющий строить тесты с гарантированной полнотой для программного обеспечения. Целью данной работы является описание разрабатываемой системы мутационного тестирования UML-моделей, дополняющей инструмент MoMuT::UML конечно-автоматными тестами.

**Методы.** Ключевыми понятиями в UML являются различные виды диаграмм, которые описывают структуру и поведение системы. На базе диаграмм UML можно сгенерировать шаблонный код на разных языках программирования высокого уровня. UML-модель обычно состоит из диаграммы классов и диаграммы состояний.

Конечный автомат (КА) — математическая абстракция, модель дискретного устройства, имеющего один вход, один выход и в каждый момент времени находящегося в одном состоянии из множества возможных. При работе на вход КА поступают последовательно входные воздействия, а на выходе КА формирует выходные сигналы. Достоинством модели конечного автомата является возможность генерации тестов без явного перечисления неисправностей и существуют эффективные методы синтеза тестов, доставляющие полные тесты относительно ошибок переходов и выходов системы (например, метод Василевского, или W-метод) [4]. Использование конечно-автоматных методов для построения тестов на этапе проектирования систем на основе UML-моделей позволит повысить качество разрабатываемых систем и расширить область обнаруживаемых ошибок.

Модель классического конечного автомата схожа с диаграммой состояний UML и представляет собой модель, которая описывает систему, которая может находиться в разных состояниях, смена которых происходит под воздействием входных сигналов с одновременной выдачей выход-

ных сигналов. В работе [5] был рассмотрен пример использования тестов, построенных по временному конечному автомату для программных реализаций, созданных по UML-моделям и показано, что такие тесты имеют хорошее качество. Однако число ошибок, рассмотренных в программной реализации, было не очень велико.

В качестве рабочего примера рассматривается UML диаграмма состояний «телефонной линии» [6] и конечно-автоматная модель из работы [5] без учета временных аспектов. Граф переходов данной модели приведен на рисунке 1.

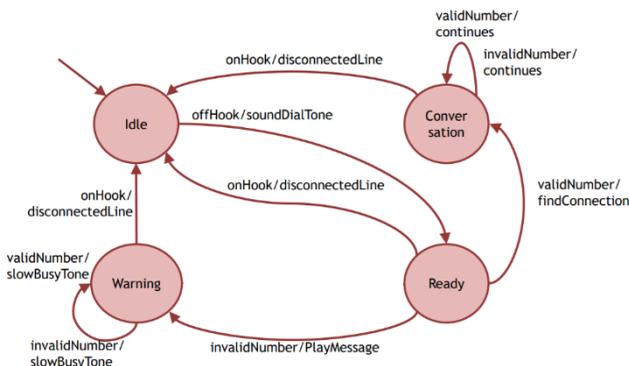


Рис. 1. Конечно-автоматная модель «телефонной линии»

На диаграмме приведены последовательности действий, описывающие нормальные звонки. Перед началом вызова телефонная линия находится в отключенном состоянии (состояние Idle). Когда трубка снимется, она издает сигнал станции (состояние Ready). После этого можно набирать номер. При вводе корректного номера система пытается выполнить соединение и направить его к нужному адресату. Соединение может оказаться невозможным, если абонент или его узел заняты (состояние Warning). Если же соединение оказывается успешным, телефон вызываемого абонента начинает звонить. Если абонент отвечает на зво-

нок, оба абонента могут осуществить разговор (состояние Conversation). Когда один из абонентов вешает трубку, линия разъединяется и снова возвращается в состояние ожидания.

Процесс тестирования на основе UML начинается с создания UML модели в среде моделирования. В работе используется плагин UML Rapyrus [7] для среды разработки Eclipse. UML-модель телефонной линии состоит из 2 диаграмм: диаграммы классов и диаграммы состояний. MoMuT::UML использует диаграммы состояний и диаграммы классов в качестве входных данных для генерации тестового примера. Этот инструмент конвертирует UML-модель в OOAS описание (Object Oriented Action System), которое является интерпретацией UML модели. Затем происходит генерация ошибочных (мутированных) описаний эталонной UML-модели в виде отдельных OOAS описаний. Для каждой пары эталонной и измененной модели строится различающая последовательность. Объединение таких последовательностей представляет собой тест для обнаружения заданных типов ошибок. Использование теста, построенного по модели конечного автомата может помочь сократить затраты на генерацию большого числа неисправных систем при мутационном тестировании и повысить тестовое покрытие.

**Результаты.** На данном этапе разработки, было получено OOAS описание системы «телефонная линия», смоделированной на языке UML с помощью MoMuT::UML. Тестовое покрытие составило 88,6%.

**Заключение.** В данной статье описана разрабатываемая система, позволяющая дополнить мутационные тесты, построенные по UML-модели инструментом MoMuT::UML тестовыми последовательностями, построенными конечно-автоматными методами. В дальнейшей работе предполагается проведение экспериментов по оценке полноты конеч-

но-автоматного теста относительно мутаций в автоматически сгенерированных программных реализациях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Welcome To UML Web Site! [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.uml.org> (дата обращения 05.05.2021)
2. MoMuT – Model-based Mutation Testing [Электронный ресурс]. – URL: <https://momut.org> (дата обращения 05.05.2021)
3. Гилл А. Введение в теорию конечных автоматов. – М. : Наука, 1966. – 272 с.
4. Василевский М.П. О распознавании неисправности автоматов // Кибернетика. – 1973. – № 4. – С. 93–108.
5. Galimullin R. Experimental comparison of the quality of TFSSM – based test suites for the UML diagrams // Spring/Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering, Казань, 30–31 мая 2013. – С. 1–4.
6. Рамбо Дж., Блаха М. UML 2.0. Объектно-ориентированное моделирование и разработка : 2-е изд. – СПб. : Питер, 2007. – 544 с.
7. Papyrus/Papyrus User Guide – Eclipsepedia [Электронный ресурс]. – URL: [https://wiki.eclipse.org/Papyrus/Papyrus\\_User\\_Guide](https://wiki.eclipse.org/Papyrus/Papyrus_User_Guide) (дата обращения 05.05.2021).

## **ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В АКТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

**Д. Ляшенко, Т.С. Бондарева**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук,  
С.Н. Торгаев*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: [uran-1@mail.com](mailto:uran-1@mail.com)

**Аннотация.** Работа посвящена построению математической модели преобразования изображений полученных с помощью активной оптической системы, представленной лазерным монитором. Проведена проверка полученной модели с помощью постановки и затем решения обратной задачи: по полученному от монитора изображению восстановить изображение, которое было на входе у прибора. В ходе решения этой задачи удалось построить матрицу преобразования Фурье для восстановления исходных изображений и применить ее для восстановления полученного изображения металлической поверхности.

**Ключевые слова:** активные оптические системы, лазерный монитор, преобразования Фурье, восстановление изображений.

**Введение.** Актуальность исследования обуславливается тем, что зачастую полученная при использовании оптических приборов с разными возможностями и в разных областях применения визуализация требует дополнительной цифровой обработки для математического описания, спектрального анализа или улучшения качества. Особенно это ярко проявляется, когда изучаемые процессы закрыты от наблюдателя сильной фоновой или собственной засветкой [1]. Одним из методов визуализации подобных объектов является метод, основанный на использовании активных оптических систем (лазерных мониторов) [2]. Пример схемы лазерного монитора представлен на рис. 1. В лазерном

мониторе визуализация объектов осуществляется за счет узкополосного усиления лазерного пучка и проекции его на экран или CCD матрицу.

При формировании изображений в активной среде могут появляться значительные искажения, которые связаны с непостоянством и нелинейностью характеристик активной среды [3]. При этом интерес представляет задача разработки простой математической модели активной среды с точки зрения формирования изображения.

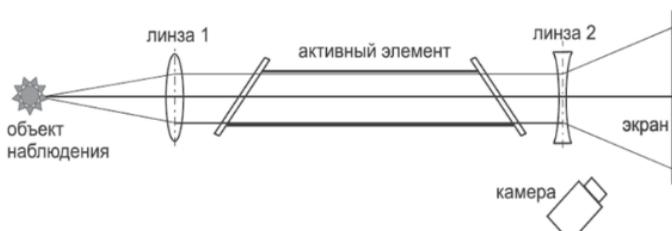


Рис. 1. Схема лазерного монитора

В связи с этим, целью данной работы является разработка модели преобразования изображений, полученных при помощи лазерного монитора. Разрабатываемая модель позволит осуществлять математическое описание активной среды лазерного монитора.

**Методы и материалы.** В данной работе обработка изображений осуществлялась в программе *Matlab*. Для обработки изображений использовалась библиотека *Image Processing Toolbox* с функцией нахождения быстрого двумерного прямого преобразования Фурье –  $fft2(X)$ . Данная функция, вычисляя преобразование Фурье, возвращает результат в матрице комплексных чисел, имеющей ту же размерность, что и матрица  $X$ .

Дискретное преобразование Фурье для двумерного массива чисел размера  $M \times N$  определяется следующим образом:

$$G_{uw} = \frac{1}{NM} \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=1}^{M-1} x_{mn} e^{-2\pi j \left[ \frac{mu}{M} + \frac{mw}{N} \right]},$$

а обратное преобразование:

$$x_{mn} = \frac{1}{NM} \sum_{u=1}^{N-1} \sum_{w=1}^{M-1} G_{uw} e^{-2\pi j \left[ \frac{mu}{M} + \frac{mw}{N} \right]}.$$

Важным свойством двумерного преобразования Фурье является возможность его вычисления с использованием процедуры одномерного быстрого преобразования Фурье [4]:

$$G_{uw} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1}{M} \left[ \sum_{m=1}^{M-1} x_{mn} e^{\frac{-2\pi jmw}{M}} \right] e^{\frac{-2\pi jnu}{N}}.$$

Вся работа сводилась к двум этапам: получению изображений и их обработки. Экспериментальные образцы были получены посредством регистрации изображений с тестовых объектов: белого листа бумаги; фона (отсутствие объекта); металлической поверхности и белого листа бумаги с изображенным на нем крестом. От каждого объекта удалось получить по несколько снимков. Такой подход позволил включить в исследование помехи: физические колебания рабочей установки, собственные колебания среды и асинхронность работы лазера и камеры.

В качестве тестового объекта, по которому строится преобразование Фурье, была выбрана металлическая поверхность. Все снимки, полученные в эксперименте, были переведены в полутоновые изображения, представлены в виде матриц в формате *unit8*. Далее из этих матриц для уменьшения колебаний установки была найдена средняя арифметическая матрица.

Для получения представления двумерного преобразования Фурье, в котором низкие частоты сосредоточены в

центре матрицы [4], нами использовалась функция  $fftshift(Y)$ . Для двумерного дискретного обратного преобразования использовалась функция  $ifft2(Y)$ .

Для восстановления изображений, полученных лазерным монитором необходимо построить общую математическую модель преобразования изображения данным прибором. В нашей работе, лазерный монитор рассматривается как черный ящик, где в качестве входных и выходных параметров используются цифровые изображения. Вторым этапом заключается в решении задачи восстановления исходных изображений. Итоговая формула для восстановления выглядела следующим образом:

$$M_{\Phi} = (M_{OB} - M_{ш}) : |M_{П} - M_{ш}|, \quad (1)$$

где  $M_{\Phi}$  – преобразование Фурье, описывающее лазерный монитор,  $M_{OB}$  – преобразование Фурье снимка тестового объекта,  $M_{П}$  – преобразование Фурье профиля усиления,  $M_{ш}$  – преобразование Фурье шума.

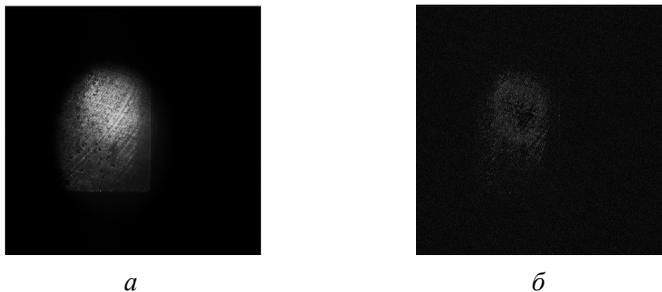


Рис. 2. Изображения металлических поверхностей: а) изображение полученное в лазерном мониторе; б) восстановленное изображение

**Результаты.** Результаты обработки изображений металлической поверхности представлены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что восстановленное изображение не содержит в себе фонового излучения и сохраняет структуру визуализируемой поверхности. Исходя из этого можно сделать вы-

вод, что формула (1) позволяет описывать процесс преобразования изображения активной оптической системой.

**Заключение.** В ходе работы нами была создана математическая модель преобразования изображений, полученных в активной оптической системе. Данная модель на простейшем уровне позволяет описывать активные среды лазерных мониторов с точки зрения формирования и передачи изображений. Совершенствование используемого алгоритма позволит в дальнейшем значительно улучшить качество восстанавливаемых изображений и таким образом можно будет улучшить проведение диагностики активными оптическими системами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Наблюдение объектов в условиях сильной фоновой засветки от плазмы / Р.О. Бужинский, В.В. Савранский, К.И. Земсков и др. // Прикладная физика. – 2009. – № 3. – С. 96–98.
2. Скоростные усилители яркости на индуцированных переходах в парах металлов / Г.С. Евтушенко, М.А. Казарян, С.Н. Торгаев и др. – Томск : СТТ, 2016. – 246 с.
3. Исследование искажений, вносимых усилителем яркости на парах бромида меди, в формируемые лазерным монитором изображения / М.В. Тригуб, М.В. Бурков, П.С. Любутин и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 10. – С. 850–854.
4. Мазурова Е.М. Двумерное и матричное представление быстрого преобразования Фурье // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2004. – № 4. – С. 3–12.

## РАЗРАБОТКА ТРЕНАЖЕРОВ ПО ТЕСТИРОВАНИЮ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

**В.А. Мануилов**

*Научный руководитель: доцент, канд. техн. наук,  
Н.В. Шабалдина*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: vamanuilov@gmail.com

**Аннотация.** В данной работе разрабатываются тренажеры для обучения построению тестов и процессу тестирования дискретных систем на основе формальных моделей. Разработанные тренажеры внедрены на платформы *Stepik* и *Coursera* в онлайн-курс «Математика в тестировании дискретных систем» в качестве оцениваемых заданий с фиксацией результата; также их можно использовать в тренировочном режиме.

**Ключевые слова:** тренажер, конечный автомат, тестирование, онлайн-курсы, автоматическое оценивание.

**Введение.** В настоящее время дистанционное обучение и самообучение с помощью онлайн-курсов очень популярно. При этом для оценки, достигнут ли обучающимися тот или иной образовательный результат, на образовательных платформах чаще всего используются тестовые задания или задания на взаимное оценивание. Но такого рода проверки обладают недостатками, например, у тестов ответы всегда фиксированы, а ожидание оценивания в задании на взаимное оценивание может занимать продолжительное время и быть не объективным. Целью данной работы является создание внешних инструментов (тренажеров) для онлайн-курса «Математика в тестировании дискретных систем» с возможностью автоматического оценивания и интеграцией на обучающие платформы.

**Основные понятия.** Одной из задач, решаемых в технической диагностике, является задача построения конечного множества входных сигналов (тестов) для технической системы, по реакции на которые можно определить правильность ее функционирования.

В рамках теории автоматов задача построения проверяющих тестов формулируется следующим образом. По данному эталонному поведению технической системы (*эталону*) требуется построить конечное множество конечных входных последовательностей, такое, что, зная реакции тестируемой системы (*реализации*) на последовательности из этого множества, можно определить, совпадает ли поведение реализации и эталона для любой входной последовательности. Такое множество тестовых последовательностей обычно называют *проверяющим тестом*.

Тройка  $\langle A, \sim, R \rangle$ , где  $A$  – эталонный автомат,  $R$  – область неисправности, а « $\sim$ » – есть некоторое отношение соответствия (конформности) между проверяемым и эталонными автоматами, называется *моделью неисправности* [1]. В данной работе рассматривается частный случай отношения конформности, а именно отношение эквивалентности. *Область неисправности* – множество конечных автоматов с числом состояний не более, чем у эталонного автомата и, тем же входным алфавитом.

Под *конечным автоматом* (или просто автоматом) [2] понимается шестерка  $A = (S, I, O, \varphi, \psi, s_0)$ , где  $S$  – конечное непустое множество состояний с выделенным начальным состоянием  $s_0$ ,  $I$  и  $O$  – конечные непустые входной и выходной алфавиты соответственно,  $\varphi: S \times I \rightarrow O$  – функция выходов и  $\psi: S \times I \rightarrow S$  – функция переходов. Пусть эталонный автомат и проверяемый должны находиться в отношении эквивалентности. Тогда *полным проверяющим тестом* относительно модели  $\langle A, \sim, R \rangle$  называют конечное множество  $E$  конечных входных последовательностей,

такое, что для любого автомата  $B$  из области неисправности  $R$ , не находящегося в отношении эквивалентности с эталоном, существует последовательность из  $E$ , на которую реакции автоматов  $A$  и  $B$  будут различны. Построить полный проверяющий тест можно различными способами, в данной работе будет рассматриваться метод Василевско-го. В основе построения теста данным методом лежит построение множеств достижимости и различимости.

Конечное множество  $V$  называют *множеством достижимости* полностью определенного автомата  $A$ , если оно содержит пустую последовательность  $\varepsilon$  и для каждого состояния  $s$  автомата  $A$  в множестве  $V$  существует входная последовательность, переводящая автомат  $A$  из начального состояния в данное состояние  $s$ . Конечное множество  $W$  называют *множеством различимости* приведенного автомата  $A$  с числом состояний  $n$ , если для любых  $s_i, s_j \in S, i \neq j$ , существует последовательность, различающая эти состояния [3].

**Методы.** Тренажеры были реализованы с помощью языка гипертекстовой разметки *HTML (HyperText Markup Language)*, формального языка описания внешнего вида документа *CSS (Cascading Style Sheets)*, языка программирования *JavaScript* с использованием библиотек *React* и *Redux*. Для организации автоматического оценивания тренажеры разрабатывались согласно спецификации *LTI (Learning Tools Interoperability)*. Реализация тренажеров, согласно данной спецификации, позволяет интегрировать их в обучающие платформы в качестве удаленных сервисов без необходимости повторной авторизации. В основе данной спецификации лежит авторизация с помощью протокола *OAuth* и если все условия соблюдены, то при переходе в тренажер с обучающей платформы передается вся необходимая информация о слушателе, которая позволяет

ограничивать попытки и отправлять результаты на обучающую платформу.

**Результаты.** В качестве первого тренажера предлагается рассмотреть тренажер «Проверка построения множества достижимости» [4]. В данном тренажере слушателю представлен инициальный конечный автомат с выделенным начальным состоянием. Задачей слушателя является построение множества достижимости для представленного конечного автомата. Построенное и введенное слушателем множество разделяется на последовательности и происходит симуляция поведения конечного автомата, в ходе которой проверяется, все ли состояния автомата достигнуты. Результат фиксируется на обучающей платформе.

Второй тренажер – «Проверка построения различающих последовательностей для пары состояний» [5]. В данном тренажере слушателю представляется не инициальный конечный автомат. Задачей слушателя является построение различающих последовательностей для пар состояний этого конечного автомата (умение строить различающие последовательности является основой для дальнейшего построения множества различимости, которое включено в структуру полного проверяющего теста). Для введенной слушателем последовательности осуществляется эмуляция поведения конечного автомата, последовательность по-символьно подается на один и тот же автомат с разными начальными состояниями. Подавая символы входной последовательности, фиксируются и анализируются выходные реакции, согласно переходам. Если на определенном этапе наблюдается различные выходные реакции, то делается вывод что введенная слушателем последовательность является различающей и выставляется соответствующая оценка и фиксируется на обучающей платформе. В процессе апробации было замечено, что слушатель может построить последовательность, которую можно сократить.

Было принято решение, что в таком случае слушателю будет отображаться, что задание пройдено, но будет отмечено, что из последовательности достаточно подать только начальный отрезок определенной длины.

Третий тренажер – «Итоговое задание» [6]. Он служит для имитации процесса тестирования микросхем. Даже в реальности организовать лабораторную работу, в рамках которой студенты осваивают навык тестирования системы или устройства, довольно сложно – для этого нужны специальные стенды. Поэтому в рамках онлайн-курса было решено создать такой тренажер-эмулятор. Слушателю необходимо, поочередно подавая входные символы на микросхему, определить, соответствует она эталонному поведению или нет. Имеется некоторая эталонная микросхема, работа которой описывается инициальным конечным автоматом (для этого автомата и построен полный проверяющий тест методом Василевского). На основе эталонной микросхемы, а точнее, эталонного автомата, формируется еще два автомата. Затем слушателю в случайном порядке поочередное предоставляется эти микросхемы, всего их три. Слушатель, опираясь на тест, формирует входное воздействие в двоичной системе счисления путем переключения соответствующих рычагов. При нажатии кнопки «Такт» осуществляется эмуляция работы конечного автомата – входное воздействие подается на автомат, и на основе текущего состояния автомата и поданного воздействия вычисляется следующее состояние (обучающийся его не видит) и выходная реакция, которая отображается слушателю с помощью лампочек. Итак, слушателю нужно подать весь тест на проверяемую микросхему (кнопка «Сброс» соответствует воздействию *reset*, переводящему автомат из любого состояния в начальное – ее необходимо нажимать перед подачей очередной тестовой последовательности). Анализируя выходные реакции, обучающийся

должен сделать вывод о том, какая из микросхем соответствует эталонной. Ответ слушателя, по аналогии с предыдущими тренажерами, автоматически фиксируется на обучающей платформе. Внешний вид тренажера представлен на рисунке 1.

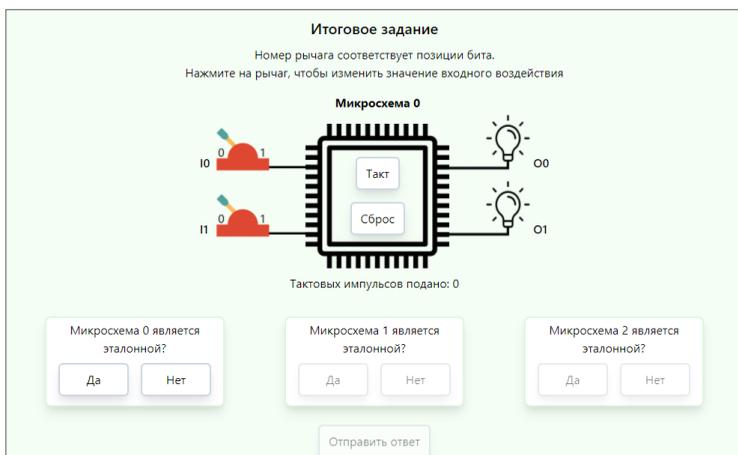


Рис. 1. Внешний вид тренажера «Итоговое задание»

**Заключение.** Было реализовано три тренажера. Первые два тренажера предлагают слушателю проверить свои навыки в освоении этапов построения полного проверяющего теста для дискретной системы в случае, если эталонное (ожидаемое) поведение системы задано в виде конечного автомата. Третий тренажер является итоговым заданием курса и призван помочь слушателям освоить процесс тестирования реальных систем. Данный тренажер эмулирует процесс тестирования микросхемы. Все разработанные интерактивные тренажеры были реализованы в виде внешних инструментов, интегрированы на обучающие платформы *Coursera* и *Stepik*; также их можно использовать в тренировочном режиме. Тренажеры были апробированы студента-

ми и на основании их отзывов были внесены корректировки.

*Автор выражает благодарность М.Л. Громову за помощь с интеграцией разработанных тренажеров на платформы.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Василевский М.П. О распознавании неисправности автоматов // Кибернетика. – 1973. – № 4. – С. 93–108.
2. Марченков С.С. Конечные автоматы. – М. : Физматлит, 2008. – 56 с.
3. Тренькаев В.Н., Прокопенко С.А. Методы синтеза полных проверяющих тестов для детерминированных автоматов : учебно-методическое пособие. – Томск : ТГУ, 2004. – 35 с.
4. Построение множества достижимости [Электронный ресурс]. – URL: [https://kitidis.tsu.ru/fsm/v\\_set/](https://kitidis.tsu.ru/fsm/v_set/) (дата обращения 19.04.2021).
5. Проверка построения различающих последовательностей для пары состояний [Электронный ресурс]. – URL: [https://kitidis.tsu.ru/fsm/w\\_set/](https://kitidis.tsu.ru/fsm/w_set/) (дата обращения 19.04.2021).
6. Итоговое задание [Электронный ресурс]. – URL: <https://kitidis.tsu.ru/fsm/testing/> (дата обращения 19.04.2021).

## **ИНФОРМАЦИОННОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КУРСА «УДАЛЕННЫЙ ДОСТУП К ИЗМЕРИТЕЛЬНОМУ ОБОРУДОВАНИЮ КОМПЛЕКТА NI ELVIS III»**

**А.М. Туктаров, К.А. Гергет**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук,  
А.А. Жуков*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: 32340635a@gmail.com

**Аннотация.** Приведено описание электронного курса «Удаленный доступ к измерительному оборудованию комплекта NI ELVIS III». Курс реализован в системе Moodle и предназначен для студентов радиофизического факультета Томского государственного университета, обучающихся по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы».

**Ключевые слова:** электронный курс Moodle, комплект приборов NI ELVIS III, удаленный доступ к измерительным приборам.

**Введение.** На радиофизическом факультете для информационного и методического обеспечения учебного процесса разработан электронный курс "Удаленный доступ к измерительному оборудованию комплекта NI ELVIS III". Ресурс предназначен для студентов, обучающихся по специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы".

Комплект приборов NI ELVIS III состоит из аппаратной части и программного обеспечения MeasurementsLive, которое реализовано в виде веб-сайта [1]. Студенты могут удаленно обращаться к этому измерительному оборудованию в удобное для них время.

Целью разработки электронного ресурса является подготовка студентов для эффективного использования современных измерительных приборов, применяемых в

учебном процессе и научных исследованиях при работе в дистанционном формате.

При разработке рассматриваемого ресурса использованы материалы электронных курсов, описанных в работах [2,3].

**Программная и информационная среда.** Электронный курс разработан в системе Moodle. Эта система широко используется для разработки образовательных ресурсов на радиофизическом факультете, и студенты факультета имеют навыки и опыт использования этой системы как при работе в компьютерных классах, так и при подготовке к занятиям [4].

### Мультиметр

-  Методические указания к Цифровому Мультиметру NI ELVIS III и NI ELVIS II+
-  Практическое применение Цифрового Мультиметра NI ELVIS III и NI ELVIS II+
-  Цифровой Мультиметр NI ELVIS II+
-  Measure\_Photo
-  Примеры работы с макетной платой
-  Регистрация в MultisimLive
-  ТЕСТ DMM

*Рис. 1. Фрагмент главной страницы курса*

**Результаты.** Курс состоит из нескольких лабораторных работ, включающих информационные и методические материалы по работе с измерительными устройствами из комплекта приборов NI ELVIS III. Каждая из работ содержит:

- теоретический материал по теме работы;
- описание работы (цели и задачи работы);

- порядок выполнения работы (подробная инструкция каждого этапа выполнения работы);
- отчет (описание результатов продельной работы с подробными пояснениями и выводами);
- тестовая часть (контроль усвоенных знаний).
- Фрагмент главной страницы курса приведен на рис. 1.

В курсе реализовано 5 лабораторных работ:

- Мультиметр и источник регулируемого напряжения.
- Генератор и осциллограф.
- Анализатор вольтамперных характеристик.
- Анализатор частотных характеристик (Анализатор Боде).
- Цифровой ввод-вывод.

В лабораторной работе «Мультиметр и источник регулируемого напряжения» студентам предлагается провести различные виды измерений: измерение тока и напряжения, сопротивления, емкости и индуктивности, а также проверить работоспособность диодов и целостность соединений. Фрагмент измерительной установки и передние панели цифрового мультиметра и источника регулируемого напряжения приведены на рис. 2.

В лабораторной работе «Генератор и осциллограф» студентам предлагается задать сигнал определенной формы, частоты и амплитуды и пронаблюдать данный сигнал на осциллографе. Передние панели осциллографа и генератора сигналов приведены на рис. 3.

В лабораторной работе «Анализатор частотных характеристик» студентам предлагается измерить частотные характеристики  $RC$ -цепочки. Передняя панель анализатора Боде приведена на рис. 4.

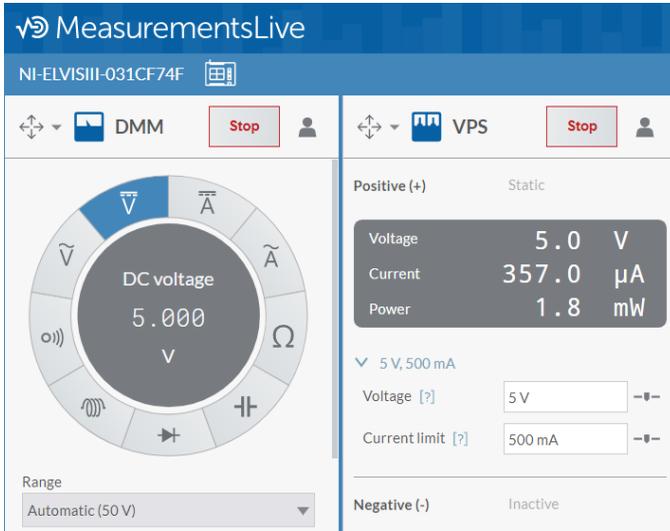


Рис. 2. Измерение постоянного напряжения цифровым мультиметром

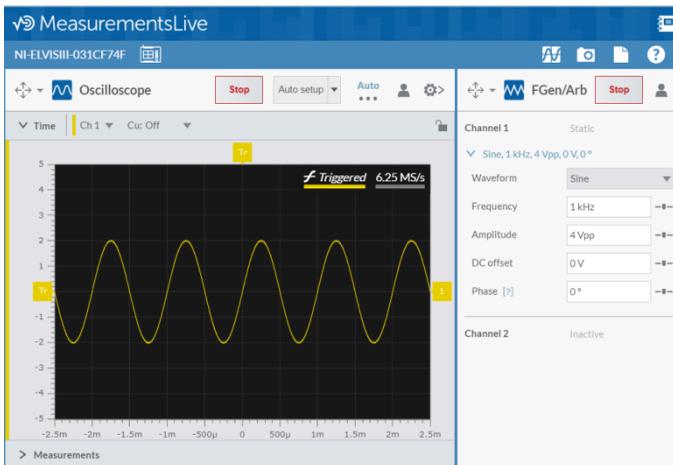


Рис. 3. Передние панели осциллографа и генератора сигналов

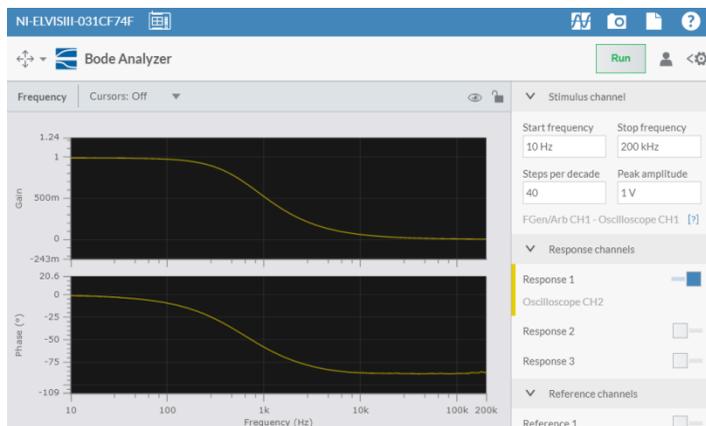


Рис. 4. Передняя панель анализатора Бодэ

**Заключение.** Создан электронный курс по работе с комплектом приборов NI ELVIS III. Знания и навыки, полученные при изучении этого курса, могут быть использованы студентами при работе с измерительным оборудованием и выполнении курсовых работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. MeasurementsLive [Электронный ресурс]. – URL: <https://measurementslive.ni.com> (дата обращения 15.04.2021).
2. Мельников Г.С. Информационное обеспечение курса "Основы работы с NI ELVIS II+" // Современные технологии в российской и зарубежных системах образования. Сборник статей VII Международной научно-практической конференции / МНИЦ ПГАУ. – Пенза : РИО ПГАУ, 2018. – С. 49–53.
3. Жуков А.А. Информационное и методическое обеспечение курса "Цифровые измерительные приборы" // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2016. – № 1. – С. 66–69.
4. Жуков А.А. Организация электронного обучения на радиофизическом факультете // Лучшие практики электронного обучения. Материалы II методической конференции. – Томск : ТГУ, – 2016. – С. 29–35.

## ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНЫЙ КУРС ПО ОСНОВАМ РАБОТЫ С ПРОГРАММНО- АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМОЙ NI ELVIS II+

**М.А. Черкашин, А.С. Духанов**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук,  
А.А. Жуков*

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: cherkashin.tolya.85.sos@gmail.com

**Аннотация.** Разработан электронный курс в системе Moodle по основам работы с комплектом приборов NI ELVIS II+. Курс предназначен для студентов радиофизического факультета ТГУ. Курс содержит информационные и контрольные материалы по работе с приборами комплекта NI ELVIS II+.

**Ключевые слова:** Moodle, NI ELVIS II+, LabVIEW, удаленный доступ к измерительным приборам.

**Введение.** Комплект приборов NI ELVIS II+ широко используется в учебном процессе по всему миру. Используется это оборудование и в лабораторных практикумах для студентов радиофизического факультета ТГУ [1, 2].

Этот комплект приборов включает в себя аппаратную составляющую для построения схем и выполнения измерений и программное обеспечение NI ELVISmx, созданное в системе программирования LabVIEW.

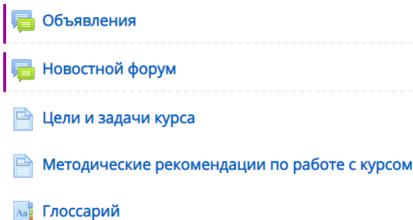
Авторами разработан электронный учебный курс «Основы работы с программно-аппаратной платформой NI ELVIS II+». При создании этого ресурса были использованы методические материалы электронных курсов, описанных в работах [3, 4].

Электронный курс разработан с целью знакомства будущих инженеров и исследователей с основами работы с современными измерительными приборами, которые они будут использовать в лабораторных практикумах по диотехническим дисциплинам.

**Программная и информационная среда.** Рассматриваемый электронный курс реализован в системе Moodle и предназначен для студентов радиофизического факультета Томского государственного университета. Эта система широко используется для разработки образовательных ресурсов на радиофизическом факультете, и студенты факультета имеют навыки и опыт использования этой системы как при работе в компьютерных классах, так и при подготовке к занятиям [5].

**Результаты.** На рис. 1 приведен фрагмент главной страницы курса, содержащий общие требования по работе с курсом.

Методические материалы по курсу "Основы работы с NI ELVIS II+"



*Рис. 1. Фрагмент главной страницы курса*

Курс содержит:

- входное и выходное анкетирование студентов;
- глоссарий;
- список рекомендованной литературы;
- краткую информацию для студентов по работе с курсом;
- учебно-методические указания для выполнения лабораторных работ;
- тесты по работе с измерительными приборами;
- виртуальную аудиторию для проведения дистанционных занятий;

- разделы по организации удаленного доступа к измерительным приборам и программированию работы с ними в системе LabVIEW.

Информационно-контрольные материалы по каждой работе включают теоретическую часть, контрольный тест и методические указания к работе. В курсе также предусмотрена возможность отправки студентами на проверку электронного отчета по лабораторной работе.

Первый раздел курса – «Комплект измерительных приборов ELVIS II+» знакомит студентов с аппаратной частью комплекта и программным модулем запуска приборов NI ELVISmx.

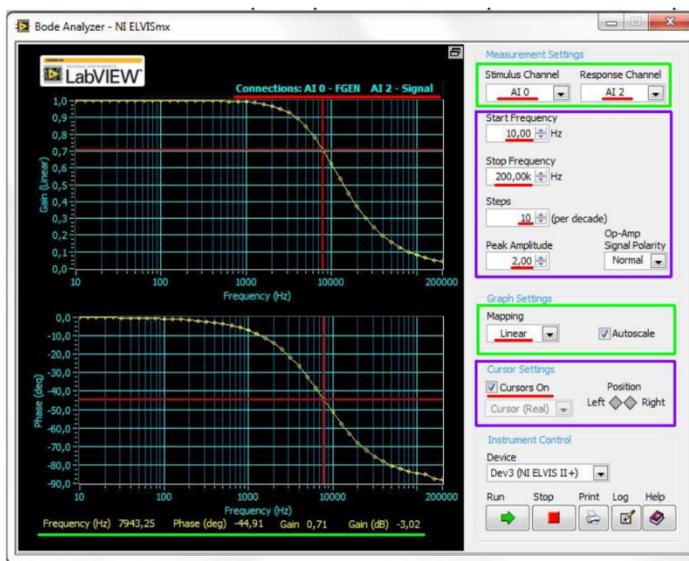


Рис. 2. Передняя панель анализатора Бode

Разделы со второго по десятый знакомят студентов с возможностями измерительных комплекта NI ELVIS II+: цифровым мультиметром, осциллографом, функциональным генератором и генератором сигналов произвольной

формы, регулируемые источники питания (VPS), анализаторами Боде, спектра, импеданса и вольтамперных характеристик, а также приборами ввода-вывода цифровых данных.

На рис. 2 приведена передняя панель анализатора Боде.

После выполнения лабораторных работ студентам предлагается пройти итоговый тест, включающий контрольные вопросы из тестов к лабораторным работам.

Пример контрольного вопроса приведен на рис. 3.

Каким виртуальным измерительным прибором комплекта NI ELVIS II+ можно измерить величину постоянного напряжения?



Выберите один ответ:

- a. анализатором вольтамперных характеристик двухполюсных цепей
- b. анализатором импеданса
- c. устройством цифрового ввода

Рис. 3. Пример контрольного вопроса

В разделе «Удаленный доступ к приборам комплекта NI ELVIS II+» приведены информационные материалы для организации удаленного доступа к измерительным приборам.

Раздел «Использование LabVIEW при работе с NI ELVIS II+» содержит материалы по основам работы со средой программирования LabVIEW и способам программирования приборов комплекта NI ELVIS II+ в системе LabVIEW. Также в этом разделе приведены примеры программ в системе LabVIEW для работы с рассматриваемыми приборами.

**Заключение.** Авторами разработан электронный курс при изучении, которого студенты приобретают знания и навыки необходимые для работы с комплектом приборов

NI ELVISII+, что позволит им успешно выполнять лабораторные работы по радиотехническим дисциплинам.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков А.А. Информационное и техническое обеспечение практикума по радиоэлектронике // Компьютерные измерительные технологии: Материалы I Международного симпозиума. – М. : ДМК Пресс, 2015. – С. 179–182.
2. Использование информационных технологий в лабораторном практикуме по курсу «Измерительные приборы и устройства в радиотехнике» / О.С. Жабин, Р.А. Василенко, Г.И. Маленко и др. // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур. Материалы Тринадцатой Международной конференции. Томский государственный университет. – Томск, 2020. – С. 39–40.
3. Мельников Г.С. Информационное обеспечение курса "Основы работы с NI ELVIS II+" // Современные технологии в российской и зарубежных системах образования. Сборник статей VII Международной научно-практической конференции / МНИЦ ПГАУ. – Пенза : РИО ПГАУ, 2018. – С. 49–53.
4. Жуков А.А. Информационное и методическое обеспечение курса "Цифровые измерительные приборы" // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2016. – № 1. – С. 66–69.
5. Жуков А.А. Организация электронного обучения на радиофизическом факультете // Лучшие практики электронного обучения. Материалы II методической конференции. – Томск : ТГУ, – 2016. – С. 29–35.

## **ТРЕНАЖЕР «МИНИМИЗАЦИЯ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ»**

**А.Р. Шайдуллин**

*Научный руководитель: доцент, канд. техн. наук,  
Н.В. Шабалдина*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: artikwf64@gmail.com

**Аннотация.** Работа посвящена описанию реализованного тренажера «Минимизация конечных автоматов», который является вспомогательным инструментом в освоении студентами процесса построения минимальной формы конечного автомата. Данный тренажер нашел свое применение в курсе «Теория автоматов», читаемом студентам кафедры информационных технологий в исследовании дискретных структур радиофизического факультета Томского государственного университета, кроме того, тренажер внедрен как не оцениваемое (тренировочное) задание в онлайн-курс «Математика в тестировании дискретных систем» на платформах Coursera и Stepik.

**Ключевые слова:** конечный автомат, минимизация, тренажер, онлайн-курс.

**Введение.** В настоящее время обучение выходит на новый уровень и люди имеют возможность обучаться, не выходя из дома. Массовые открытые онлайн-курсы предлагают знания и навыки в открытом доступе для всех желающих. На кафедре информационных технологий в исследовании дискретных структур (ИТИДиС) был разработан онлайн курс «Математика в тестировании дискретных систем» [1], где рассматривается теория автоматов. Одной из тем, рассматриваемых в этом онлайн курсе, является минимизация автомата. Целью данной работы является разработка тренажера, способствующего освоению темы «Минимизация автоматов» в модуле 2 «Подходы к построению проверяющих тестов для конечных автоматов». Причиной является то, что у студентов после освоения

данной темы в последующем возникали проблемы с построением минимальной формы автомата: множества, которые разбивались на одном из этапов, на следующем этапе собирались снова вместе, или студенты на всех этапах построения множеств обращали внимание лишь на выходные символы. В связи с этим был проведен поиск, при котором было выявлено, что аналогов данного тренажера нет. Также уникальной особенностью тренажера является то, что при минимизации автомата построение разбиения множества состояний визуально происходит путем их окрашивания. Умение находить минимальную форму автомата важно, в частности, для построения проверяющих тестов на основе модели конечного автомата [2]; также минимизация конечного автомата применяется в задаче оптимизации цифровых схем [3].

**Определения и обозначения.** Введем необходимые определения и обозначения.

Конечный автомат — это пятерка  $A = (S, I, O, \psi, \varphi)$ , где  $S$  — конечное множество состояний;  $I$  — конечное множество входных символов;  $O$  — конечное множество выходных символов;  $\psi: S \times I \rightarrow S$  — функция переходов;  $\varphi: S \times I \rightarrow O$  — функция выходов [2]. Один из способов представления конечного автомата это таблица переходов-выходов автомата. Строки таблицы соответствуют входным символам, столбцы — состояниям автомата. На пересечении строки, соответствующей входному символу  $i$ , и столбца, соответствующего состоянию  $s$ , содержатся значения функции переходов и функции выходов в виде  $\psi(s, i) / \varphi(s, i)$ .

При описании поведения какой-либо системы или устройства с помощью конечного автомата, как правило, стремятся выделить уникальные состояния, т.е. такие, что поведение автомата в каждом состоянии отличается от его поведения в любом другом состоянии. Поэтому перед тем

как ввести понятие минимального автомата, поясним, что такое эквивалентные состояния и эквивалентные автоматы.

Состояния  $s$  и  $t$  автомата  $A$  1-эквивалентны, если  $\varphi(s,i)=\varphi(t,i)$  для любого входного символа  $i$ , т.е. выходные символы автомата  $A$  в состояниях  $s$  и  $t$  на любой входной символ совпадают. Если найдется входной символ  $i$  такой, что  $\varphi(s,i)\neq\varphi(t,i)$ , то состояния  $s$  и  $t$  автомата  $A$  1-различимы [4].

Если задана входная последовательность  $\alpha$  длины  $k$ , то можно вычислить выходную последовательность  $\beta$  длины  $k$ , которую будет выдавать автомат в состоянии  $s$  на входную последовательность  $\alpha$ , строя цепочки переходов в новые состояния при помощи функции  $\psi$  и фиксируя выходные символы, определяемые функцией  $\varphi$ . Состояния  $s$  и  $t$  автомата  $A$  называются  $k$ -эквивалентными, если выходные реакции автомата  $A$  в состояниях  $s$  и  $t$  на любую входную последовательность длины  $k$  совпадают [2]. Если найдется входная последовательность  $\alpha$  длины  $k$ , такая, что автомат  $A$  в состояниях  $s$  и  $t$  выдает разные выходные реакции на эту последовательность, то состояния  $s$  и  $t$  называются  $k$ -различимыми. Состояния  $s$  и  $t$  автомата  $A$  называются эквивалентными, если они  $k$ -эквивалентны для любого  $k$ . Состояния  $s$  и  $t$  автомата  $A$  называются различимыми, если они  $k$ -различимы для некоторого  $k$  [4]. По аналогии можно определить эквивалентные и различимые состояния двух автоматов  $A_1$  и  $A_2$ .

Говорят, что автомат  $A_1$  и автомат  $A_2$  эквивалентны, если каждому состоянию автомата  $A_1$  соответствует, по крайней мере, одно эквивалентное ему состояние в автомате  $A_2$  и если каждому состоянию автомата  $A_2$  соответствует, по крайней мере, одно эквивалентное ему состояние в автомате  $A_1$ . Если автоматы не эквивалентны, то они различимы [4].

Если автомат уже построен, и он имеет эквивалентные состояния (состояния, в которых поведение автомата совпадает), то можно найти его компактное представление.

Автомат называется минимальным (или приведенным), если он не имеет эквивалентных состояний. В этом случае у автомата минимально возможное число состояний для заданного поведения. Процесс отыскания минимальной формы автомата называется *минимизацией автомата* [4].

Минимизация автомата состоит в определении *эквивалентного разбиения*  $P$  [4] автомата. В разбиении  $P$  эквивалентные состояния автомата принадлежат одному классу эквивалентности (являются смежными), а различные состояния принадлежат разным классам эквивалентности (являются разобщенными). Когда разбиение  $P$  построено, исходный автомат легко минимизировать – из каждого класса оставляют по одному состоянию, состояния в таблице переходов переименовывают согласно одному выбранному из класса эквивалентности (оставляемому в минимальном автомате) состоянию. Для целей минимизации важный этап – распознавание класса, к которому принадлежит каждое состояние, т.е. основным при обучении нахождения минимальной формы автомата является построение разбиения  $P$ .

**Методы.** В разработанном тренажере [5] отрабатывается метод минимизации автомата путем построения серий так называемых таблиц  $P_k$ [2], в которых объединены в один класс  $k$ -эквивалентные состояния (в тренажере для наглядности состояния, принадлежащие одному классу, раскрашиваются в один цвет). Основное внимание уделяется построению эквивалентного разбиения  $P$ . Это разбиение строится поэтапно: сначала строится разбиение  $P_1$ , в котором в один класс объединены 1-эквивалентные состояния, а 1-различимые состояния разобщены (разнесены в разные классы). На основе разбиения  $P_{k-1}$  строится раз-

биение  $P_k$ . В разбиении  $P_k$  в один класс объединяются  $k$ -эквивалентные состояния. В свою очередь,  $k$ -различимые состояния разобщаются. Если очередное построенное разбиение совпадает с предыдущим, то процесс закончен, последнее построенное разбиение и будет являться эквивалентным разбиением  $P$ . По разбиению  $P$  легко понять, является ли исходный автомат минимальным. Если хотя бы в одном классе эквивалентности разбиения  $P$  содержится более одного состояния, то автомат не минимален.

Пользователь взаимодействует с тренажером посредством веб-страницы. Тренажер программно реализован с использованием языка гипертекстовой разметки HTML, определяющего содержание и структуру веб-контента, языка каскадных таблиц стилей CSS, который используется для задания стилей (внешнего вида) веб-страницы и языка программирования JavaScript, отвечающего за функциональность/поведение веб-страницы [6-7].

**Результаты.** В исходном коде программы хранятся 4 автомата, из которых случайным образом выбирается один и подгружается на веб-страницу.

Внешний вид тренажера представлен на рис. 1.



l/S	1	2	3	4	5	6	7	8
a	7/0	4/1	7/0	2/1	4/1	6/1	8/0	7/1
b	2/0	4/1	2/0	2/1	2/1	7/1	2/0	4/1
c	2/1	1/0	2/1	3/0	7/0	8/0	6/1	3/1

Рис. 1. Вид тренажера на первом шаге



Рис. 2. Вид тренажера на втором шаге

На первом шаге пользователю предоставлена таблица переходов-выходов, возможность окраски состояний (путем раскраски будем обозначать, какие состояния 1-эквивалентны – они будут раскрашены в один цвет) и кнопка для подтверждения действия и последующей работы с тренажером. Также ко всему этому выше прилагается информационный блок, объясняющий пользователю, что необходимо построить 1-эквивалентные состояния [4] и какие предпринять действия после раскраски в один цвет 1-эквивалентных состояний. Например, на рис. 1 можно заметить, что столбцы выходных символов совпадают в состояниях 1, 3, 7, а также в состояниях 2, 4, 5, 6 – эти состояния 1-эквивалентны.

Так как столбцы выходных символы рассматриваются только при построении 1-эквивалентных состояний, то для следующих построений их можно убрать из таблицы.

На втором шаге, после успешного выполнения первого шага, пользователю выводится окно с информацией о разбиении  $P_1$ , таблица переходов (выходы уже не рассматриваются) с окрашенными ячейками в соответствии с данным разбиением и, вдобавок к кнопке подтверждения, появляется кнопка для завершения процесса разбиения и перехода к финальному шагу (если пользователь считает, что уже построено разбиение  $P$ ). Например, из таблицы пере-

ходов-выходов (рис. 1) видно, что переходы состояний 5 и 6 в таблице переходов (рис.2), которые находятся в одном классе разбиения, при входных символах  $b$  и  $c$  покрашены в разные цвета. Это соответствует тому, состояния 5 и 6 были 1-эквивалентными, но на шаге 2 оказались 2-различимы.

Тренажёр на каждом шаге просчитывает проверку раскраски пользователя. При неправильно построенном разбиении выводится предупреждающее окно, и пользователь имеет возможность исправить свой ответ.



Рис 3. Вид тренажера на финальном шаге

Далее шаги повторяются до того момента, когда пользователь решит, что нынешнее разбиение совпадает с предыдущим и разбивать больше нечего, т.е. в каждом состоянии одного класса разбиения автомат будет выдавать одинаковые выходные реакции на входные последовательности любой длины. Тогда пользователь завершает разбиение, нажимая соответствующую кнопку. Пользователю далее нужно ввести по одному состоянию из каждого класса разбиения (рис. 3). Если пользователь ввел состояния неверно, то ему выводится предупреждающее окно и он может исправить свой ответ. При верном вводе состояний на их основе будет построена таблица переходов-выходов минимальной формы автомата, с изменением обозначений соответствующих состояний.

**Заключение.** Был разработан тренажер «Минимизация конечных автоматов», в программном коде которого хранятся 4 автомата. В основу тренажера был положен метод минимизации конечных автоматов путем построения таблиц  $P_k$ . Данный тренажер внедрен в учебный процесс в рамках курса «Теория автоматов», читаемого на кафедре ИТИДиС радиофизического факультета Томского государственного университета, а также добавлен в качестве оцениваемого (тренировочного) задания в онлайн-курс «Математика в тестировании дискретных систем» на платформах Coursera и Stepik.

Так как эта первая версия тренажера, в будущем планируется его модернизация: анализ действий пользователя (при не правильных действиях давать пользователю подробную информацию о его ошибках), увеличение числа автоматов, фиксация результата и ограничение количества попыток.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Математика в тестировании дискретных систем [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.coursera.org/learn/math-in-testing-of-discrete-systems> (дата обращения 22.04.2021)
2. Василевский М.П. О распознавании неисправности автоматов // кибернетика. – 1973. – № 4. – С. 93–108.
3. Шварцкоп В.А. К покомпонентной оптимизации синхронной композиции автоматов // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: материалы Двенадцатой конференции с международным участием. 4–8 июня 2018 г. – Томск : ТГУ, 2018. – С. 92.
4. Гилл А. Введение в теорию конечных автоматов. – М. : Наука, 1966. – С. 8–118. – (Серия “Теоретические основы технической кибернетики”).
5. Тренажер «Минимизация конечных автоматов» [Электронный ресурс]. – URL: <https://trashp0lka.github.io/Testing> (дата обращения 22.04.2021).

6. Основы JavaScript [Электронный ресурс]. – URL: <https://html5book.ru/javascript-jquery> (дата обращения 18.11.2020).
7. Introduction to HTML5 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.coursera.org/learn/html> (дата обращения 1.12.2020).

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЙ ПЕРСОНАЖА В СИСТЕМЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЭВАКУАЦИИ

**И.Д. Шульга, Е.А. Юрченко**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук,  
С.Н. Торгаев*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: shulga.irina20762@yandex.ru

**Аннотация.** В данной статье представлены результаты разработки и программной реализации алгоритма изменения физиологического поведения человека в условиях пожара. Описываемый граф физиологического поведения был разработан в рамках создания комплексной 3D модели процессов эвакуации людей при чрезвычайных ситуациях, в частности, при пожарах. На основе данного графа было проведено моделирование в программе Unreal Engine.

**Ключевые слова:** эвакуация, чрезвычайная ситуация, моделирование поведения, 3D, физиологический граф

**Введение.** Развитие событий во время чрезвычайной ситуации практически непредсказуемо в силу большого количества факторов. Одним из самых непредсказуемых факторов развития событий является поведение людей. Тем не менее, при определённом обобщении и упрощении описания физиологического и психологического состояний возможно создание модели поведения человека при эвакуации.

Основная сложность задачи моделирования поведения человека при эвакуации – это создание максимально реалистичной модели при оптимизированных расчётах. Существующие на сегодняшний день модели имеют большое количество ограничений, связанных как с 2D реализацией

[1-4], так и с большим количеством упрощений, необходимых для оптимизации расчетов. Существуют работы, в которых используется 3D визуализация [5-7], но в их основе лежат те же принципы, что и в 2D моделях. При 2D реализации не могут быть адекватно учтены процессы взаимодействия людей друг с другом и с окружением, что в значительной степени снижает реалистичность модели.

Таким образом, наибольшей реалистичностью обладает полная 3D реализация. Именно этот метод моделирования был выбран при создании комплексной системы моделирования эвакуации людей при чрезвычайной ситуации, в частности, при пожаре [8,9]. Для повышения реалистичности моделирования процесса эвакуации были разработаны графы (алгоритмы), описывающие физиологическое и психологическое состояния персонажей. То или иное состояние персонажа будет определять его поведение в процессе моделирования эвакуации. Данная статья посвящена графу (алгоритму), описывающему изменения физиологического состояния участников эвакуации, а также его программной реализации в среде *Unreal Engine*.

**Методы.** Реализация и практическая проверка алгоритма изменения физиологического состояний персонажа осуществлялась в среде программирования *Unreal Engine*. Программирование поведения персонажей в данной среде выполняется с использованием инструмента визуального программирования Blueprint. Использование данного инструмента позволяет реализовать всевозможные действия персонажа при эвакуации (рис. 1).

**Алгоритм изменения физиологического состояния.** В модели предусмотрены пять физиологических состояний каждого персонажа: *Initial state* (исходное состояние), *Intoxication* (отравление), *Injury* (ранение), *Intoxication/injury* (отравление/ранение) и *Death* (смерть). Переходы между состояниями осуществляются в зависимости от парамет-

ров, на которые, в свою очередь, влияют факторы окружающей среды (рис.2).

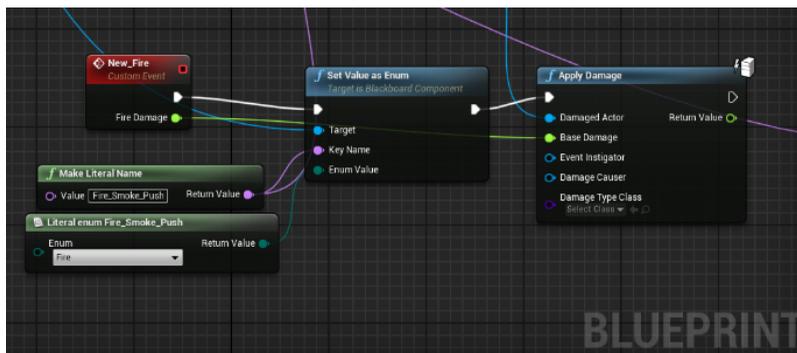


Рис. 1. Часть программной реализации в Blueprint состояния Injury (получение ожога)

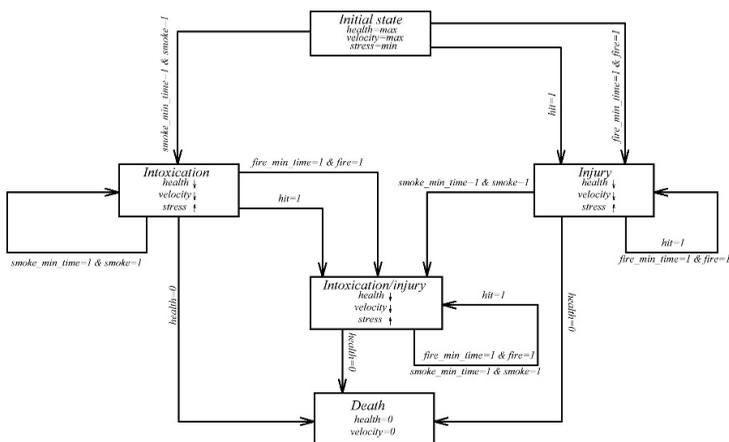


Рис. 2. Алгоритм переходов между физиологическими состояниями

В физиологическом графе учитываются такие параметры как *mass* (масса), *velocity* (скорость), *health* (здоровье) и *stress* (стресс). Значение параметра массы влияет на скорость передвижения персонажа согласно законам механи-

ки и является неизменным. *Velocity* – параметр, определяющий скорость движения персонажа в зависимости от его здоровья (от значения параметра *health*); чем меньше здоровье, тем ниже скорость движения персонажа. *Health* – параметр, определяющий процент работоспособности персонажа. Параметр здоровья понижается при воздействии на персонажа отрицательных факторов окружающей среды, в данном случае таких как огонь или дым. *Stress* – параметр, определяющий уровень стресса персонажа. У персонажа повышается уровень стресса в рамках физиологического графа, если он получает урон (понижение показателя параметра *health*).

В исходном состоянии (*Initial state*) персонаж имеет максимальные значения параметров здоровья и скорости, а также минимальное значение параметра стресса. Переход в состояние *Intoxication* (отравление) происходит при выполнении условий нахождения персонажа в дыму (*smoke=1*) не менее некоторого минимального времени (*smoke\_min\_time=1*). Ранение персонажа происходит при наличии двух условий: внешнего удара (*hit=1*), соприкосновение с огнем (*fire=1*) в течение некоторого минимального времени (*smoke\_min\_fire=1*). При переходе в оба состояния происходит снижение здоровья и повышение уровня стресса персонажа.

Если персонаж находился в состоянии *Intoxication* и подвергается воздействию огня или удара, то он переходит в состояние *Intoxication/injury*. Аналогично осуществляется переход из состояния *Injury* при воздействии на него дыма. В данном случае также происходит снижение уровня здоровья (значения параметра *health*) и повышение стресса (значения параметра *stress*). Переход в состояние *Death* возможен из всех состояний (кроме *Initial state*) при условии равенства нулю параметра *health*.

**Результаты.** Разработанный алгоритм содержит 4 состояния: *Initial state*, *Intoxication*, *Injury*, *Intoxication/injury* и *Death*. Переходы между состояниями осуществляются в зависимости от значений параметров *health* и *stress*. Незменный параметр *mass* влияет на параметр *velocity* согласно законам механики.

Алгоритм был программно реализован в среде *Unreal Engine* (рис. 3).



Рис. 3. Примеры программной реализации физических состояний: а – исходное состояние (*Initial state*); б – состояние отравления (*Intoxication*); в – состояние ранения (*Injury*)

**Заключение.** Таким образом, в работе представлены результаты разработки алгоритма, описывающего физиологические состояния людей в процессе эвакуации. Разработанный алгоритм содержит четыре состояния. Полученный алгоритм лёг в основу комплексной системы 3D моделирования процесса эвакуации людей при чрезвычайных ситуациях, в частности, пожаров. Проведённые тестовые эксперименты по моделированию показывают адекватность выбора состояний. Для детальной проверки разработанного алгоритма и влияния воздействий внешних факто-

ров на физиологические параметры человека в дальнейшей планируется проведение комплексных экспериментов по моделированию процесса эвакуации и экспертный анализ результатов экспериментов.

Научное исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы, направленной на поддержку коммерчески ориентированных научно-технических проектов молодых исследователей «УМНИК».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Helbing D., Farkas I.J., Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic // *Nature*. – 2000. – Vol. 407. – P. 487–490.
2. Running Cells with Decision-Making Mechanism: Intelligence Decision P System for Evacuation Simulation / Yunyun Niu, Yongpeng Zhang, Jieqiong Zhang et al. // *International journal of computers communications & control*. – 2018. – Vol. 13. – P. 865–880.
3. Бекларян А.Л., Акопов А.С. Моделирование поведения толпы на основе интеллектуальной динамики взаимодействующих агентов // *Бизнес-информатика*. – 2015. – № 1 (31). – С. 69–77.
4. Wei Xin-Quan, Wang Jian A mesoscopic evacuation model based on multi-agent and entropy with leading behavior under fire conditions // *Systems Engineering – Theory & Practice*. – 2015. – Vol. 35. – P. 2473–2483.
5. Multiobjective Optimization of Evacuation Routes in Stadium Using Superposed Potential Field Network Based ACO / Jialiang Kou, Shengwu Xiong, Zhixiang Fang et al. // *Hindawi Publishing Corporation Computational Intelligence and Neuroscience*. – 2013. – Vol. 2013 – No. 369016.
6. Study of the indoor evacuation based on the grouping social force model / Ping Du, Yan Li, Hong Liu et al. // *9<sup>th</sup> International Conference on Information Technology in Medicine and Education*. – 2018. – P. 1018–1026.
7. Shi J., Ren A., Chen C. Agent-based evacuation model of large public buildings under fire conditions // *Automation in Construction*. – 2009. – Vol. 18. – P. 338–347.
8. 3D-simulation of emergency evacuation / M.A. Tugarinov, I.D. Shulga, E.A. Yurchenko et al. // *Journal of Physics: Conference Series* – 2020. – Vol. 1680. – No. 012052. – P. 1–8.

9. Development of elements of a 3D emergency evacuation simulation system / M.A. Tugarinov, I.D. Shulga, E.A. Yurchenko et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1680. – No. 012051. – P. 1–8.

## **3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЛЮДЕЙ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

**И.Д. Шульга, Е.А. Юрченко**

*Научный руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук,  
С.Н. Торгаев*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: kattifi@mail.ru

**Аннотация.** В статье представлены результаты разработки и практической реализации алгоритма поведения персонажа для системы 3D-моделирования эвакуации при возникновении пожара в помещении. Данный алгоритм поведения учитывает большое количество физических и психических состояний персонажа. Алгоритм поведения персонажа включает в себя состояния, при которых один персонаж может оказывать помощь окружающим и выполнять действия по ликвидации пожара. Представленные в работе алгоритмы лягут в основу системы 3D-моделирования, обладающей повышенной реалистичностью.

**Ключевые слова:** эвакуация, пожар, граф, физическое состояние, поведение, 3D моделирование, чрезвычайная ситуация

**Введение.** Как правило, последствия чрезвычайных ситуаций сложно предсказать, поскольку они зависят от многих факторов. Одним из важных факторов при эвакуации людей в чрезвычайной ситуации является время, когда люди покидают опасную зону. Одной из причин гибели людей является невозможность или сложность своевременной их эвакуации из помещений. На это может повлиять как структура здания, так и состояние самих людей в момент опасности. К сожалению, на практике даже соблюдение требований пожарной безопасности и рекомендаций к помещению не гарантирует эффективность эвакуации, так как время эвакуации во многом еще зависит и от поведения людей в критической обстановке.

Одним из эффективных методов оценки безопасности помещений является моделирование поведения людей. Одной из основных сложностей при разработке моделей процесса эвакуации является повышение реалистичности моделирования. Данная задача требует учета различных физических параметров персонажей, а также подробного моделирования их психического состояния и поведения.

Существующие на сегодняшний день модели имеют большое количество ограничений, связанных как с применением методов 2D визуализации [1-4], так и с большим количеством упрощений, необходимых для оптимизации расчетов. Существуют работы по использованию 3D визуализации [5-7], но они работают по тому же принципу, что и 2D модели. Использование 2D моделей не позволяет выполнить в полной мере реалистичное моделирование процесса эвакуации, так как такие модели не могут адекватно учитывать процессы взаимодействия людей друг с другом.

**Методы.** В данной работе моделирование процесса эвакуации реализуется в среде Unreal Engine. Программирование поведения персонажей осуществляется с использованием инструмента визуального программирования Blueprint. В инструменте Blueprint все процессы представлены в виде блоков, в которых записан определенный код, выполняющий требуемое действие. Использование данного инструмента позволяет реализовать всевозможные действия персонажа при эвакуации. На рисунке 1 представлен пример реализации движения персонажа с использованием инструмента Blueprint.

В ходе проведения моделирования каждый персонаж имеет определенный набор параметров. Ряд параметров являются постоянными и не изменяются в процессе моделирования. К таким параметрам относятся: масса, возраст, готовность к ЧС, темперамент, лидер.

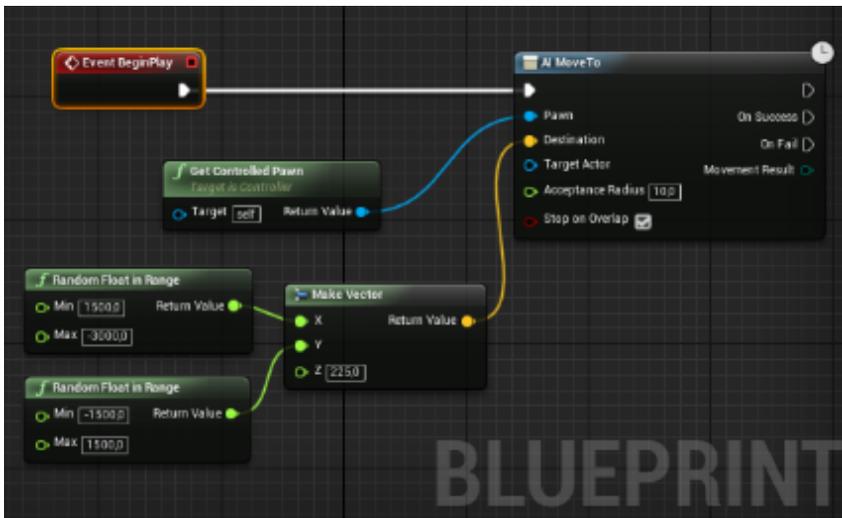


Рис. 1. Алгоритм движения персонажа

К изменяемым в процессе моделирования параметрам относятся: здоровье, скорость, стресс. При моделировании данные параметры и процессы взаимодействия с окружением будут определять физическое состояние каждого персонажа и его поведение в процессе эвакуации. В модели рассматриваются четыре Темперамента: меланхолик, холерик, сангвиник и флегматик. Данный параметр определяет психологическое состояние персонажей и, соответственно, их действия в зависимости от других параметров.

**Результаты.** В разработанном алгоритме поведения персонажей предусмотрено пять состояний, в которых они могут находиться: Calm, Panic, Psychology, Sympathy и Group. У состояния Psychology может быть три подсостояния: Stupor, Aggression и Selfishness, на которые влияет темперамент персонажа. Граф психологического состояния персонажей представлен на рисунке 2. Состоянию Calm соответствует адекватное поведение персонажа. В этом состоянии параметр стресс имеет минимальное значение.

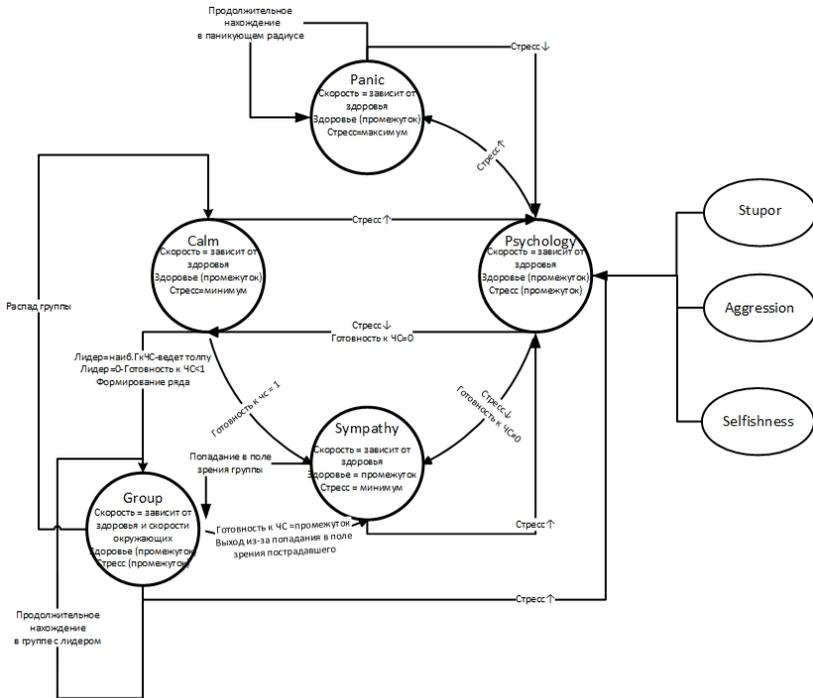


Рис. 2. Граф поведения персонажа

Переход в состояние Psychology осуществляется если значение параметра стресс станет выше минимального. Переход в состояние Sympathy осуществляется если параметр Готовность к ЧС имеет не нулевое значение и в поле зрения данного персонажа попадет персонаж с значением параметра здоровье ниже среднего значения.

Переход в состояние Group осуществляется если в поле зрения персонажа попадает группа с лидером.

Переход в состояние Panic происходит только из состояния Psychology при превышении среднего порога параметра стресс. В состоянии Panic персонаж ведет себя неадекватно и совершает хаотичные движения, нанося урон окружающим. Каждый персонаж в данном состоянии об-

разовывает вокруг себя «паникующий радиус», в котором у других персонажей повышается стресс.

Переход обратно в состояние Psychology осуществляется если значение параметра стресс снизится ниже максимального значения.

**Заключение.** В данной работе представлены результаты разработки графа, описывающего психологическое состояние людей в процессе эвакуации. На основе данного графа было реализовано программное обеспечение в системе Unreal Engine. Результаты разработки легли в основу комплексной системы 3D моделирования процесса эвакуации людей при чрезвычайных ситуациях [8,9]. В данном случае в качестве возможной чрезвычайной ситуации нами рассматривался пожар в здании. Проведенные тестовые эксперименты по моделированию показывают адекватность выбора состояний и набора действий персонажей.

Разработанный графы и программное обеспечение позволит повысить реалистичность процессов моделирования. Учет большого количество состояний и действий персонажей в модели расширит ее возможное применение профильными организациями. Однако следует отметить, что вопросы психологического состояния людей (персонажей в системе 3D моделирования) и их поведения являются достаточно сложными и неоднозначными. В связи с этим в дальнейшем планируется проведение дополнительных исследований адекватности результатов моделирования в том числе с использованием экспертных оценок психологов и спасателей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Helbing D., Farkas I.J., Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic // Nature. – 2000. – Vol. 407. – P. 487–490.
2. Running Cells with Decision-Making Mechanism: Intelligence Decision P System for Evacuation Simulation / Yunyun Niu, Yongpeng Zhang, Jieqiong Zhang et al. // International journal of computers communications & control. – 2018. – Vol. 13. – P. 865–880.

3. Бекларян А.Л., Акопов А.С. Моделирование поведения толпы на основе интеллектуальной динамики взаимодействующих агентов // Бизнес-информатика. – 2015. – № 1 (31). – С. 69–77.
4. Wei Xin-Quan, Wang Jian A mesoscopic evacuation model based on multi-agent and entropy with leading behavior under fire conditions // Systems Engineering – Theory & Practice. – 2015. – Vol. 35. – P. 2473–2483.
5. Multiobjective Optimization of Evacuation Routes in Stadium Using Superposed Potential Field Network Based ACO / Jialiing Kou, Shengwu Xiong, Zhixiang Fang et al. // Hindawi Publishing Corporation Computational Intelligence and Neuroscience. – 2013. – Vol. 2013 – No. 369016.
6. Study of the indoor evacuation based on the grouping social force model / Ping Du, Yan Li, Hong Liu et al. // 9<sup>th</sup> International Conference on Information Technology in Medicine and Education. – 2018. – P. 1018–1026.
7. Shi J., Ren A., Chen C. Agent-based evacuation model of large public buildings under fire conditions // Automation in Construction. – 2009. – Vol. 18. – P. 338–347.
8. 3D-simulation of emergency evacuation / M.A. Tugarinov, I.D. Shulga, E.A. Yurchenko et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1680, No. 012052. – (doi:10.1088/1742-6596/1680/1/012052).
9. Development of elements of a 3D emergency evacuation simulation system / M.A. Tugarinov, I.D. Shulga, E.A. Yurchenko et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1680, No. 012051. – (doi:10.1088/1742-6596/1680/1/012051).

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО- АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОЧВЕННО- КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

**М.С. Южаков, Д.И. Фильченко, А.К. Берзин,  
Д.А. Пидотова**

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, А.В. Бадьин*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия  
E-mail: miha.yuzhakov@gmail.com

**Аннотация.** В докладе приведены концепт и устройство программно-аппаратного комплекса для мониторинга почвенно-климатических параметров окружающей среды, его актуальность для сельского хозяйства и науки в целом. Описаны принцип работы системы и основные технологии, используемые для ее разработки. Приведены результаты тестирования системы в различных условиях и представлены пути дальнейшего развития комплекса.

**Ключевые слова:** цифровое земледелие, микроконтроллер, метеостанция, климат.

**Введение.** В XXI веке повсеместно внедряются достижения науки в сфере сельского хозяйства непосредственно в процесс выращивания [1]. В России подобные процессы отстают от передовых стран и доля современных технологий в сельском хозяйстве крайне мала, а большинство фермеров относятся к подобным технологиям скептически. На это есть две причины, первая – они не представляют, как применить подобные технологии в своем хозяйстве, вторая – существующие решения являются дорогостоящими для среднего крестьянско-фермерского хозяйства России.

Территория России расположена сразу в нескольких климатических поясах: в арктическом, субарктическом,

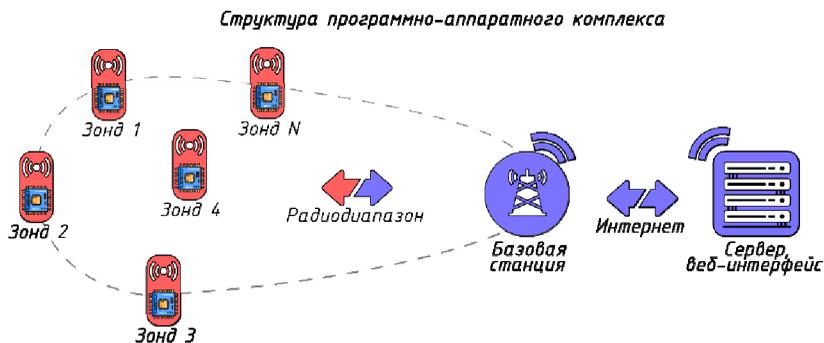
умеренном и в субтропическом. В каждом климате есть сельское или животноводческое хозяйства, для каждого из которых нужен свой подход к цифровизации [2]. Стоит отметить, что количество влаги и удобрения также необходимо варьировать в зависимости от региона.

В настоящее время вектор развития агробизнеса РФ направлен на повышение инновационной активности в сельском хозяйстве за счет внедрения технологий точного и цифрового земледелия [3]. Для решения такой задачи необходимо проектирование сети датчиков, которая будет непрерывно и комплексно измерять, и передавать климатические данные на удаленный сервер. Разработка подобной системы является целью данной работы.

Стоит отметить, что на рынке присутствуют несколько сильных конкурентов – Сокол-М и КаіроBase. Оба конкурента предлагают использовать метеостанции в сельском хозяйстве, однако стоимость их предложений порядка 130 тыс. и 50 тыс. руб. в максимальной комплектации. В свою очередь наша система, согласно экономической и бизнес-моделям будет стоить в диапазоне от 7 тыс. до 10 тыс. руб. Таким образом наше главное преимущество заключается в том, что мы можем обеспечить большую площадь покрытия за те же деньги и соответственно обеспечить в короткие сроки комплексное покрытие датчиками посевных площадей агрохолдинга.

**Концепт программно-аппаратного комплекса.** Для реализации цифрового земледелия предлагается использовать сеть агрометеозондов (далее зонд) для постоянного отслеживания состояния параметров почвы. Такую сеть можно расположить в любой части страны, а полученные данные будут переданы через интернет. Сеть датчиков построена на основе зондов, которые регистрируют и передают данные о состоянии почвы с заданным периодом времени. Зонды измеряют температуру, относительную

влажность и атмосферное давление окружающей среды, а также температуру и влажность почвы на разных глубинах.



*Рис. 1. Структура программно-аппаратного комплекса*

Предлагается развернуть вышеуказанную сеть (рисунок 1) в полях, теплицах, оранжереях, виноградниках и т.д. Сеть будет состоять из зондов, базовой станции с выходом в интернет и сервера.

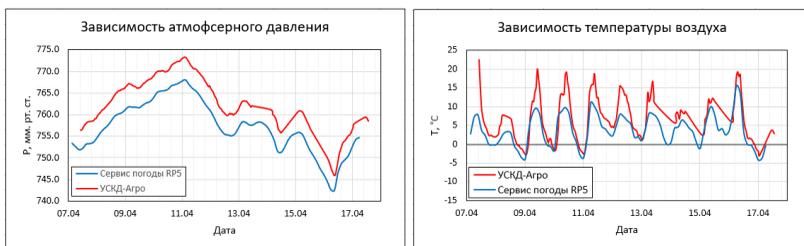
Обмен данными между зондами и базовой станцией будет осуществляться по радиоканалу на частоте 868 МГц с модуляцией LoRa (энергоэффективность, высокая дальность связи). На сервер данные поступают через интернет. Агрозонд (УСКД Агро) разработан на базе микроконтроллера Atmega328P и оборудован датчиками: атмосферного давления, относительной влажности воздуха, температуры почвы, влажности почвы (ёмкостная схема измерения), осадкомером.

Конструкцией агрозонда предусмотрено измерение тока заряда солнечной панели. Зная значение тока заряда, представляется возможным косвенно оценить освещенность. Для создания временных отметок используются часы реального времени. Принцип работы устройства построен на

периодическом переключении устройства из рабочего режима в режим «сна» и обратно. Периодически устройство «просыпается» проводит измерения и отправляет данные на базовую станцию, затем в течении одной секунды устройство ждет команд от базовой станции, если никаких команд управления не приходит, то агрозонд отправляется в режим «Power Down». Из этого режим МК может выйти только по внешнему прерыванию, которое генерируют часы.

**Результаты тестирования программно-аппаратного комплекса.** На данный момент успешно проведен ряд испытаний для прототипов системы. В 2018 году был проведен тест агрозонда на научной станции НИ ТГУ в Кайбасово (зимний период), летом 2019 года был проведен тест в ботаническом саду и в д. Мазалово на полях Томского агрохолдинга, в 2020 году был проведен тест автономности агрозонда в комнатных условиях, время автономной работы 1280 часов. В 2021 году агрозонды с передачей данных были размещены на виноградниках в Тамани (Краснодарский край), в двух оранжереях ботанического сада НИ ТГУ, было проведено тестирование зондов в термокамере РФФ НИ ТГУ.

На рисунке 2 приведены результаты тестирования агрозонда на территории ботанического сада ТГУ снаружи оранжереи. На рисунке приводится сравнение показаний агрозонда с показаниями сервиса погоды RP5. Стоит отметить, что агрозонд находился на солнце, поэтому можно наблюдать ярко выраженные пики на графике температуры. Динамика изменения атмосферного давления с двух источников совпадает, однако показания на всем отрезке отличается на константу. Это связано с тем, что датчики расположены на разной высоте относительно уровня моря. С другой стороны, для целей сельского хозяйства важна именно динамика для прогнозов.



а

б

Рис. 2 Результаты измерения климатических параметров: а) зависимость атмосферного давления; б) зависимость температуры воздуха

**Заключение.** В результате тестирования системы было показано, что агрозонды справляются с задачей сбора данных. Тестовая дальность связи достигла 3,5 км по открытой местности. Время работы агрозонда без солнечной панели составило 1280 часов (53 дня), с средним потреблением 4,3 мА/ч. Далее будет проведена работа над оптимизацией устройств и дальнейшее тестирование.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Supporting and practising digital innovation with advisers in smart farming / M. Ayrea, V.Mc. Collumb, W. Waters et al. // NJAS. – Wageningen Journal of Life Sciences. – 2019. – No. 90–91. – P. 1–12.
2. Социально-экономические карты [Электронный ресурс] // Book of lime : каталог интерактивных книг. – URL: <https://is.gd/sS7r9A> (дата обращения: 18.04.2021).
3. Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017–2025 годы: постановление Правительства РФ от 25 августа 2017 г. № 996 // Собрание законодательства. – 2017. – № 36. – Ст. 5421.

## КЛИЕНТ-СЕРВЕРНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ОБМЕНА ТЕКСТОВЫМИ СООБЩЕНИЯМИ В КВАНТОВОЙ СЕТИ ТОПОЛОГИИ ТОЧКА-ТОЧКА

**Ф.А. Якименко**

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук Д.Е. Каширский*

Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, г. Томск, Россия

E-mail: filipp.yakimenko.98@mail.ru

**Аннотация.** Работа посвящена разработке клиент-серверного приложения для обмена текстовыми сообщениями, которые шифруются с помощью ключей, распределенных системой квантовой криптографии. Программное обеспечение реализовано на модульной платформе NET 5.0 с использованием объектно-ориентированного языка программирования С#. Обмен сообщениями между клиентами и сервером осуществлен посредством фреймворка для удалённого вызова процедур gRPC. Пользовательский интерфейс клиента написан на языке XAML с применением кроссплатформенного фреймворка Avalonia.

**Ключевые слова:** квантовое распределение ключей, безопасность, шифрование, клиент-серверное приложение.

**Введение.** В последние два десятилетия наблюдается ускоренное развитие квантовых сетей [1-4], которые благодаря законам квантовой физики могут обеспечить безусловную безопасность передачи секретной информации, недостижимую методами классической криптографии.

Самая простая в реализации квантовая сеть имеет топологию точка-точка (рис. 1), обмен сообщениями в которой происходит между двумя легитимными пользователями, которым в криптографии принято давать имена Алиса и Боб. Существует и другая, третья сторона, которая стремится «подслушать» передаваемые данные между Алисой и Бобом – это злоумышленник, которого принято называть Ева [5].

Наряду с созданием и улучшением параметров установок квантового распределения ключей (КРК) немаловажным является разработка аппаратного и программного обеспечения, которое использует криптографические ключи, распределенные такими системами, для обмена шифрованными сообщениями.

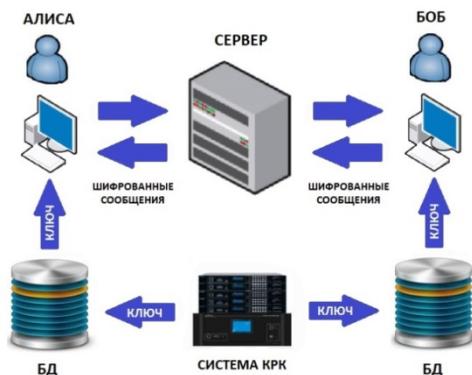


Рис. 1. Схема квантовой сети топологии точка-точка

Цель данной работы заключается в разработке клиент-серверного приложения с шифрованием сообщений с помощью сгенерированных квантовой системой криптографических ключей.

**Методы.** Программное обеспечение реализовано на модульной платформе NET 5.0 с использованием объектно-ориентированного языка программирования C# [6].

Обмен сообщениями между клиентами и сервером осуществлен посредством фреймворка для удалённого вызова процедур gRPC. Сервисы gRPC запускаются на кросс-платформенном веб-сервере Kestrel, который использует протокол HTTP/2.

Архитектура клиентской составляющей приложения построена на паттерне MVVM (Model-View-ViewModel) [6], который позволяет отделить логику приложения от визуальной части. Пользовательский интерфейс клиента напи-

сан на языке XAML с применением кроссплатформенного фреймворка Avalonia.

Для хранения криптографических ключей, поступающих от системы КРК, используется встраиваемая база данных SQLite. Следует отметить, что в данной работе для проверки корректности работы программного обеспечения заполнение базы данных происходило криптографическими ключами, сформированными с помощью стандартного класса Random платформы NET 5.0, представляющего генератор псевдослучайных чисел.

Шифрование сообщений осуществляется посредством шифра Вернама, являющегося разновидностью криптосистемы одноразовых блокнотов и обладающего абсолютной криптографической стойкостью [5]. Алгоритм шифрования основан на побитовом сложении по модулю 2 (XOR) криптографического ключа и двоичной последовательности, соответствующей пересылаемому сообщению. Причем для шифрования каждого сообщения берется новый случайный криптографический ключ, длина которого совпадает с битовой длиной сообщения.

Для имитации прослушивания канала связи и атаки посредника (атака «человек по середине») к серверу кроме клиентов Алисы и Боба подключался еще один клиент злоумышленника.

**Результаты.** Сервер представляет собой консольное приложение. При его старте задается IP-адрес хоста, на котором он запускается, и номер порта.

Окно клиента Алисы, которое аналогично окну клиента Боба, представлено на рисунке 2.

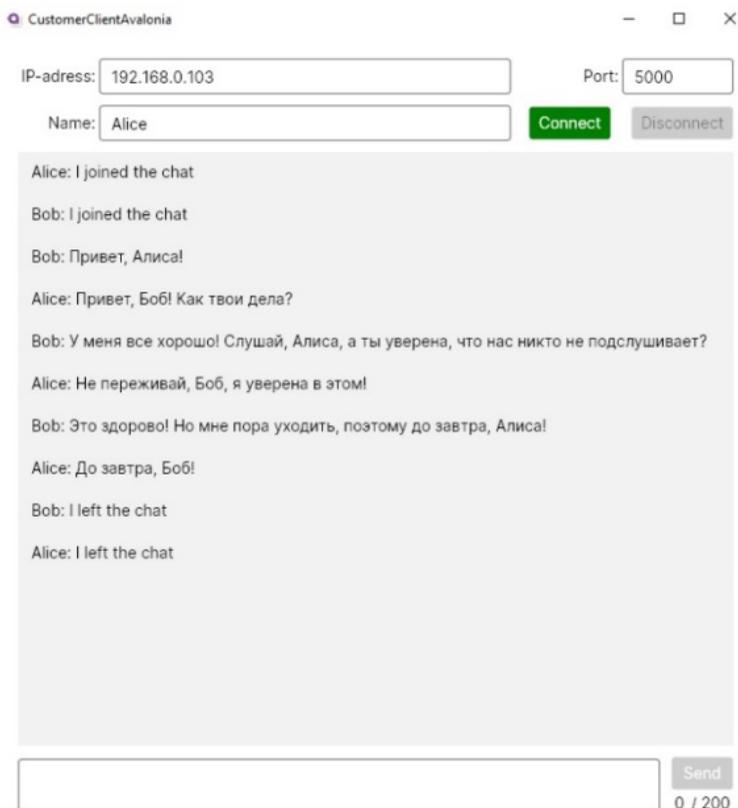


Рис. 2. Окно клиента Алисы

Для подключения к серверу задается его IP-адрес и номер порта в полях «IP-adress» и «Port» соответственно. В поле «Name» указывается имя пользователя (по умолчанию задано «Guest»). Кнопки подключения к серверу и отключения от него соответственно называются «Connect» и «Disconnect». Отправка сообщений происходит по нажатию кнопки «Send» или клавиши клавиатуры «Enter». В поле ввода текстового сообщения стоит ограничение на количество символов, так как длины одного ключа, хранящегося в базе хватает для шифрования 200 символов. Такое ограничение условно и может быть изменено.



от его имени или измененное сообщение Боба, то Алиса сможет выявить такую атаку по искаженности пришедшего сообщения (рис. 3б). Следует отметить, что имя Ева у злоумышленника было сохранено сугубо для наглядности.

**Заключение.** В результате проведенной работы было реализовано клиент-серверное приложение для обмена текстовыми сообщениями, зашифрованными с помощью распределенных системой квантовой криптографии ключей. Проведенные тестовые запуски программного обеспечения с псевдослучайными криптографическими ключами показали, что приложение работает корректно. В дальнейшем планируется объединить разработанное программное обеспечение с системой квантового распределения ключей компании ООО «КуРЭйт» [7].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Elliott C.H. Building the quantum network // *New Journal of Physics*. – 2002. – Vol. 4, No. 46. – P. 1–12.
2. The SECOQC quantum key distribution network in Vienna network / M. Peev, C. Pacher, R. Alléaume et al. // *New Journal of Physics*. – 2009. – Vol. 11. – 075001. – P. 1–37.
3. Sasaki M. Quantum networks: where should we be heading? // *Quantum Science and Technology*. – 2017. – Vol. 2, No. 2. – 020501. – P. 1–8.
4. A trusted node-free eight-user metropolitan quantum communication network / S.K. Joshi, D. Aktas, S. Wengerowsky et al. // *Science Advances*. – 2020. – Vol. 6, No. 36. – eaba0959. – P. 1–8.
5. Шнайер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы и исходный код на Си. – М. : Триумф, 2002. – 816 с.
6. Арораа Г., Чилберто Дж. Паттерны проектирования для C# и платформы .NET Core. – СПб. : Питер, 2021. – 352 с.
7. Modular quantum key distribution setup for research and development applications / V.E. Rodimin, E.O. Kiktenko, V.V. Usova et al. // *Journal of Russian Laser Research*. – 2019. – Vol. 40, No. 3. – P. 221–229.

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аюрзанаев А.Б. ....	190	Лысых П.М. ....	73
Багреев Г.А. ....	10	Ляшенко Д. ....	244
Бердюгин А.И. ....	15	Мануилов В.А. ....	249
Берзин А.К. ....	94, 126, 195, 288	Махманазаров Р.М. ....	79
Бондарева Т.С. ....	244	Медведева Е.М. ....	84
Василенко Р.А. ....	200	Москаленко В.Д. ....	89, 105
Гальцев И.И. ....	205	Пидотова Д.А. ....	94, 126, 195, 288
Гергет К.А. ....	256	Попова А.С. ....	150
Гунько А.А. ....	136	Присекин Р.В. ....	99
Гурский Р.П. ....	15	Рипенко В.С. ....	150
Димов М.А. ....	20	Родимин В.Е. ....	159
Дирко В.В. ....	141	Сапожникова Е.В. ....	155
Долгов Г.А. ....	211	Сергеев А.Г. ....	159
Дорожкин К.В. ....	89, 105	Симонова К.В. ....	105
Духанов А.С. ....	261	Соколов А.С. ....	141
Егоров Д.А. ....	217	Стефаненко Л.И. ....	159
Еремеев А.И. ....	25	Тен В.Я. ....	173
Жабин О.С. ....	200	Тетерина Д.Д. ....	110
Жукжанова А.Т. ....	25	Трофимов М.С. ....	115
Иванов А.Е. ....	223	Туктаров А.М. ....	256
Казанин В.А. ....	30, 62	Фильченко Д.И. ....	94, 126, 195, 288
Ким Э.Е. ....	228	Хомякова К.И. ....	179
Кирсанов Д.Н. ....	36	Черкашин М.А. ....	261
Коломоец С.С. ....	43	Чурикова Т.И. ....	121
Косарев Г.И. ....	48	Шайдуллин А.Р. ....	266
Костерова В.С. ....	53	Шалеев А.В. ....	184
Кравцов И.Д. ....	136	Шематило Т.Н. ....	131
Кривов К.С. ....	234	Шульга И.Д. ....	275, 282
Криницкий А.Д. ....	58	Южаков М.С. ....	94, 126, 195, 288
Кукенов О.И. ....	146	Юрченко Е.А. ....	275, 282
Курочкин Ю.В. ....	159	Якименко Ф.А. ....	293
Ланин Е.В. ....	30, 62		
Лобанов Д.А. ....	239		
Лобова Л.О. ....	68		
Лузянин Д.А. ....	136		

Научное издание

**ВОСЕМНАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
СТУДЕНЧЕСКИХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ  
ИНКУБАТОРОВ**

г. Томск, 5–7 мая 2021 г.

*Опубликовано в авторской редакции*

Издательство “СТТ”

Россия, 634028, г. Томск, проспект Ленина, 15Б–1

Тел.: (3822)421-455

E-mail: [stt@sttonline.com](mailto:stt@sttonline.com)

Scientific & Technical Translations



ИЗДАТЕЛЬСТВО

Усл. печ. лист 17,43. Уч.-изд. л. 9,2.

Гарнитура Times. Формат 60x84/16. Заказ № 669.