

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ КАДРОВ  
ВЫСШЕЙ КВАЛИФИКАЦИИ

СЕКТОР СТУДЕНЧЕСКОЙ НАУКИ

---

**57-я** НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
АСПИРАНТОВ, МАГИСТРАНТОВ И СТУДЕНТОВ

---

**РАДИОТЕХНИКА  
И ЭЛЕКТРОНИКА**

---

Апрель 2021 года

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Минск БГУИР 2021

### **Комиссия конференции «Радиотехника и электроника»:**

- Короткевич А.В. – декан ФРЭ, канд. техн. наук, доцент, председатель комиссии по организации и проведению конференции «Радиотехника и электроника»;
- Мурашкина З.Н. – зам. декана по НИРС ФРЭ, ответственный за подготовку, выпуск программы и электронного сборника тезисов докладов конференции «Радиотехника и электроника»;
- Борисенко В.Е. – д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. каф. МНЭ;
- Листопад Н.И. – д-р техн. наук, профессор, зав. каф. ИРТ;
- Сацук С.М. – канд. техн. наук, доцент, зав. каф. электроники;
- Глецевич П.О. – ассистент каф. электроники;
- Кашкин А.Ю. – ассистент каф. ИРТ;
- Степанов А.А. – канд. техн. наук, доцент каф. МНЭ.

#### **Секция «Информационные радиотехнологии»:**

- Председатель – д-р техн. наук, профессор, зав. каф. ИРТ  
Листопад Н.И.;
- Члены жюри – д-р техн. наук, доцент Козлов С.В.;
- канд. техн. наук, доцент Давыдов И.Г.;
- канд. техн. наук, доцент Козел В.М.;
- Секретарь – ассистент Кашкин А.Ю.

#### **Секция «Микро- и наноэлектроника»:**

- Председатель – д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. каф. МНЭ  
Борисенко В.Е.;
- Члены жюри – д-р физ.-мат. наук, профессор Гапоненко Н.В.;
- д-р физ.-мат. наук, доцент Мигас Д.Б.;
- ст. преподаватель Ловшенко И.Ю.;
- Секретарь – канд. техн. наук Степанов А.А.

#### **Секция «Электроника»:**

- Председатель – канд. техн. наук, доцент, зав. каф. электроники Сацук С.М.;
- Члены жюри – канд. техн. наук, доцент Путилин В.Н.;
- ст. преподаватель Русакович В.Н.;
- Секретарь – старший преподаватель Глецевич П.О.

## ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ РАДИОТЕХНОЛОГИИ»

1. **Повышение эффективности солнечных панелей за счёт использования высоко ориентированных плёнок из плотно упакованных углеродных нанотрубок**  
*Аверкина А.А.*.....8
2. **Методика расчета динамического диапазона интермодуляции третьего порядка n-каскадного тракта**  
*Архипенков Д.В.*.....9
3. **Использование криогенного усилителя в системе пассивного радиовидения**  
*Астровская Д. Н.*.....11
4. **Автоматизированная система выполнения сценариев регулярных учетных процедур SC-BANK NT**  
*Викторович А.В.*.....12
5. **Психологические аспекты педагогического общения как социальная компетенция будущего педагога-программиста**  
*Викторович А.В.*.....14
6. **О некоторых эффектах интермодуляции в выходных усилителях широкодиапазонных УКВ радиостанции**  
*Водчиц А.А.*.....16
7. **Формирование практических профессионально-педагогических умений будущих педагогов-программистов**  
*Ганчук В.Д.*.....23
8. **Психологические аспекты формирования профессиональных компетенций будущего специалиста**  
*Гуща А.В.*.....25
9. **Контроль помехоустойчивости инфокоммуникационного оборудования по цепям питания**  
*Дамашевич А.С.*.....27
10. **Цифровая обработка сигналов с использованием функций Уолша**  
*Дворникова Т.Н., Мисулин Е.А., Снапко Р.Ю., Хомьюк А.А.*.....29
11. **Система диагностики печатных узлов аппаратуры специального назначения**  
*Денис А.А.*.....31

12.	<b>Исследование катушек для систем беспроводного питания</b> <i>Жмойдяк А.П., Янович А.И.</i> .....	32
13.	<b>Оценка эффективности использования радиоканала в автомобильной сигнализации</b> <i>Зайцев И. А.</i> .....	34
14.	<b>Программное средство розничной торговли «Веселый самурай»</b> <i>Зарембо А.И.</i> .....	35
15.	<b>Эффективность длительного накопления отраженного сигнала для РЛС с высоким разрешением по дальности с учетом угловых рысканий самолетов</b> <i>Ле Ван Кыонг.</i> .....	37
16.	<b>Модель и параметры движения типовых радиолокационных целей при длительном накоплении отраженных сигналов</b> <i>Ле Ван Кыонг.</i> .....	45
17.	<b>Алгоритмы длительного накопления отраженного сигнала для РЛС с высоким разрешением по дальности с учетом угловых рысканий самолетов</b> <i>Ле Ван Кыонг.</i> .....	47
18.	<b>Вариант оценки параметров движения радиолокационной цели при длительном когерентном накоплении отраженного сигнала</b> <i>Ле Ван Кыонг.</i> .....	49
19.	<b>Оценка дальности до БЛА на основе измерений доплеровских сдвигов частот в бистатической разностно-дальномерной навигационной системе</b> <i>Легкоступ В.В., Кашкин А.Ю.</i> .....	51
20.	<b>Компьютерные игровые технологии как средство обучения в учреждениях высшего образования</b> <i>Мусский А.И.</i> .....	52
21.	<b>Модульный подход как основа персонализации обучения</b> <i>Новоселов Н.А., Сабилло В.А.</i> .....	54
22.	<b>Образовательный процесс: использование нейролингвистического подхода</b> <i>Петроченко М.С.</i> .....	56
23.	<b>Тестирование аппаратного модуля генератора случайных чисел в составе микроконтроллера семейства STM32</b> <i>Пикуза М.О.</i> .....	58

24. **Состав и основные требования к математической модели – цифровому «двойнику» подсистемы первичной обработки информации радиолокационной станции с синтезированием апертуры спутника дистанционного зондирования Земли**  
*Радионович В.В., Лобан М.А.*.....60
25. **Анализ тенденций развития радиолокационных станций с синтезированием апертуры спутников дистанционного зондирования земли**  
*Лобан М.А., Радионович В.В.*.....66
26. **Перспективные технические решения, используемые в радиолокационных станциях с синтезированием апертуры спутников дистанционного зондирования Земли**  
*Радионович В.В., Лобан М.А.*.....68
27. **Развитие личности будущего педагога-программиста в групповом взаимодействии**  
*Рудько Е.С.*.....71
28. **Программное средство оптимизации грузоперевозок**  
*Сенакосова Н.В.*..... 73
29. **Цифровой приёмник станции радиотехнической разведки**  
*Сенюк В.О.*..... ..75
30. **Автоматизированная система составления расписания учебных занятий для учреждения среднего образования**  
*Стригельская Я.С.*..... ..77
31. **Программный модуль для принятия документов от системы дистанционного банковского обслуживания и работы с ними**  
*Третьяков Д.В.*..... ..78
32. **Обучающее программное средство по платформе для создания приложений FLUTTER**  
*Трубин Е.А.*.....80
33. **Метод прекодирования с учетом состояния канала связи на основе обратной связи для системы MIMO**  
*Фам Хю Ань.*.....82
34. **Программное средство розничной торговли «букет в момент» для компании ООО «ГОЛДЕН ФЛОВЕРС»**  
*Язвинский К.А.*.....84
35. **Обзор стандартов беспроводной связи для интеллектуальных транспортных систем**  
*Олехнович Е.В.*.....87

## СЕКЦИЯ «Микро-и наноэлектроника»

1. **Формирование, структура и оптические свойства текстурированных пленок  $\text{casi}$  на  $\text{si}(111)$**   
*Кропачев О.В., Чернев И.М., Галкин К.Н., Алексеев А. Ю.*.....90
2. **Структура, оптические и фононные свойства эпитаксиальных пленок  $\text{ca}_2\text{si}$  и  $\text{casi}_2$  на кремниевых подложках**  
*Кропачев О.В., Чернев И.М., Галкин К.Н., Алексеев А. Ю.*.....88
3. **Низкотемпературные магнетотранспортные свойства тонкой пленки  $\text{casi}$  на  $\text{si}(100)$**   
*Субботин Е.Ю., Шевлягин А.В., Балаган С.А., Галкин К.Н., Алексеев А.Ю.*.....90
4. **Низкотемпературный термоэлектрический материал на основе кремния со встроенными нанокристаллами антимонида галлия**  
*Субботин Е.Ю., Чусовитин Е.А., Чусовитина С.В., Ховайло В.В., Гутаковский А.К., Накамура Й.*.....92
5. **Стабильность и электронные свойства тонких пленок  $\text{mg}_2\text{si}$**   
*Алексеев А. Ю., Кропачев О.В., Чернев И.М., Галкин К.Н.*.....94
6. **Схемотехнические особенности мультидифференциального операционного усилителя**  
*А.В. Куниц, В.А. Чеховский*.....96
7. **Процесс формирования алмазоподобных углеродных покрытий с применением плазмы высокой плотности**  
*Леонович Н.В., аспирант, Занько А.И., аспирант, Логунов К.Т., студент*.....98
8. **Обработка поверхности биологического объекта в «холодной» плазме при атмосферном давлении**  
*Запорожченко Ю.В., аспирант, Аксючиц А.В., аспирант*.....101
9. **Влияние ориентации и морфологии на решеточную теплопроводность  $\text{si}/\text{ge}$  нанощнуров сегментного типа**  
*Холяво И.И., Хомец А.Л., Сафронов И.В.*.....103
10. **Влияние ориентации свободной поверхности в слоистых  $\text{si}/\text{ge}$  пленках на поперечную решеточную теплопроводность**  
*Хомец А.Л., Холяво И.И., Сафронов И.В.*.....105

11. **Синтез графена методом химического осаждения из газовой фазы на текстурированном медном катализаторе с ориентацией <001> и <011>**  
*Дронина Е.А.* .....107
12. **Синтез графена методом химического осаждения из газовой фазы на текстурированном медном катализаторе с ориентацией <001> и <011>**  
*Дронина Е.А.* .....109
13. **The influence of region sizes on the current-voltage characteristics of graphene-based four-barrier resonant tunneling structures**  
*Polyakov I.S., master student gr.046801* .....113
14. **Моделирование картин дифракции быстрых электронов 2d структур**  
*Богомазов Н.С, студент гр.740301*.....116
15. **Дисперсные эффекты в системе «металл – жидкость – металл»**  
*Лещинская А.В., студент гр. 740301*.....120
16. **Плазмохимическое осаждение оксида кремния при атмосферном давлении**  
*Занько А.И. аспирант 3-го курса, Леонович Н.В. аспирант 1-го курса*.....125
17. **Оценка профиля выработки мишени магнетронной распылительной системы методом монте-карло**  
*Шекелевский В.В., Бездников М.С.*.....126
18. **Моделирование картин дифракции быстрых электронов 2d структур**  
*Богомазов Н.С., студент гр.740301*.....128
19. **Формирование массивов нанопроводов переменной морфологии**  
*Касаткин М. В., Федосенко В. С.* .....131
20. **Обработка поверхности полиамида и поликарбоната в плазме атмосферного давления**  
*Деревянко Э.Г., студент, Аксючиц А. В., аспирант, Запорожченко Ю. В., аспирант.* .....133

21. **Тепловые детекторы болометрического типа**  
*Садченко В.В., Чан В.Ч.* .....136
22. **Экспериментальные исследования параметров операционного усилителя оаmp2**  
*Галкин Я.Д., Чеховский В.А.*.....138
23. **Условия возникновения поверхностных плазмон-поляритонных волн в гетероструктуре «графен/sio<sub>2</sub>»**  
*Гвоздовский Д.Ч.* .....140
24. **Технология формирования гидрофобного покрытия на стекле**  
*Полуйко А.М., студент гр.743201, Жидкина Н.В., магистрант*  
.....143
25. **Исследование параметров разрядной системы генерации нетермической неравновесной плазмы при атмосферном давлении**  
*Аксюциц А.В., аспирант, Запорожченко Ю.В., аспирант, Логунов К.Т., студент.*.....145
26. **Исследование формирования неупорядоченной пористой структуры анодных пленок на начальной стадии анодирования алюминия**  
*Лушпа Н.В.* .....147
27. **Оптимизация режима зарядки li-ion аккумуляторных батарей методами машинного обучения**  
*Хиневич А.С.*.....159

## **СЕКЦИЯ «Электроника»**

1. **Мобильная система детектирования и распознавания объектов в режиме реального времени**  
*Степанов Н.В., студент гр.744101*.....151
2. **Блок питания резервный**  
*Кундельский Р.В., студент гр.744101*.....152
3. **Автоматизированная система полива растений**  
*Левина М.О., студентка гр.744101*.....153

## СЕКЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ РАДИОТЕХНОЛОГИИ»

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ ЗА СЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПЛЁНОК ИЗ ПЛОТНО УПАКОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Аверкина А.А., студентка гр.741301

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Романович А.Г. – канд. техн. наук, доцент

С приходом понимания, что человеку необходимы возобновляемые источники энергии, острым вопросом стало эффективное использование солнечных панелей. Солнечная энергия считается одним из наиболее перспективных альтернативных источников электроэнергии. Экономическую целесообразность применения таких систем определяет коэффициент полезного действия солнечных батарей. Однако эффективность преобразования солнечного света в электроэнергию составляет в среднем всего 15 - 20 %.

Большая часть энергии падающих на панель солнечных лучей расходуется лишь на её нагрев. В ходе исследований был выявлен способ преобразования вырабатываемого впустую тепла в электроэнергию. Способ заключается в использовании плёнок ориентированных одностенных углеродных нанотрубок [1].

Такая плёнка представляет собой канал, который отводит среднее инфракрасное излучение (поглощает отходящее тепло) и превращает его в фотоны в узкой полосе частот, которые затем могут быть преобразованы в электричество. Поскольку электроны в нанотрубках могут перемещаться только в одном направлении, ориентированные пленки являются металлическими в этом направлении, а изолируют в перпендикулярном направлении. Этот эффект назван гиперболической дисперсией: тепловые фотоны могут падать на пленку с любого направления, но могут уйти только через одно.

Изобретение плёнок с такими свойствами стало возможным благодаря открытию учёными университета Райса в 2016 году простого метода создания высоко ориентированных плёнок размером с пластину из плотно упакованных нанотрубок [2].

Изображение (см. рисунок 1), полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа, показывает структуры субмикронных полостей пленки ориентированных углеродных нанотрубок. Полости улавливают тепловые фотоны и сужают их полосу пропускания, превращая их в свет, который затем может быть переработан в электричество.

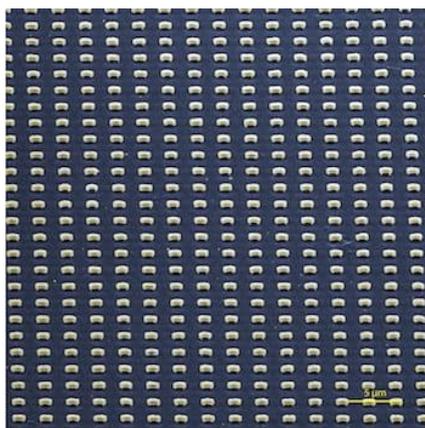


Рисунок 1 – Структура субмикронных полостей плёнки из ориентированных углеродных нанотрубок

Добавление плёнок к стандартным солнечным элементам может значительно повысить их КПД по сравнению с текущим значением. Если сжимать всю ненужную тепловую энергию в небольшой спектральной области, можно очень эффективно превратить ее в электричество. Теоретически возможно достичь значения эффективности 80 %.

#### Список использованных источников:

1. Carbon nanotube films created at Rice University enable method to recycle waste heat / M. Williams // Rice University, posted 12 July 2019.
2. Rice University researchers discover way to make highly aligned, wafer-scale films / M. Williams // Rice University, posted 4 April 2016.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ИНТЕРМОДУЛЯЦИИ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА N-КАСКАДНОГО ТРАКТА

Архипенков Д.В.<sup>1</sup>, аспирант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Забеньков И.И. – профессор, д.т.н.

**Аннотация.** Показана физическая сущность образования интермодуляционных искажений. На основе полученных результатов представлена методика расчета физически обоснованного значения мощности интермодуляционных продуктов на выходе каскада/каскадов.

**Ключевые слова.** Динамический диапазон, интермодуляционные искажение.

Интермодуляционные искажения – это нелинейные искажения, создаваемые усилительно-преобразовательными модулями. В частотном спектре двухтонального сигнала с интермодуляционными искажениями содержатся комбинационные составляющие с частотами, являющимися суммой и разностью основных и гармонических частот входных сигналов. Предельная выходная мощность интермодуляционных ОИПЗ искажений в зарубежной литературе определяется точкой пересечения третьего порядка и рассчитывается по формуле (1) [1,2]

$$OIP3 = G_{\Sigma p} + ИПЗ = \sum_{n=1}^N G_{pn} + \frac{1}{\frac{1}{ИПЗ_1} + \frac{G_{p1}}{ИПЗ_2} + \frac{G_{p1} \cdot G_{p2}}{ИПЗ_3} + \dots + \frac{G_{p1} \cdot G_{p2} \cdot \dots \cdot G_{pn-1}}{ИПЗ_n}}, \quad (1)$$

где  $G_{\Sigma p}$  – суммарный коэффициент передачи радиоприемного устройства;  $G_{pn}$  – коэффициент передачи  $n$ -го каскада радиоприемного тракта;  $ИПЗ_n$  – входные точки пересечения интермодуляции третьего порядка  $n$ -го каскада.

Вывод второй части формулы для расчета ИПЗ не представлен в известных литературных источниках, а формула эта часто используемая. Однако она носит чисто формальный характер и для её определения необходимо использовать графическую интерполяцию параметров ИПЗ по экспериментально измеренным данным в режиме «слабого сигнала [2] и её справедливость вызывает сомнения. Поэтому целью данной статьи является представление физически понятной методики определения данной точки и расчета реального динамического диапазона по интермодуляционным искажениям третьего порядка.

Рассмотрим нелинейные эффекты для двух последовательно соединенных четырехполюсников вида интермодуляции третьего порядка с частотами  $2f_{П1} \pm f_{П2} = f_C$ , где  $f_{П1}, f_{П2}, f_C$  – частотные составляющие мощности входного сигнала  $P_{ВХ}$ . Применим принцип декомпозиции данных четырехполюсников, при котором каждый из них разделим на два параллельных каскада, каждый из которых интерпретирует прохождение линейной и нелинейной составляющей сигнала. В результате в полной мощности сигнала второго каскада (рис.1) кроме линейной передачи мощности и двух помеховых составляющих появляется еще две составляющие мощности интермодуляции  $P_{ВЫХ3} = P_{ВЫХ1} + P_{ВЫХ2}$ , где  $P_{ВЫХ1}$  – суммарная мощность интермодуляционных продуктов на выходе двух каскадов.

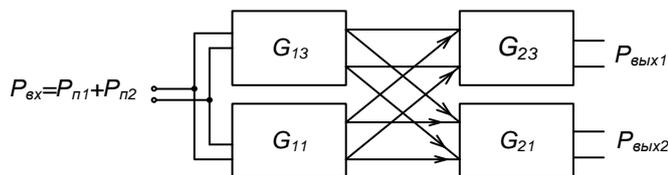


Рисунок 1 – Декомпозиция двух нелинейных четырехполюсников

При некогерентном сложении нелинейных составляющих третьего порядка выходной мощности результат рис.1 можно записать как

$$P_{НЕЛИН.3} = (P_{ВХ3} \cdot G_{11})^3 \cdot G_{23} + P_{ВХ}^3 \cdot G_{13} \cdot G_{21}, \quad (2)$$

Используя справочные данные для микросхем усилителей или смесителей на величины  $G_1$ ,  $ИПЗ(OIP3)$  можно описать графики, как представлено на рисунке 2.

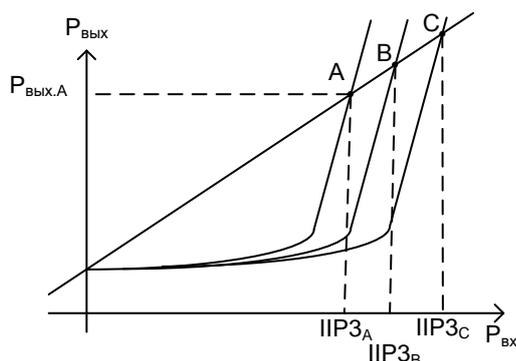


Рисунок 2 – Графики описывающие  $ИПЗ(OIP3)$  для нелинейных микросхем

Общее уравнение для кривых на рисунке 2 можно записать как

$$P_{кв.вых} = G_1 \cdot P_{вх}^3 / (ИПЗ)^2 \quad (3)$$

Для примера рассмотрим тракт состоящий из двух усилительно-преобразовательных модулей со следующими параметрами  $G_1, G_2$  – коэффициенты передачи мощности первого и второго каскадов (справочные данные);  $OIP3_1, OIP3_2$  – выходные точки пересечения третьего порядка первого и второго каскадов преселектора;  $PIM3_1, PIM3_2$  – собственные(текущие) значения мощности интермодуляционных продуктов на выходе первого и второго каскадов преселектора (справочные данные).

Рассматривая показанную выше физическую сущность образования интермодуляционных искажений можем априори отметить что:

$$PIM3_1 \leq OIP3_1, \quad (4)$$

$$PIM3_1 \cdot G_2 + PIM3_2 \leq OIP3_2 \quad \text{или} \quad (5)$$

$$PIM3_1 \cdot G_2 + PIM3_2 \leq ИПЗ_2 \cdot G_2. \quad (6)$$

Подставим в формулу (6) формулу (3) и выразим  $P_{вх}$  при максимальном его значении

$$P_{вх} = \sqrt[3]{\frac{ИПЗ_2}{\frac{G_1}{ИПЗ_2^2} + \frac{G_1^3}{ИПЗ_1^3}}}. \quad (7)$$

Тогда ДД  $ИПЗ$

$$DD_{ИПЗ} = \frac{2}{3} (P_{вх,MAX} - P_p) [dBm], \quad (8)$$

где  $P_p$  – реальная чувствительность радиоприемного устройства.

Обычно  $ИПЗ$  больше  $CP1$  (точку компрессии) на 6-15 дБ, а при работе устройства амплитуда выходного сигнала не превышает точку компрессии, то целесообразно использовать место  $OIP3$  конечного каскада точку компрессии конечного каскада.

Таким образом достоинством предложенного метода является возможность расчета реальной величины динамического диапазона многокаскадного преселектора, используя справочные данные микросхем или других усилительно-преобразовательных элементов.

**Список использованных источников:**

1. Онищук А.Г., Забеньков И.И., Амелин А.М. Радиоприемные устройства. 2-е издание. Минск: Новое знание; 2007.
2. Designer's Handbook RF Micro Devices Inc., 1999 – P.650.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИОГЕННОГО УСИЛИТЕЛЯ В СИСТЕМЕ ПАССИВНОГО РАДИОВИДЕНИЯ

Астровская Д. Н., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Забеньков И. И. – доктор техн. наук, профессор

**Аннотация.** В связи с малой интенсивностью собственного излучения, на основании которого функционирует система пассивного радиовидения, возникает необходимость использования в приемном тракте системы криогенного усилителя. Криогенный усилитель обладает низким уровнем собственных шумов за счет использования криогенных условий.

**Ключевые слова.** Радиовидения, криогенный усилитель, малозадающий усилитель, криокулер, пульсационные трубы.

Системы пассивного радиовидения регистрируют собственные радиотепловые излучения от наблюдаемого объекта. Интенсивность собственного излучения обладает довольно малым значением. В связи с этим, усилители приемного тракта системы пассивного радиовидения должны обладать малыми собственными шумами. Исходя из вышеперечисленных причин, в качестве усилителя в системе пассивного радиовидения целесообразно использовать криогенный усилитель.

Криогенные усилители представляют собой сверхмалозадающие усилители, уровень шумов в которых снижается за счет использования криогенных (низкотемпературных) условий. Под криогенными температурами условно понимают температуры, лежащие ниже точки кипения жидкого воздуха - 80 К (-193,15 °С). Для достижения таких температур используются криокулеры. Соответственно, криогенный усилитель в системе пассивного радиовидения представляет собой совокупность сверхмалозадающего усилителя и криокулера.

Криокулер содержит следующие функциональные узлы: теплообменник, компрессор и регенератор. Одним из подтипов криокулеров являются криокулеры замкнутого цикла. Преимуществом такого типа кулером является отсутствие возвратно-поступательного регенератора в холодной головке. Это приводит к тому, что такие структуры криокулеров обладают минимальными вибрациями и малыми акустическими шумами. Структурная схема криокулера на пульсационных трубах представлена на рисунке 1 [1].

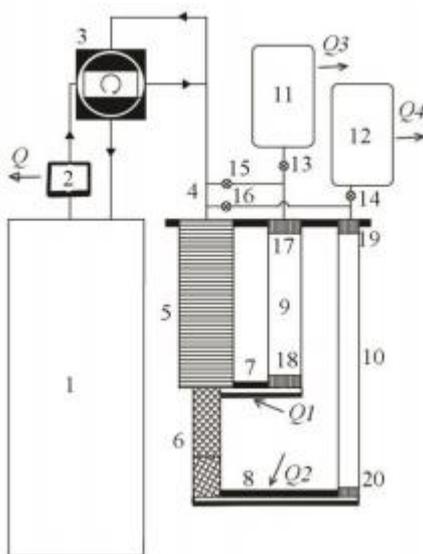


Рисунок 1 – Структурная схема криокулера на пульсационных трубах. (1 – компрессор; 2 – теплообменник; 3 – роторный вентиль; 4 – канал; 5,6 – регенератор; 7,8 – теплообменник; 9,10 – пульсационные трубы; 11,12 – буферные объемы; 13,14 – сопротивления потоку диафрагменного типа; 15,16 – байпасные вентили; 17,18,19,20 – выравниватели потока газа.)

Особенности работы криокулера на пульсационных трубах таковы, что регулировка температуры холодной головки осуществляется посредством изменения тепловой нагрузки. Цикл работы криокулера начинается с откачки гелия из регенератора. При этом гелий расширяется в трубах, охлаждается и проходит через теплообменники, охлаждая их. Поток гелия из буферного объема поступает в трубы при температуре окружающей среды. Следующим этапом является закачка гелия в регенератор. При этом гелий высокого давления проходит через регенератор, охлаждается в нем за счёт холодильного эффекта предыдущих циклов, далее проходит в трубы

через теплообменники. Газ в трубах сжимается, возникает градиент температуры: в верхней части труб гелий нагревается выше температуры окружающей среды. Сопротивление диафрагм подобрано таким образом, чтобы скорость изменения потока газа из буферного объема отставала от скорости изменения давления в пульсационной трубе, следовательно по окончании сжатия появляется поток горячего газа в буферный объем, где газ охлаждается до температуры окружающей среды. Далее цикл повторяется.

Использование жидкого гелия обусловлено тем, что он потенциально с запасом перекрывает требования по уровню температуры охлаждения (криостатирования). Для сравнения, жидкий азот относительно дешев и доступен, однако даже при откачке паров не в состоянии обеспечить охлаждение ниже температуры тройной точки азота, или 65 К, что явно недостаточно для достижения предельных параметров транзисторных малошумящих усилителей. Жидкий водород, способный обеспечить нужный уровень температуры криостатирования, представляет собой довольно взрывоопасный газ и требует особых условий эксплуатации, поэтому также является неподходящим вариантом для охлаждения криогенных малошумящих усилителей [2].

**Список использованных источников:**

1. Черников, Ю.Н. *Разработка криостатов для ядерно-физических исследований* : диссертация / А.Н. Черников–Дубна. : Объединенный институт ядерных исследований, 2018. – 136 с.
2. Вдовин, В.Ф., Грачев, В.Г. *Криогенный малошумящий усилитель для радиоастрономических наблюдений и систем дальней космической связи на сантиметровых волнах* : публикация / В.Ф. Вдовин, В. Г. Грачев –: *Астрофизический бюллетень*, 2016. – 278 с.

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВЫПОЛНЕНИЯ СЦЕНАРИЕВ РЕГУЛЯРНЫХ УЧЕТНЫХ ПРОЦЕДУР SC-BANK NT**

*Викторович А.В., студентка гр.844691*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Славинская О.В. – канд. пед. наук, доцент*

**Аннотация.** В системе банковского дела необходимо с определенным интервалом выполнять установленные процедуры: обработка большого объема информации по определенному алгоритму и выдача отчета по окончании работы; формирование итоговых выписок; обработка или исполнение документов по расписанию, установленному в зависимости от работы банка. Данная статья описывает работу автоматизированной системы выполнения сценариев регулярных учетных процедур SCBANK NT, выполненную нами.

**Ключевые слова.** Казначейство, республиканский бюджет, местный бюджет, казначей, ликвидность, финансовый рынок, депозитарная деятельность, депозитарий, спецдепозитарий, депонент, депозитарный договор, бухгалтерский документ, пачка, сценарий, задача, журнал, формула, интервал.

Органы государственного казначейства представляют собой единую централизованную систему, созданную по территориальному принципу, и входящую в состав Министерства финансов Республики Беларусь (Минфин), и включают в себя Главное государственное казначейство Министерства финансов и управления государственного казначейства главных управлений Министерства финансов по областям и городу Минску, их отделы (секторы) в городах и районах.

Управление денежными средствами республиканского бюджета, бюджетов государственных внебюджетных фондов и иными средствами, находящимися на счетах, открытых Минфину в Национальном банке Республики Беларусь, осуществляется Министерством финансов.

Управление денежными средствами местных бюджетов, находящимися на счетах, открытых территориальным органам Минфин, осуществляется местными финансовыми органами, исполнительными и распорядительными органами первичного территориального уровня. [1]

Казначейство — организация казначеев, обслуживающих казну — государственное, учрежденческое или частное хранилище денег. Казначейство организации — ключевое подразделение корпорации, банка или другой финансовой организации. Основной его функцией является обеспечение ликвидности. Под этим подразумевается проведение платежей, привлечение денежных средств при их дефиците или размещение свободных средств на финансовых (денежном, валютном, фондовом и иных) рынках по собственным или клиентским операциям. [2]

Депозитарная деятельность — финансовые услуги, связанные с хранением сертификатов ценных бумаг и/или учётом и переходом прав на ценные бумаги. Профессиональный участник рынка ценных бумаг, осуществляющий депозитарную деятельность, называется депозитарием, либо «спецдепозитарием». Лицо, пользующееся услугами депозитария по хранению ценных бумаг и/или

учёту прав на ценные бумаги, именуется депонентом. Отношения между депонентом и депозитарием регулируются депозитарным договором (договором о счете депо).

Бухгалтерский документ представляет собой письменное свидетельство о фактическом совершении хозяйственной операции или праве на ее совершение. Группировка бухгалтерских документов называется пачкой. [3]

Автоматизированная система выполнения сценариев регулярных учетных процедур SCBANK NT разработана нами для обеспечения возможности программной обработки определенного перечня отчетов или документов по заданному банком расписанию по заказу. Система позволяет производить импорт и зачисление внешних пачек, а также формировать отчеты по расписанию: формирование итоговой выписки для казначейства (местный бюджет); формирование промежуточной выписки для казначейства (местный бюджет); формирование итоговой выписки для казначейства (республиканский бюджет); формирование промежуточной выписки для казначейства (республиканский бюджет); формирование итоговой выписки для депозитария; формирование итоговой выписки для депозитария за месяц.

Программное средство (ПС) разрабатывалось для выполнения процедур интегрированной банковской системы (ИБС) «SC-BANK NT» (рис. 1), так как существующие аналоги не удовлетворяли запрашиваемому банком функционалу и требуемому уровню конфиденциальности данных. ПС должно без ошибок работать с модулями ИБС «SC-BANK NT»: вызывать файлы библиотек, задавать входные параметры для функций, вызывать функции не только на уровне Delphi, а также на уровне базы данных (БД), записывать всю информацию о выполнении сценариев в журнал, который доступен из главного меню ИБС «SC-BANK NT», а также иметь понятный для сотрудников банка интерфейс, чтобы можно было в банке без помощи разработчиков задавать свои расписания. Существующим аналогом с подобными функциями является Windows PowerShell — командная оболочка с языком сценариев, позволяющая менять настройки операционной системы (ОС), управлять службами и процессами, создавать сценарии для упрощения задач администрирования и другие. Windows PowerShell рассчитана больше на использование системными администраторами, чем рядовым кассиром банка. Еще одним аналогом является Планировщик задач в Oracle — элемент ядра системы управления базами данных (СУБД), доступ пользователя к которому предоставляется посредством программной логики и элементов схемы БД. Чтобы создать расписание (сценарий, задачу) или определить необходимые параметры и логику выполнения расписания, необходимо написать небольшую «программу» на языках PL/SQL, Java, C или использовать команды ОС. Так как ИБС «SC-BANK NT» является собственной разработкой компании ООО «Софтклуб» и имеет специфическую реализацию, а существующие аналоги (Windows PowerShell, планировщик заданий в Oracle) не подходили, было решено разработать свой продукт.

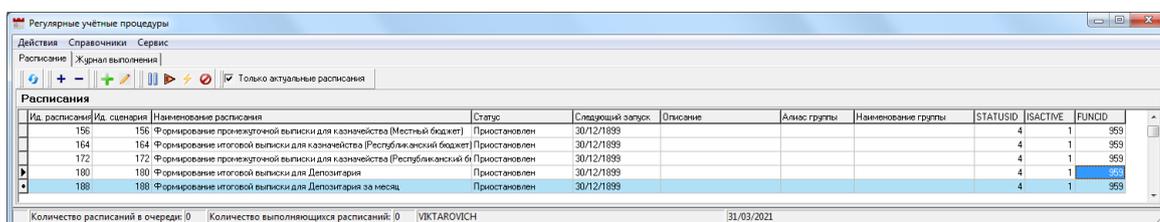


Рисунок 1 – Главное окно программы

ПС разрабатывалось с помощью языков программирования Delphi и PL/SQL, должно работать в тесной связи с модулями ИБС «SC-BANK NT».

Для запуска модуля необходимо в меню «Монитора» (главной формы ИБС «SC-BANK NT») выбрать пункт меню «Менеджмент системы» - «Регулярные учетные процедуры». Сотрудник банка может выполнять различные действия, некоторые из них рассмотрены ниже.

Для создания нового сценария сотрудник должен зайти в меню модуля «Справочники» - «Сценарии». При создании сценария («Действия» - «Создать сценарий») для него указывается имя, описание и признак неактуальности. При необходимости имеющиеся сценарии можно отредактировать (выполнить «Действия» - «Редактировать сценарий»).

Для создания новой задачи нужно зайти в меню модуля «Справочники» - «Задачи». При создании задачи для нее указывается имя, описание, тип задачи (функция Delphi, функция базы данных, отчет или запуск приложения) и признак неактуальности. Чтобы прикрепить задачу к сценарию и задать необходимые входные параметры, сотрудник должен зайти в меню модуля «Справочники» - «Сценарии и Задачи». Для добавления задачи к сценарию выбрать нужный сценарий в верхней таблице. Далее пункт меню «Действия» - «Задача» - «Добавить задачу в сценарий». Затем откроется окно выбора задачи. Чтобы удалить задачу из сценария - пункт меню «Действия» - «Задача» - «Удалить задачу из сценария». Также можно задать порядковый номер задачи в сценарии - пункт меню «Действия» - «Задача» - «Задать порядковый номер задачи».

Порядковый номер определяет порядок, в котором будут выполняться задачи сценария. После добавления задачи к сценарию задаются входные атрибуты. Чтобы создать расписание для полученного сценария нужно зайти на главной форме в пункт меню «Действия» - «Расписание» - «Создать расписание». Для расписания задается название, описание, признак активности расписания, формулы и интервалы. «Формулы» — проверки, которые должны выполняться при вычислении следующего запуска. Например, проверка на то, что это последний рабочий день месяца — расписание будет выполняться в последний рабочий день месяца. «Интервалы» — при создании интервала задается тип интервала (год, месяц, день и так далее), начало выполнения, конец выполнения и период повторения (период повторения задается в той же величине, что и тип интервала).

Разработанное ПС отлично подходит для использования сотрудниками банка: от рядового кассира до системного администратора — так как имеет простой и интуитивно-понятный интерфейс, а также полностью удовлетворяет всем требуемым запросам для работы с ИБС «SC-BANK NT».

**Список использованных источников:**

1. Кодекс Республики Беларусь об образовании от 25.10.2000 № 441-3 (с изм. и доп.) // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2000. – № 2/219.
2. Свободная энциклопедия «Википедия» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org>. – Дата доступа : 31.03.2021.
3. BUHBOOK.NET – финансовый ежедневник [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://buhbook.net>. – Дата доступа : 31.03.2021.

## ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ОБЩЕНИЯ КАК СОЦИАЛЬНАЯ КОМПЕТЕНЦИЯ БУДУЩЕГО ПЕДАГОГА-ПРОГРАММИСТА

*Викторович А.В., студент гр.844691*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Парафиянович Т.А. – канд. пед. наук*

**Аннотация.** В статье анализируется важность знания психологических аспектов педагогического общения в рамках современного образования, важность этого знания не только для учителей, но и для студента, а также место мотивации в процессе обучения.

**Ключевые слова.** Компетентность, компетенция, цели подготовки, объекты профессиональной деятельности, универсальные компетенции, педагог, мотивация к обучению.

Одной из ведущих задач современного образования является задача формирования социальных компетенций обучающегося в образовательном процессе.

Компетентность – способность применять знания и навыки для достижения намеченных результатов (СТБ ИСО 9000-2015). Компетенция – знания, умения, опыт и личностные качества, необходимые для решения теоретических и практических задач. [1]

Специальность 1-08 01 01 «Профессиональное обучение (по направлениям)» в соответствии с ОКРБ 011-2009 относится к профилю образования В «Педагогика. Профессиональное образование», направлению образования 08 «Профессиональное образование». Согласно ОКРБ 011-2009 по специальности предусмотрены направления специальности: направление специальности 1-08 01 01-07 «Профессиональное обучение (информатика)» обеспечивает получение квалификации «Педагог-программист». Общие цели подготовки специалиста: формирование и развитие социально-профессиональной, практико-ориентированной компетентности, позволяющей сочетать универсальные, базовые профессиональные, специализированные компетенции для решения задач в сфере профессиональной и социальной деятельности; формирование профессиональных компетенций для работы в области образования и производства. Объектами профессиональной деятельности специалиста являются: образовательный процесс в учреждениях профессионально-технического, среднего специального, высшего образования, учреждениях системы повышения квалификации и переподготовки кадров, в отделах технического обучения промышленных предприятий; научные исследования в отраслевых и академических научно-исследовательских институтах; производственный процесс на предприятиях отраслей экономики. Специалист, освоивший содержание образовательной программы по специальности 1-08 01 01 «Профессиональное обучения (по направлениям)», должен обладать универсальными, базовыми профессиональными и специализированными компетенциями. [1]

Специалист, освоивший содержание образовательной программы по специальности, должен обладать следующими универсальными компетенциями (УК): владеть культурой мышления, быть способным к восприятию, обобщению и анализу информации, философских, мировоззренческих, социально и лично значимых проблем; владеть высоким уровнем культуры политического мышления и поведения, позволяющего быть активным участником политической жизни общества, понимать сущность, ценности, принципы идеологии белорусского государства; уметь анализировать и оценивать социально-значимые явления, события, процессы, использовать социологическую и экономическую информацию, быть способным к проявлению предпринимательской инициативы; быть способным анализировать основные этапы и закономерности исторического развития белорусского общества в контексте развития европейской цивилизации в целях формирования патриотизма, гражданской и профессионально-личностной позиции; обладать базовыми навыками коммуникации в устной и письменной формах на государственных и иностранном языках для решения задач межличностного и межкультурного взаимодействия; владеть навыками здоровьесбережения; быть готовым поддерживать необходимый уровень физической подготовки, обеспечивающий полноценную профессиональную деятельность. [1]

Компетентность (по И. А. Зимней) – это система компетенций, наличие определенных знаний и необходимого опыта для результативной деятельности в заданной области. Компетентность человека имеет определенную структуру, включающую компоненты, связанные со способностью личности решать необходимые проблемы в различных областях деятельности: самостоятельной познавательной, гражданско-общественной, социально-трудовой, культурно-досуговой [2].

И. А. Зимняя разделяет компетенции социальной сферы на компетенции социального взаимодействия (с обществом, общностью, коллективом, семьей, друзьями, партнерами, конфликты и их погашение, сотрудничество, толерантность, социальная мобильность) и компетенции общения (устное, письменное, диалог, монолог; знание и соблюдение традиций, этикета; кросс-культурное и иноязычное общение; деловая переписка; коммуникативные задачи) [2].

Профессия педагога – очень ответственная профессия. Педагоги формируют знания у обучающихся разных возрастов. Их задача заключается в том, чтобы найти подход к каждому, чтобы обучить. И в каждом возрасте есть свои нюансы в поиске подходов.

Поэтому педагогу необходимо обладать не только педагогическими знаниями, но психологическими, чтобы «найти ключ» к разуму каждого ребенка, подростка, взрослого. Любая область педагогики (дидактика, теория воспитания, частные методики и другие) предполагает психологические знания.

Из личного опыта преподавания на курсах для работников различного рода профессий могу сделать вывод, что с увеличением возраста обучающихся задача мотивации к обучению и поиска подхода к обучающемуся становится не легче. Отвлекающих моментов становится больше и ученикам уже сложно воспринимать информацию в виде традиционных занятий. Поэтому приходится искать новые решения в проведении занятий, готовиться тщательнее к их проведению, прибегать к общеизвестным и всем понятным примерам из жизни. Обычный формат проведения занятий (к примеру, лекций) не дает свой результат, поэтому на занятиях необходимо преподносить теорию в динамичном виде, разбивая материал на части, а в конце каждой части прерываться на выполнение небольших заданий, которые позволяют закрепить материал, только что услышанный. Давать задания на дом становится бессмысленно, так как чаще всего они не выполняются. Это объясняется работой помимо занятий, домашними обязанностями и иными обстоятельствами. Поэтому необходимо в начале каждого занятия устраивать опрос или давать задания, чтобы «освежить» в памяти ранее изученный материал.

Знание законов, по которым протекают психические процессы, формируются умения и навыки, чем характеризуется их динамика и в чем заключается природа мотивов и способностей, имеет огромное значение в решении главных педагогических проблем: повышение эффективности обучения и воспитания, а также содержания образования на всех этапах обучения. [3]

Будущему педагогу необходимы знания психологии, чтобы пробудить в ученике интерес к предмету, что порождает дополнительную мотивацию к изучению предмета. Ученик желает сам получить знания и преодолевать преграды на пути их получения, будет с удовольствием работать сам и самостоятельно, уделяя некоторую часть свободного времени. Если знаний психологии не иметь – очень сложно вызвать бурный интерес к предмету, материал занятий не будет оставаться в голове учеников, вызывать интерес и будет быстро забываться.

Поэтому, подводя итоги, можно сказать, что основной уклон педагогическо-воспитательной деятельности идет на формирование мотивации к обучению, которая включает в себя интерес к изучаемому предмету, тягу к знаниям, желание развиваться и учиться новому, овладевать новыми навыками и умениями и так далее. Мотивация должна различными способами поощряться и поддерживаться педагогом, и в большей части обучения это является условием эффективности и успешности как педагогической работы, так и работы учеников. Помимо всего прочего, большое значение имеет и личность педагога: педагог, который уважает и любит преподаваемую им

дисциплину, вызывает уважение и привлекает внимание учеников, а его личные качества и поведение во время занятий напрямую влияют на то, как ученики относятся к предмету в целом.

**Список использованных источников:**

1. СТБ ISO 9000-2015 (ISO 9000:2015, IDT). Государственный стандарт Республики Беларусь. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. - Взамен СТБ ИСО 9000-2006 ; введ. 01.03.2016. – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2015. - IV, 54 с.
2. Зимняя, И. А., Морозова, Н. А. Современное состояние проблемы концепций воспитания /И. А. Зимняя, Н. А. Морозова. – Ярославль: Современные концепции воспитания, 2015. – С. 171.
3. Парафиянович, Т. А. Контекстно-компетентный подход в воспитании учащихся колледжа / Т.А. Парафиянович // Адукацыя і выхаванне: навукова-тэарэтычны і навукова-метадычны часопіс. – 2017. – №1 (301) – С. 54 – 58.

УДК 621.396.2

## О НЕКОТОРЫХ ЭФФЕКТАХ ИНТЕРМОДУЛЯЦИИ В ВЫХОДНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ УКВ РАДИОСТАНЦИЙ

Водчиц А.А.<sup>1</sup>, аспирант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Козлов С.В. – доктор технических наук

**Аннотация.** В работе приведены практические сведения об интермодуляционных искажениях, возникающих между одновременно работающими в режиме передачи радиостанциями. На примере экспериментально исследуемого радиочастотного усилителя показаны зависимости уровня интермодуляционных искажений от частоты при работе усилителя с обратной связью и без неё а также влияние способа измерения. Выработаны рекомендации по оптимизации схемотехнических решений усилителей мощности УКВ радиостанций.

**Ключевые слова.** интермодуляция, взаимное влияние передатчиков, частотная зависимость, развязка антенн.

Как правило, основное внимание при изучении параметров радиостанций обращается на частотный диапазон, чувствительность в режиме приёма, мощность в режиме передачи и функциональные возможности. При этом радиостанции с одинаковыми (сопоставимыми) параметрами могут показать различную дальность связи при использовании на объекте. Причиной отличий являются параметры внутриобъектовой электромагнитной совместимости радиосредств.

При работе радиостанций в условиях сосредоточения средств связи на объекте нельзя недооценивать параметры электромагнитной совместимости, которые влияют на основные тактические данные – дальность связи. В реальных условиях при работе радиосредства на антенну в режиме передачи, на выходные цепи радиостанции от антенного входа попадают радиосигналы других источников радиоизлучений. При этом, вследствие нелинейных характеристик усилительных элементов (основной источник нелинейности), неизбежно возникают вторичные колебания интермодуляционного типа (пример изображен на рисунке 1). В результате взаимодействия сигналов  $P_0$  и  $P_1$  (полезного и мешающего соответственно) возникает множество новых составляющих, с частотами полезного и мешающего сигналов, отстоящих друг от друга на частоту  $\Delta f$ . [1] И, как итог, в излучаемом антенной спектре, присутствуют новые радиочастотные составляющие – побочные колебания интермодуляционного типа. Данные колебания способны существенно снизить дальность связи других радиостанций, работающих в режиме приёма и находящихся поблизости к передающим радиосредствам на частотах этих колебаний, а также на частотах близких к ним. Наиболее проблемными являются источники излучения, находящиеся в непосредственной близости – такие, как радиостанции того же диапазона, расположенные на одном объекте с упомянутым радиосредством.

Описанная ситуация типична для стационарных и особенно для подвижных объектов обеспечения связи, характеризующихся большим количеством связанного оборудования, расположенного на малой площади самого объекта. Ориентировочные размеры подвижных объектов в подавляющем большинстве случаев не превышают 5х2.5 м. Небольшие размеры объектов заставляют радиостанции узла связи работать на близко расположенные антенны или на одну антенну - с помощью развязывающих устройств - антенных фильтров.

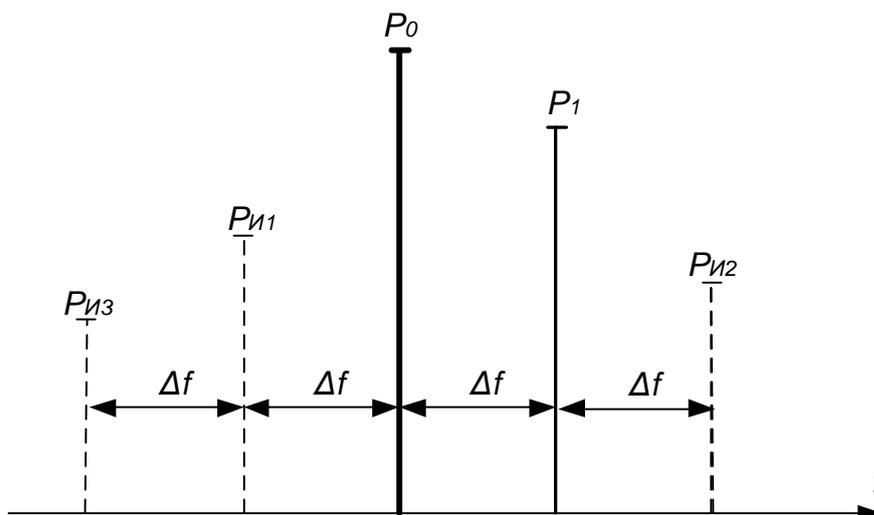


Рисунок 1 - Пример возникающих интермодуляционных искажений ( $P_{И}$ ) при совместной работе радиопередатчиков ( $P_0$  и  $P_1$ ).

Из графика, изображенного на рисунке 2, видно, что значения межантенной развязки при расстоянии между антеннами 1,5 м невелики и достигают минус 15 дБ в нижней части УКВ диапазона [2].

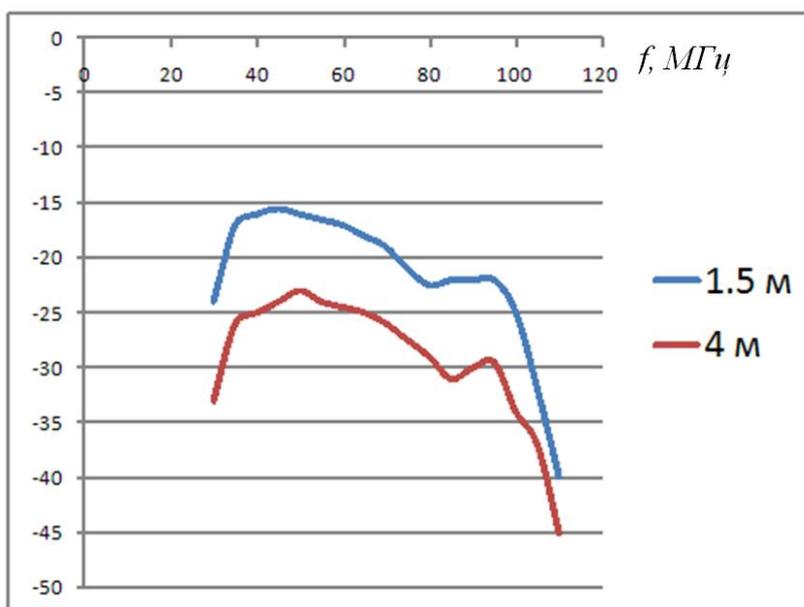


Рисунок 2. Практические данные развязки в диапазоне 30-108 МГц между полноразмерными антеннами при расстоянии между ними 1.5 и 4 м.

Интермодуляционные составляющие, образованные при работе двух расположенных поблизости передатчиков, попадают на входы других радиосредств, находящихся в режиме приема. Данные составляющие могут попадать в полосу пропускания преселектора (1-2 % от частоты настройки). Уровень интермодуляционных искажений, возникающих и попадающих на вход в данном случае, может определять необходимую избирательность приемника по блокированию, и избирательность по побочным каналам приёма в полосе пропускания преселектора радиосредства [4].

Выходной тракт современных программно определяемых радиостанций, вследствие широкого диапазона рабочих частот (от нескольких октав), имеет в своем составе блок переключаемых фильтров низкой частоты (фильтров гармоник). На каждом из фильтров радиостанция работает в диапазоне частот с перекрытием П равным 1,4 – 1,7. Данные фильтры, помимо подавления высших гармонических составляющих, генерируемых в усилителях мощности, препятствуют попаданию к усилителю сигналов соседних радиосредств, работающих на частотах значительно выше его рабочей частоты (в П и более раз). Также в случае генерации интермодуляционного продукта частотой значительно выше рабочей частоты (при частоте мешающей радиостанции значительно ниже полезной) – фильтр блокирует его прохождение в антенну. Таким образом структура выходного

тракта достаточно эффективно борется с появлением в антенне интермодуляционных искажений при отстройке соседнего (мешающего) радиосредства на октаву и далее. Но плотность расположения радиосредств на объекте не позволяет выделить настолько широкие диапазоны работы всем радиостанциям. В широкодиапазонных возимых радиостанциях старого парка для обеспечения возможности работы на небольших частотных отстройках в структурную схему передатчика входил узкополосный механически перестраиваемый полосовой фильтр на выходе усилителя мощности. В современных программно определяемых радиостанциях, имеющих возможность работы в режиме ППРЧ, механическая перестройка по частоте неприемлема вследствие её низкой скорости, поэтому применяется лишь набор переключаемых фильтров низкой частоты.

Таким образом в современных широкодиапазонных программно определяемых радиостанциях особенно важна задача оптимизации выходной части тракта передачи с точки зрения минимизации интермодуляционных искажений с другими передатчиками. Так как выходной усилитель в режиме передачи является основным источником нелинейных эффектов [1], задача его схемотехнической оптимизации и оптимизации режима работы выглядит наиболее приоритетной при работе над минимизацией уровня генерируемых интермодуляционных составляющих. Необходимо проработать вопрос как минимизации искажений, так и способа оценки результатов минимизации.

Классический способ оценки интермодуляционных искажений заключается в подаче на вход усилителя двух гармонических составляющих одинакового уровня с частотами  $F_1$  и  $F_2$  и последующей оценке уровня возникших интермодуляционных составляющих (как правило третьего порядка:  $2F_1-F_2$  и  $2F_2-F_1$ ) [3]. Основной причиной нелинейных искажений принято считать отклонения от линейности амплитудной характеристики усилителя, особенно при работе вблизи точки компрессии (рисунок 3).

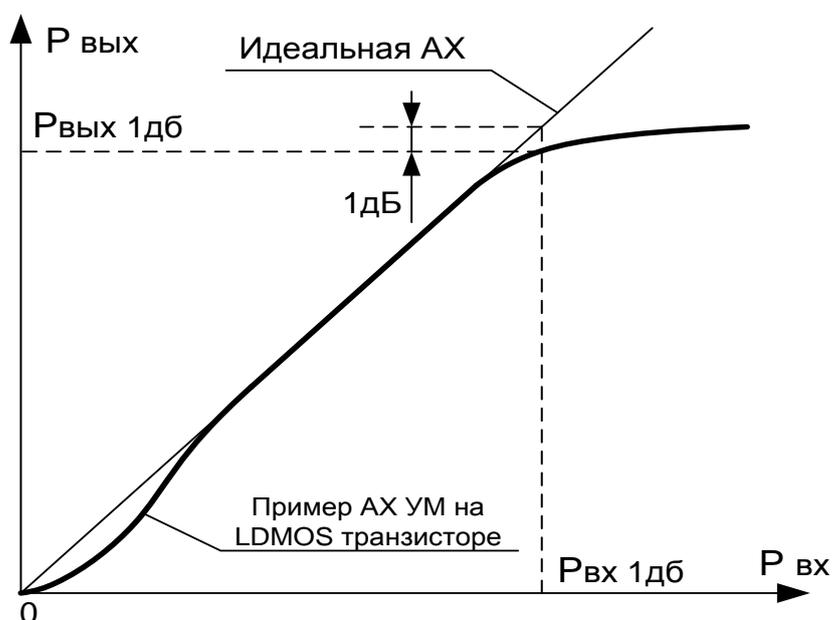


Рисунок 3. Пример амплитудной характеристики усилителя

В абсолютном большинстве случаев целью количественной оценки интермодуляционных искажений усилителя служит обеспечение необходимого качества передаваемых сигналов, имеющих амплитудную огибающую – все виды амплитудной модуляции. Поэтому, при подобных измерениях разнос частот  $F_1$  и  $F_2$  лежит в пределах рабочей полосы модулированного сигнала и составляет, как правило, 1 кГц. Но, как показали экспериментальные исследования, при увеличении разноса частот между передатчиками, уровень генерируемых интермодуляционных составляющих способен в значительной степени изменяться в сторону ухудшения. В экспериментальных исследованиях использовались два варианта оценки уровня возникающих интермодуляционных продуктов – двухтоновый и способ подачи помехи через выход усилителя.

Структурная схема измерительной установки изображена на рисунке 4. На вход испытуемого усилителя УМ подаются сигналы от двух высокочастотных генераторов  $G_1$ ,  $G_2$  через согласованный тройник  $T$ . Усиленный сигнал поступает на согласованную нагрузку в виде последовательного включения двух аттенуаторов АТТ с суммарным коэффициентом передачи минус 50 дБ. Далее сигнал поступает на анализатор спектра  $S$ , с экрана которого снимаются показания уровней составляющих выходного спектра.

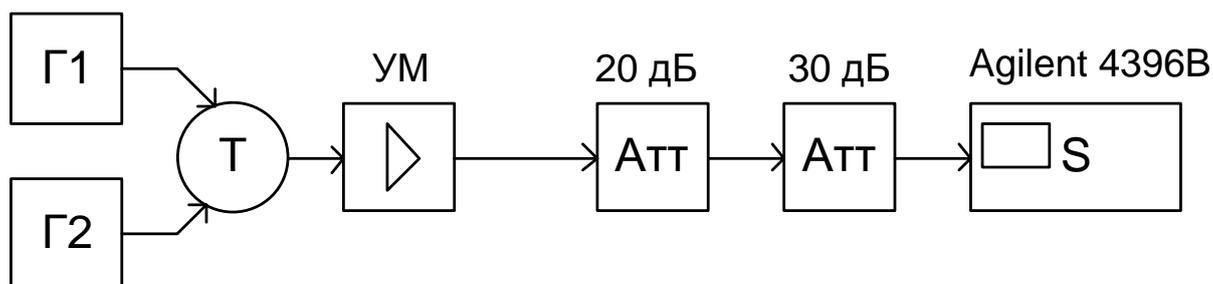


Рисунок 4. Структурная схема измерительного стенда для оценки интермодуляции двухтоновым методом.

Испытуемый усилитель – однотактный на базе LDMOS транзистора BLF571, с параллельной по напряжению отрицательной обратной связью (рисунок 5). Высокочастотные усилители на биполярных транзисторах имеют худшие характеристики по интермодуляции с поступающими на выход помехами, чем усилители на полевых LDMOS транзисторах [1].

Как правило, высокочастотные каскады усиления строятся по схеме с обратной связью (далее ОС). Испытуемый усилитель также содержит цепь ОС (коэффициент передачи цепи ОС – около 0.05). Отрицательная обратная связь повышает линейность частотной и амплитудной характеристики усилительного каскада, тем самым снижает уровень интермодуляционных искажений усилителя. Но, как показали эксперименты, данное улучшение справедливо для искажений, являющихся результатом перемножения составляющих с небольшой взаимной частотной расстройкой. При большой частотной отстройке входных составляющих спектра обратная связь напротив - приводит к увеличению уровня интермодуляционных искажений усилителя. Спектрограммы для указанного случая приведены на рисунке 6.

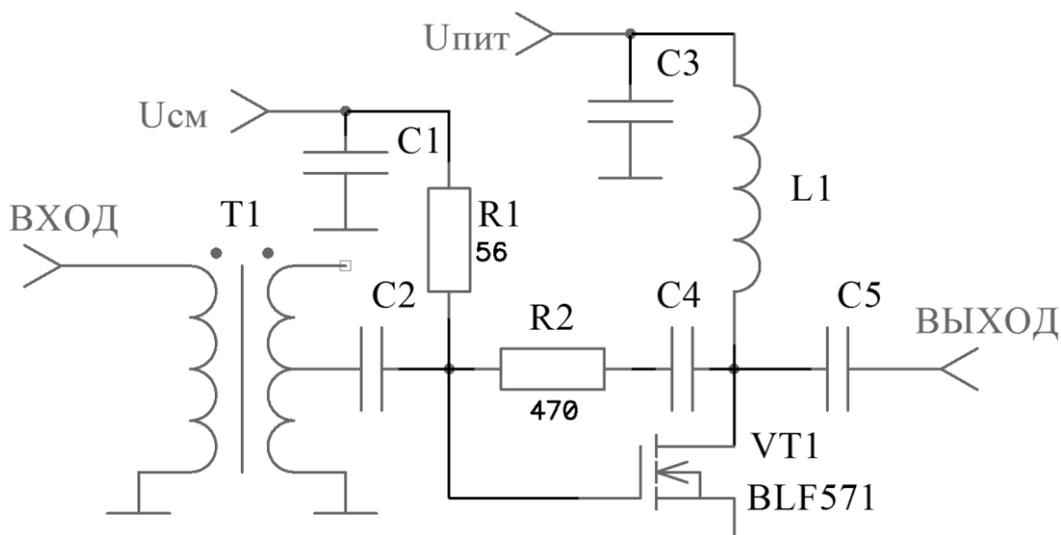


Рисунок 5. Принципиальная схема испытуемого усилителя мощности

На правой спектрограмме видно, что без ОС (разорвана цепь R2, C4) зависимость амплитуды интермодуляционных продуктов от частоты взаимной расстройки генераторов практически отсутствует, а сам интермодуляционный продукт третьего порядка на 35 дБ ниже уровня полезного сигнала. При этом на левой спектрограмме (усилитель с ОС) видна существенная зависимость уровня интермодуляционного продукта при изменении частоты мешающего генератора. К примеру, если при отстройке в 20 кГц уровень продукта перемножения на 45 дБ ниже полезного сигнала, то при взаимной отстройке генераторов в 300 кГц этот уровень принимает значение лишь на 28 дБ ниже. Экспериментальные исследования показывают подобную зависимость как у однотактных, так и у двухтактных усилителей.

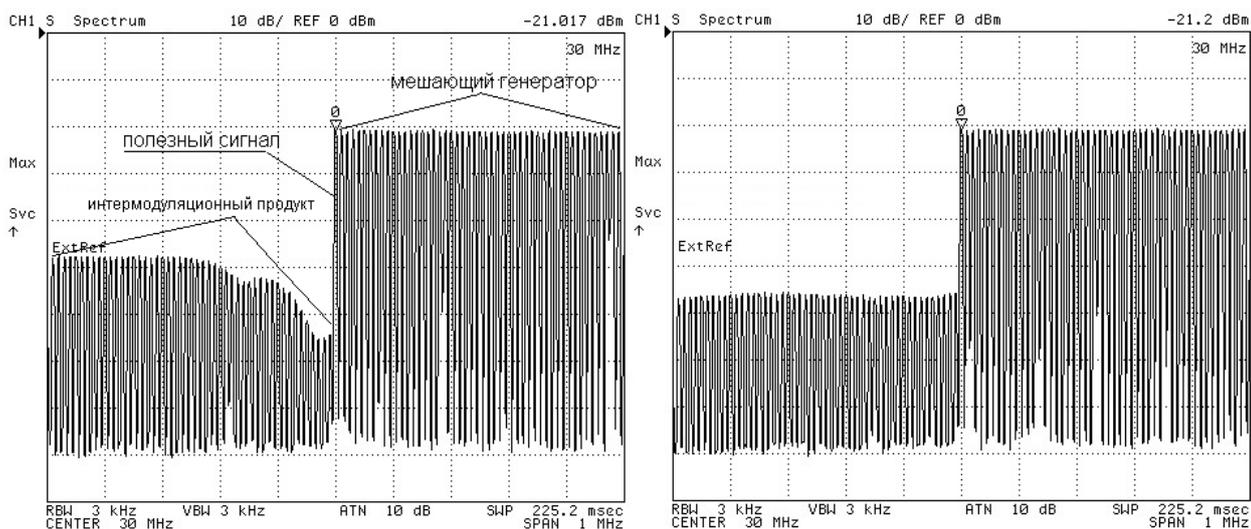


Рисунок 6. Спектр сигнала на выходе усилителя в режиме сохранения максимальных значений при изменении расстройки генераторов с полосой обзора 1 МГц с обратной связью (слева) и без обратной связи (справа).

На рисунке 7 схематически показан характер влияния номиналов блокировочного дросселя L1 цепи питания и разделительного конденсатора обратной связи C4 на амплитудно-частотную зависимость продукта интермодуляции третьего порядка. Частотное положение зоны подъёма огибающей продуктов интермодуляции третьего порядка смещается при изменении номиналов указанных элементов. При помощи оптимизации номиналов блокировочных элементов можно снизить интегральный уровень возникающих в усилителе интермодуляционных искажений. Происходящий процесс будет прокомментирован ниже.

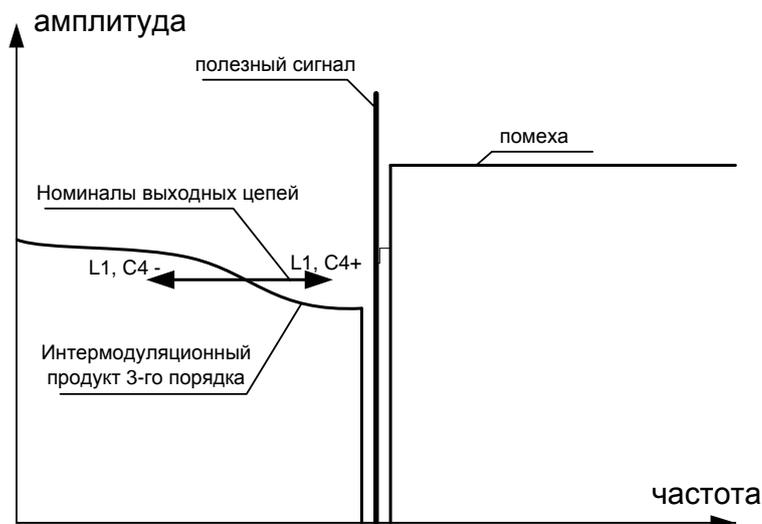


Рисунок 7. Схематичный пример спектрограммы измерения интермодуляционных искажений в широком диапазоне частот

Проведены экспериментальные исследования с тем же усилителем при подаче мешающего воздействия через выходные цепи. Структурная схема измерительной установки, изображенная на рисунке 8. На вход испытуемого усилителя УМ подаётся сигнал от высокочастотного генератора Г1. Усиленный сигнал через проходной ответвитель поступает на согласованную нагрузку в виде аттенюатора АТТ коэффициентом передачи минус 20 дБ (имитация развязки между антеннами 20 дБ). С обратной стороны аттенюатора подаётся «мешающий» сигнал сопоставимой мощности с перестройкой по частоте. В качестве генератора Г2 использовалась УКВ радиостанция. Со стороны ответвителя сигнал поступает на анализатор спектра S, с экрана которого снимаются показания уровней составляющих выходного спектра. Мощность продуктов интермодуляции не зависит от выходной мощности исследуемого усилителя до момента, когда мощности полезного и мешающего сигналов в точке измерения не становятся сравнимыми. При этом, изменяя мощность мешающего сигнала, мощность интермодуляционных продуктов изменяется строго пропорционально [5].

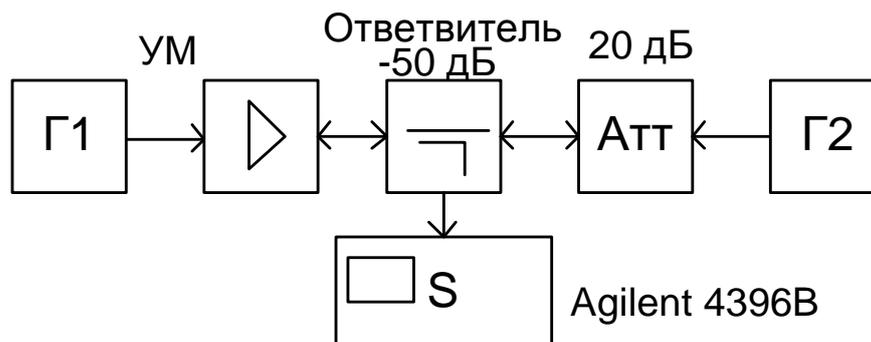


Рисунок 8.. Структурная схема измерительного стенда для оценки интермодуляции методом воздействия помехи через выход

Спектрограммы на рисунке 9 показывают идентичность характера частотной зависимости интермодуляционного продукта с измерениями, проведенными двухтоновым методом (рисунок 6). Зона изменения уровня искажений занимает ту же частотную позицию. Относительный уровень продукта интермодуляции 3-го порядка при двух способах измерения различается, но амплитудно-частотные тенденции сохраняются.

Оценка искажений методом воздействия помехи через выход требует применения мешающей радиостанции, либо усилителя для генерации сигнала необходимой мощности. Это заметно усложняет стенд. С учетом высокой степени корреляции результатов измерений двумя способами, допустимо использование двухтонового способа измерения (рисунок 4) для контроля результатов при оптимизации параметров усилительного тракта в части минимизации интермодуляционных искажений с последующей проверкой полученных результатов методом воздействия помехи через выходные цепи.

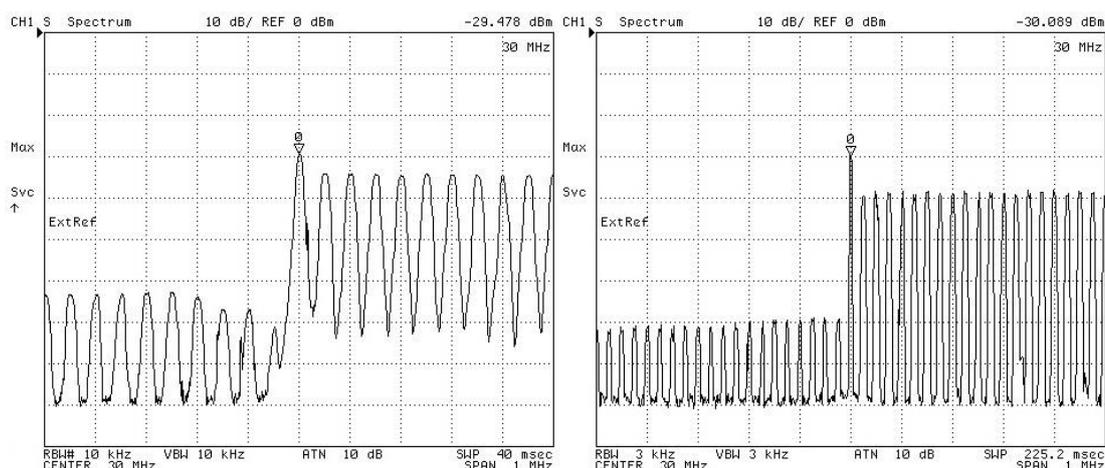


Рисунок 9. Спектрограмма выходной интермодуляции усилителя в режиме сохранения максимальных значений при перестройке генератора Г2 с полосой обзора 1 МГц с ОС (слева) и без ОС (справа).

Зависимость амплитуды интермодуляционных продуктов от частоты расстройки сигналов в схеме с ОС объясняется следующим образом:

- формируются интермодуляционные продукты на нелинейном элементе (транзисторе) - рассмотрим продукты 2-го и 3-го порядка;
- низкочастотный продукт 2-го порядка (в нашем случае  $f_2 - f_1$ ) разностной частоты попадает во входные цепи усилителя (затвор) через цепи ОС и производит амплитудную модуляцию полезного ВЧ сигнала, смещая рабочую точку транзистора с разностной частотой;
- от амплитуды данного продукта 2-го порядка, поступающего на затвор, и зависит итоговый уровень искажений 3-го порядка, так как формируемая таким образом.

Как указано ранее, при подаче мешающего сигнала как на вход усилителя, так и на выход, уровень интермодуляционных искажений с увеличением разницы генераторов по частоте увеличивается. Частотная область, в которой происходит подъем уровня, меняется при изменении частоты среза фильтров высокой частоты, образованных цепью питания и цепью обратной связи каскада усиления. Последний тезис косвенно подтверждается выраженной неравномерностью амплитуды интермодуляционных продуктов при проверке усилителя, в составе стенда проверки которого есть ФНЧ 7-го порядка на выходе – рисунок 10. Следовательно - для оптимизации параметров интермодуляции усилителя с ОС необходимо: минимизировать уровень продукта интермодуляции 2-го порядка, снизить его влияние на входные цепи усилительного элемента через

цепь обратной связи. Данного эффекта, к примеру, можно достигнуть, снизив коэффициент передачи цепи ОС на частотах ниже рабочего диапазона, а также дополняя схему блокировочными цепями для снижения уровня низкочастотного продукта 2-го порядка. Следует также выбирать как можно более узкие диапазоны выходных фильтров гармоник, отдавая предпочтение насколько возможно более узкополосным решениям.

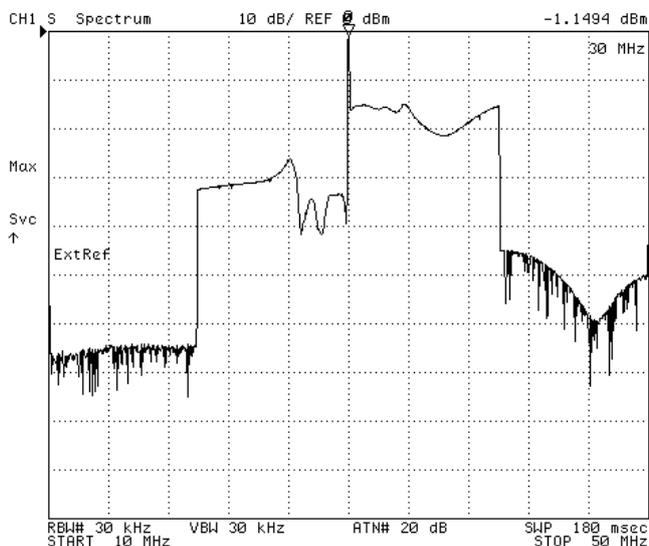


Рисунок 10. Спектр сигнала на выходе двухтактного усилителя на транзисторах BLF574 с ФНЧ в режиме сохранения максимальных значений при перестройке генератора помехи в диапазоне 30-40 МГц. Выходная мощность исследуемого усилителя – 25 Вт, мощность мешающего сигнала – 40 Вт.

С учетом высокой степени корреляции результатов измерений двумя способами - допустимо использование двухтонового способа измерения при оптимизации параметров усилителей в части минимизации интермодуляционных искажений, возникающих при воздействии мешающих сигналов через антенну. Данный способ эффективнее в применении по причине упрощенной схемы.

**Список использованных источников:**

1. Анализ электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / Е.М. Виноградов Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2009. – С. 146-148.
2. Study of the isolation between VHF land mobile radio antennas in close proximity/ Report ITU-R M.2141 2009. . – P. 11-13.
3. Методика измерения IP2 и IP3 двухтонового сигнала / А.Е. Поляков, Л.В. Стрыгин; Труды МФТИ том 4 №2 2012.– С.54-56.
4. Сухопутная подвижная служба. Устройства радиосвязи, работающие в полдосе частот 30 до 1000 МГц. Требования и методы измерений: СТБ 1200-99 \_ введ. 01.07.2000. Минск 2000.
5. Проблематика обеспечения параметров по взаимной интермодуляции нескольких программно определяемых радиосредств с позиции обеспечения их ЭМС./ А.А.Водчиц; 8-я международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения Сборник научных статей Часть 4 Минск 2019 С. 42-44.

UDC 621.396.2

## ON SOME EFFECTS OF INTERMODULATION IN OUTPUT AMPLIFIERS OF WIDE-BAND VHF RADIO STATIONS

Vodchyts A.A.<sup>1</sup>

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>1</sup>, Minsk, Republic of Belarus \*

*Koslov S.V.. – Doctor of Technical Sciences*

**Annotation.** The paper provides practical information about intermodulation distortions arising between simultaneously operating in the transmission mode of radios. Using an experimentally investigated radio-frequency amplifier as an example, the dependences of the level of intermodulation distortion on frequency are shown when the amplifier is operating with and without feedback, as well as the influence of the measurement method. Recommendations for optimization of circuitry solutions for power amplifiers of VHF radio stations have been developed.

**Keywords.** intermodulation, mutual influence of transmitters, frequency dependence, antenna decoupling.

## ФОРМИРОВАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ УМЕНИЙ БУДУЩИХ ПЕДАГОГОВ-ПРОГРАММИСТОВ

Ганчук В.Д., студент группы 844691

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Парафиянович Т.А. – канд.пед.наук, доцент

**Аннотация.** В статье представлен подход к формированию практических профессионально-педагогических умений студентов при прохождении будущими педагогами-программистами производственной (педагогической) практики.

**Ключевые слова.** Методика преподавания в учреждении высшего образования, педагогическая практика, профессиональный компонент, практические профессионально-педагогические умения, специальные дисциплины, иностранные студенты.

Современный специалист, освоивший содержание образовательной программы по специальности, должен обладать комплексом компетенций: универсальными, базовыми профессиональными и специализированными компетенциями [1]. Педагогическая практика студентов направления специальности 1-08 01 01-07 «Профессиональное обучение (информатика)» — это важный этап профессиональной подготовки будущих педагогов-программистов. Главной идеей развития социально-профессиональной компетентности будущего специалиста (педагога-программиста) является не только приобретение знаний и умений в условиях формального образования, но и применение этих знаний на практике [2, с.40]. При прохождении производственной (педагогической) практики у студентов-практикантов формируются или совершенствуются имеющиеся профессионально-педагогические умения. К такого рода умениям относятся осуществление планирования педагогической деятельности, правильный выбор средств обучения, проведение учебных занятий и воспитательных мероприятий с обучающимися (студентами).

Согласно Кодексу Республики Беларусь об образовании, порядок организации учебной и производственной практики определяется Положением о практике студентов, курсантов, слушателей, утвержденным Правительством Республики Беларусь [3]. Задачами практики по специальности является приобретение студентами профессиональных навыков по специальности, закрепление, расширение и систематизация знаний, полученных при изучении специальных учебных дисциплин по специальности [4]. В частности, задачами педагогической практики направления специальности 1-08 01 01-07 являются не только применение и закрепление знаний по пройденным специальным и психолого-педагогическим дисциплинам, но и формирование необходимых для будущего педагога-программиста личностных качеств, воспитание творческого подхода к педагогической деятельности. Будущий специалист должен быть способен устанавливать контакты в различных сферах профессионального и межличностного взаимодействия, продуктивно сотрудничать, работать в команде, конструктивно решать задачи [5, с.112]. Во время прохождения производственной (педагогической) практики студент под контролем непосредственного руководителя практики от организации должен выполнить программу практики и отобразить ход ее выполнения в дневнике прохождения практики [6]. По окончании производственной (педагогической) практики у студента должны быть сформированы следующие универсальные, базовые профессиональные компетенции:

1) УК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач;

2) УК-2. Владеть системным и сравнительным анализом;

3) УК-3. Владеть исследовательскими навыками;

4) УК-4. Уметь работать самостоятельно;

5) УК-5. Быть способным порождать новые идеи (обладать креативностью);

6) УК-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем;

7) УК-8. Владеть навыками устной и письменной коммуникации;

8) УК-9. Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни;

9) БПК-1. Формировать профессиональные знания, умения и навыки у обучающихся, обеспечивать их профессиональное и личностное развитие;

10) БПК-2. Организовывать и проводить учебные занятия (лекционные, практические, лабораторные, производственного обучения и другие) в учреждениях профессионального образования с использованием современных педагогических методик и технологий;

11) БПК-3. Управлять учебной, учебно-производственной, научно-исследовательской видами деятельности обучающихся;

12) БПК-5. Совершенствовать педагогический процесс на основе поиска оптимальных методов, форм, средств обучения, применения современных педагогических и информационных технологий;

13) БПК-6. Осуществлять педагогический контроль и коррекцию образовательного процесса;

- 14) БПК-12. Изучать, обобщать и систематизировать современный педагогический опыт;
- 15) БПК-13. Работать с нормативными и правовыми актами в сфере образования, трудового законодательства, охраны труда и пожарной безопасности;
- 16) БПК-25. Использовать современные достижения науки и передовых технологий в области педагогики и профессионального образования для решения научно-педагогических проблем;
- 17) БПК-26. Использовать методы и методики педагогических исследований, интерпретировать и оформлять результаты исследований [1].

Прохождение педагогической практики будущими педагогами-программистами БГУИР организовано на базе учреждения образования «Белорусская государственная академия связи» (БГАС), в котором осуществляется прием и обучение иностранных граждан на платной основе. В Кодексе Республики Беларусь об образовании сказано, что иностранные граждане и лица без гражданства, временно пребывающие или временно проживающие в Республике Беларусь, имеют право на получение образования в Республике Беларусь в соответствии с международными договорами Республики Беларусь [3]. По данным за 2017/2018 учебный год в учреждениях высшего образования Республики Беларуси всего обучалось более 19 тысяч иностранных граждан из 102 стран мира. В БГАС профессиональная подготовка обучающихся из других стран осуществляется на уровнях среднего специального и высшего образования [7].

Проведение учебных занятий, предусмотренное программой педагогической практики, осуществлялось по дисциплине «Технологии больших данных. Методы прогнозирования» в учебной группе специальности 1-31 80 07 «Радиофизика» на уровне II ступени высшего образования, под контролем руководителя практики (основной преподаватель дисциплины). Среди студентов группы большинство составляли граждане Республики Туркменистан, один студент прибыл из Йеменской Республики. Большая часть обучающихся хорошо понимала речь на русском языке, без особых проблем могла изъясняться и отвечать на вопросы преподавателя, однако четвертая часть студентов испытывала трудности при изъяснении, и около 10% студентов с большим трудом воспринимают и говорят на языке обучения.

На лекционных занятиях при изложении учебного материала использовались различные формы, методы и средства обучения, учитывались индивидуальные особенности студентов, задействовались элементы частично-поискового и объяснительно-иллюстративного методов обучения (беседа, рассказ). Во время учебного занятия речь педагога-практиканта была достаточно эмоциональной, но без использований сложных конструкций, учебный материал объяснялся студентам четко и спокойно. В качестве вспомогательного средства обучения к каждой лекции создавалась презентация, отражающая ключевые моменты излагаемой темы, наглядность информации способствовала лучшему усвоению ее студентами. При общении с обучающимися с более низким уровнем владения русским языком, приходилось использовать свои знания английского языка, чтобы донести информацию лекционного материала и убедиться в степени ее усвоения. На учебных занятиях иностранные студенты в основном демонстрировали среднюю степень активности, только некоторые из них участвовали в обсуждении и могли привести собственные примеры.

Таким образом, прохождение производственной (педагогической) практики студентами БГУИР продемонстрировало уровень научно-теоретических знаний, умений, навыков и личностных компетенций, приобретенных в процессе профессиональной подготовки, способствовало практическому формированию профессионально-педагогических умений, универсальных и базовых профессиональных компетенций.

**Список использованных источников:**

1. ОСВО 1-08 01 01-2018. Образовательный стандарт высшего образования. Специальность 1-08 01 01 «Профессиональное обучение (по направлениям)» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://pravo.by/upload/docs/op/W21933799p\\_1551819600.pdf](https://pravo.by/upload/docs/op/W21933799p_1551819600.pdf);
2. Парафиянович, Т. А. Методика воспитательной работы в учреждениях профессионального образования: учеб.-метод. пособие / Т. А. Парафиянович, К. М. Корневский. – Минск: БГУИР, 2020. – 107 с.
3. Кодекс Республики Беларусь об образовании от 13.01.2011 № 243-З (с изм. и доп.) // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2011. – № 8/24152;
4. Положение о практике студентов, курсантов, слушателей от 03.06.2010, № 860 (с изм. и доп.) // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2017. – № 5/44064;
5. Парафиянович, Т. А. Управление процессом личностного и профессионального развития будущих педагогов-программистов / Т. А. Парафиянович // Проблемы повышения эффективности образовательного процесса на базе информационных технологий = Problems of improving the efficiency of the educational process based on information technology: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, Минск, 25 апреля 2019 года) / редкол.: Ю. Е. Кулешов [и др.]. - Минск: БГУИР, 2019. – С. 112 – 116, <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/35219>;
6. Инструкция о порядке и особенностях прохождения практики студентами, которым после завершения обучения присваиваются педагогические квалификации: утв. постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 20.03.2012, № 24;
7. Иностранцам / Сайт УО Белорусская государственная академия связи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bsac.by/entrant#Иностранцам>.

## ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ БУДУЩЕГО СПЕЦИАЛИСТА

Гуща А.В.<sup>1</sup>, студент гр.844691

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Парафиянович Т.А. – канд. пед. наук, доцент

**Аннотация.** В статье рассматривается компетентностный подход, который акцентирует внимание на результатах образования, на формировании у обучающихся комплекса компетенций, на способности будущего специалиста действовать в различных моделируемых профессиональных ситуациях. Представлены психологические аспекты особенности развития обучающегося.

**Ключевые слова.** Компетентностный подход, компетентность, компетенции, будущий специалист, психология, личность, ролевые, деловые игры, коучинг, система образования.

В последние десятилетия происходит много преобразований в сфере образования, вызванных ситуацией на мировом рынке труда, необходимостью в общении с носителями других языков, выходом страны на международный уровень. Современный подход к подготовке будущих специалистов, и в целом к решению проблемы кадрового обеспечения инновационной экономики, подразумевает комплексное развитие человеческого капитала [1, с.230]. Цифровая трансформация в сфере образования представляет собой формирование новой цифровой культуры личности и осознанный подход к преобразованию процессов обучения на основе компетентностного подхода и использования современных информационных технологий [1, с.231]. Компетентностный подход акцентирует внимание на результате образования, на способности человека действовать в проблемной ситуации [2]. Данный подход подразумевает «стандарт эффективного выполнения работы» и определяется требованиями к будущим специалистам, исходя из профессиональных и индивидуальных качеств [3]. Современный специалист, освоивший содержание образовательной программы по специальности, должен обладать комплексом компетенций: универсальными, базовыми профессиональными и специализированными компетенциями [4].

Компетентностный подход начал иметь вес в образовании благодаря его закреплению в качестве нормативного конструкта в ряде официальных документов, в которых описывается необходимость учета глобальных тенденций в достижении качества образования в направлении формирования у студентов определенного набора компетенций. Итак, «компетентность» – это способность, позволяющая не только эффективно решать проблемы и задачи в ходе образовательного процесса, но и переносить полученные знания, умения и навыки на решение проблем в реальных ситуациях, возникающих в повседневной жизни или в профессиональной деятельности. Формируемые профессиональные компетенции обучающегося предполагают умение решать проблемы и задачи в профессиональных видах деятельности [5].

В современной психологии идеи развития познавательных процессов и мотивационной сферы, отмечая важность перехода к саморазвитию личности, сформулировала Л.И. Божович. Она полагала, что смысл развития человека заключается в том, что ребенок постепенно становится личностью: из существа, усваивающего накопленный человечеством опыт, он постепенно превращается в творца, создающего материальные и духовные ценности [6]. В основе компетентностного подхода лежит идея самоопределения. Профессионально развиваясь, специалист создаёт что-то уникальное, новое. Он несет ответственность за самостоятельно принятое решение, определяет цели, исходя из собственных ценностных ориентаций, принимает на себя ответственность за результаты своего труда. Эффективность компетентностного обучения зависит от направленности на формирование компетенций студента; от использования инновационных образовательных технологий; от адекватности образовательной среды, обеспечивающей активизацию процесса становления и личностно-профессионального развития личности. Так как в современном обществе образование, направленное на передачу знаний от преподавателя к студенту, становится неэффективным, более важным оказывается формирование у студента компетенций, знаний, способностей, личностных качеств, которые позволяют ему самостоятельно ориентироваться в профессиональной сфере. Освоение знаний перестает быть «формированием» личности по определенному стандарту, напротив, оно оказывается средством расширения деятельностных способностей личности [7].

Психологическое сопровождение образовательного процесса направлено на создание социально-психологических условий для успешного обучения и психологического развития личности и педагога и обучающегося в ситуациях педагогического взаимодействия. Прежде всего, речь идёт о психологических знаниях и навыках, позволяющих педагогам: организовать более эффективно образовательный процесс, построить взаимоотношения на взаимовыгодных началах, осознать и осмыслить себя в профессии и общении с участниками взаимодействия [8]. Базовые теоретические основы психолого-педагогического сопровождения образовательного процесса можно представить в

виде следующей модели: психодиагностика; психокоррекционная и развивающая работа; психолого-педагогическое консультирование; психологическое просвещение педагогов.

Психодиагностика – это первый и самый важный этап психологического сопровождения, так как она дает возможность прогнозировать определенные особенности развития, обучающегося на дальнейших этапах обучения, предупреждать потенциальные нарушения и трудности [9]. Формами психологического сопровождения педагогического процесса могут быть: тренинги и семинары, ролевые и деловые игры, коучинг. Тренинги имеют ярко выраженную практическую направленность. Они нацелены на отработку конкретного коммуникативного навыка. Имеют краткосрочный формат, повышают личную эффективность и самостоятельность обучающихся. Семинары тоже имеют практическую направленность, но несут не ярко выраженный прикладной характер. Ролевые и деловые игры содержат различные интерактивные компоненты и представляют собой интерактивное взаимодействие, что позволяют обучающимся отработать различные навыки на простых смоделированных учебных ситуациях. Предполагается, что в подобных условиях в будущей профессиональной деятельности обучающиеся смогут применить полученные навыки. Ролевые игры – это тренинговые занятия, в ходе которых имитируются и разрешаются проблемные ситуации, типичные для реального процесса жизнедеятельности людей как носителей определенных социальных функций. Каждой игре соответствуют свои правила и условия. Игра должна быть доступна для всех участников; задания в игре должны быть одинаковыми или равными по содержанию и сложности для всех; равенства требует и способ привлечения к выполнению задания. Деловые игры – это форма воссоздания предметного и социального содержания профессиональной деятельности, моделирования систем отношений. Проведение деловой игры представляет собой развертывание игровой деятельности участников на имитационной модели, воссоздающей условия и динамику реальной профессиональной деятельности. В ходе игры участники анализируют заданные условия и принимают решения, выбирают более целесообразный процесс, решают проблемы и т. п. В зависимости от того, какой тип практики воссоздается в игре и каковы цели участников, различают: учебные, исследовательские, управленческие, аттестационные деловые игры [10].

Коучинг как психологическая поддержка обладает определенной пользой и рассматривается как метод индивидуального развития личности, техника раскрытия потенциала человека для повышения его личной эффективности. Коучинг помогает раскрыть самое лучшее в личности, способствует его самостоятельному движению к решению личных и профессиональных задач. Философия коучинга опирается на веру, что каждый человек обладает мощным потенциалом для дальнейшего развития, необходимо просто усилить его осознанность, ответственность и уверенность в своих силах. Задача педагога – не выполнять задание вместо обучаемого, а дать ему уверенность в своих силах и направить его образовательную деятельность в нужном направлении [11].

Система образования в Республике Беларусь направлена на подготовку специалистов, обладающих высоким уровнем сформированности профессиональных компетенций, характеризующихся межпредметностью, междисциплинарностью, многофункциональностью. В ходе формирования компетенций важную роль играет психологическое сопровождение образовательного процесса, направленное на создание социально-психологических условий для эффективности процесса обучения и развития психологических аспектов личности будущего специалиста.

#### **Список использованных источников:**

1. Парафиянович, Т. А. Дистанционные образовательные технологии в формировании универсальных компетенций будущего педагога-программиста / Парафиянович Т. А., Мурашкина З. Н. // Дистанционное обучение – образовательная среда XXI века: материалы XI Международной научно-методической конференции, Минск, 12-13 декабря 2019 г. / редкол.: В. А. Прытков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2019. – С. 230-231 <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/38375>
2. Парафиянович, Т.А. Методика воспитательной работы в учреждениях профессионального образования: учеб-метод. пособие / Т. А. Парафиянович, К. М. Корневский. – Минск: БГУИР, 2020. – 107 с. [https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/42624/1/Parafiyanovich\\_2020.pdf](https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/42624/1/Parafiyanovich_2020.pdf)
3. Стратегия модернизации содержания среднего образования: мат-лы для разработчиков документов по модернизации общего образования. – М.: ООО «Мир книги», 2015. – 104 с.
4. ОСВО 1-08 01 01-2018. Образовательный стандарт высшего образования. Специальность 1-08 01 01 «Профессиональное обучение (по направлениям)» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://pravo.by/upload/docs/op/W21933799p\\_1551819600.pdf](https://pravo.by/upload/docs/op/W21933799p_1551819600.pdf)
5. Алексеева, Татьяна Компетентность как основа развития потенциала менеджера образования / Татьяна Алексеева. - М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. - 314 с.
6. Божович, Л.И. (1929-31/1935). Речь и практическая интеллектуальная деятельность ребенка (экспериментально-теоретическое исследование) // Культурно-историческая психология. – № 1–3. – 2016.
7. Лобеева, В. М. Социальная философия Б. Н. Чичерина. Системный анализ / В.М. Лобеева. - М.: Канон+РООИ "Реабилитация", 2015. - 304 с..
8. Фергюсон, Джеймс Практическое пособие по развитию компетенций / Джеймс Фергюсон. - М.: Карьера Пресс, 2012. - 640 с.
9. Психодиагностика: Учебное пособие / Под ред. Белоусовой А.К., Юматовой И.И. - Рн/Д: Феникс, 2018. - 256 с. 2. Ануфриев, А.Ф.
10. Симонов В помощь преподавателю. Калейдоскоп учебно-деловых игр / Симонов. - М.: Учитель, 2017. - 184 с
11. Аллен, Майкл E-Learning: Как сделать электронное обучение понятным, качественным и доступным / Майкл Аллен. - М.: Альпина Паблишер, 2016. - 200 с.

# КОНТРОЛЬ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ЦЕПЯМ ПИТАНИЯ

Дамашевич А.С., магистрант гр.945341

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Крушев В.Т. – канд. технических наук, доцент

Любое телекоммуникационное оборудование подвержено влиянию различных типов помех, а для корректной работы оборудования необходимо минимизировать влияние помех на оборудование, либо полностью его исключить. Особенно ухудшается качество электроэнергии различных электрических сетей в крупных городах.

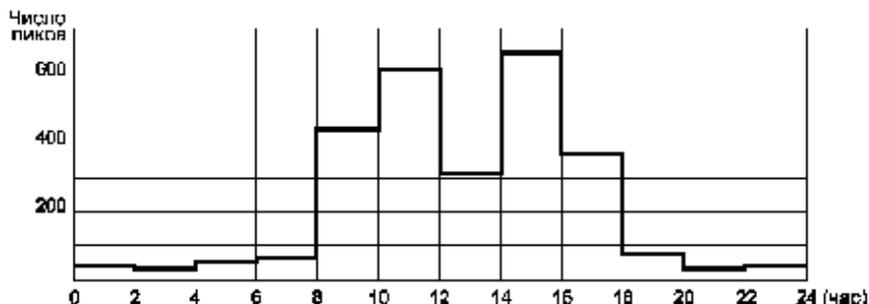


Рисунок 1 – Зависимость от времени числа пиков напряжения в диапазоне свыше 200 В (с временным интервалом свыше 40 мкс)

Из рисунка 1 легко увидеть, что количество зафиксированных пиков в рабочее время на два порядка выше по сравнению с ночным. Пики напряжения в электрических сетях – наиболее «активные убийцы» дорогостоящей производственной и бытовой электронной аппаратуры. Данное утверждение базируется на том факте, что энергия сетевых пиков может достигать единиц килоджоулей, а энергия разрушения современных интегральных микросхем составляет единицы – сотни микроджоулей [1],

Во всем мире эта проблема известна под названием «электромагнитная совместимость» (ЭМС). Естественные импульсные помехи, наводимые в электрических сетях от молний, и помехи искусственного происхождения, возникающие от воздействия мощных электромагнитных импульсов, например, при коротком замыкании высоковольтной линии электропередачи, крайне велики и соизмеримы друг с другом.

Кроме указанных выше кратковременных помех, в сетях присутствуют и долговременные помехи, обусловленные перепадами сетевого напряжения. Последние также приводят к сбоям в работе аппаратуры.

Наиболее опасными для аппаратуры являются импульсные помехи.

Международные и национальные стандарты различают следующие виды импульсных помех: наносекундные [2], микросекундные [3] и колебательные затухающие помехи [4].

Стандарты аккумулируют многолетний инженерный опыт и разработаны таким образом, чтобы при испытании устройств достаточно точно имитировать реальные помехи.

Практически все реальные импульсные помехи могут быть представлены как комбинации этих трех помех. Поэтому, если устройство устойчиво к указанным типам помех, то с высокой степенью вероятности оно будет устойчиво и к реальным помехам, независимо от их происхождения.

На основании анализа различных стандартных математических моделей формирователей помех, можно предложить единую модель.

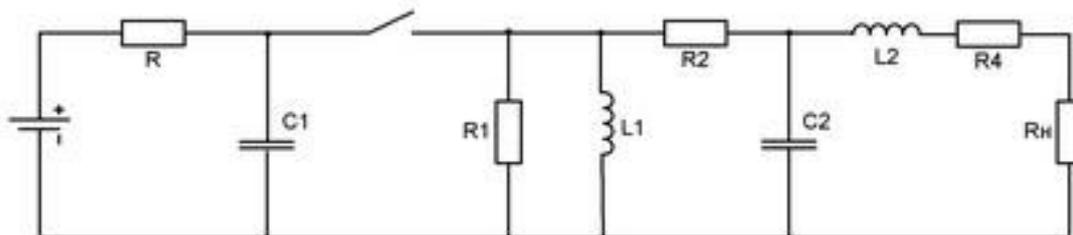


Рисунок 2 – Эквивалентная схема универсального формирователя помех

Для синтеза параметров сигнала предполагается использовать следующие действия:  
1 Составляется уравнение, связывающее все параметры схемы:

$$U = \frac{E \cdot C}{R2 \cdot \left( \frac{1}{R2} + p \cdot C2 + \frac{1}{p \cdot L2 + R3 + R4} \right) \cdot \left( p \cdot C1 + \frac{1}{p \cdot L1 + \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}} \right) - \frac{1}{R2}} \quad (1)$$

2) После применений преобразований уравнению (1) получаем:

$$U = \frac{C2 \cdot C1 \cdot E \cdot C \cdot Dirac(2,t)}{R2} + E \cdot C \cdot Dirac(1,t) \cdot \left( \frac{C2}{R2 \cdot R1} + \frac{C1 + C2}{R2^2} \right) +$$

$$+ E \cdot C \cdot Dirac(t) \left( \frac{1}{R2^2 \cdot R1} + \frac{1}{R2^3} + \frac{1 + C2 \cdot L1}{R2} \right) - \frac{Dirac(t)}{R2} +$$

$$+ C \cdot E \cdot e^{\left( \frac{-(R3+R4) \cdot t}{C1} \right)} \cdot \left( -\frac{L1}{R2 \cdot (R3 + R4)} + \frac{R1 - R4 \cdot R2 \cdot R1 - R3 \cdot R2 \cdot R1 + R2}{R1 \cdot R2^2 \cdot C1} \right) +$$

$$+ \frac{L1 \cdot (R2 + R3 + R4) \cdot E \cdot C}{R2^2 \cdot (R3 + R4)} \quad (2)$$

где функция Dirac(1,t) – дельта функция Дирака.

3) Составляется программа для расчета элементов схемы. Исходными данными в программе являются:

- $t_i$  – длительность импульса;
- $f$  – частота колебаний;
- $t_{фр}$  – длительность фронта импульса;
- $\Delta$  – отношение соседних вершин в %;
- $R_{вых}$  – выходное сопротивление;
- $R_n$  – сопротивление нагрузки.

Исходные значения параметров схемы определяются следующим образом:

– если моделируются колебательные процессы, то тогда длительность импульса ( $t_i$ ) и длительность фронта импульса ( $t_{фр}$ ) не учитываются, так как не оказывают влияния на параметры колебательных процессов, влияние оказывают только частота ( $f$ ) и сопротивление нагрузки ( $R_n$ );

– если моделируются однополярные импульсы, тогда устанавливается длительность импульса ( $t_i$ ) и длительность фронта импульса ( $t_{фр}$ ), а частота колебаний ( $f$ ) игнорируется.

Предложенная программа позволяет получать не только стандартные сигналы, но и уникальные, для каждой помеховой ситуации, что позволяет более достоверно оценить помехоустойчивость радиоэлектронной аппаратуры.

#### Список использованных источников:

- 1 Черепанов В., Хрул В А., Блудов И. Электронные приборы для защиты РЭА от электрических перегрузок. Справочник. М.: Радио и связь, 1994.
- 2 СТБ МЭК 61000-4-4-2014 Электромагнитная совместимость. Часть 4-4. Методы испытаний и измерений. Испытания на устойчивость к наносекундным импульсным помехам.
- 3 СТБ МЭК 61000-4-5-2014 Электромагнитная совместимость. Часть 4-5. Методы испытаний и измерений. Испытания на устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии.
- 4 СТБ ГОСТ Р 51317.4.12-2012 Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к колебательным затухающим помехам. Требования и методы испытаний.

## ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИЙ УОЛША

Дворникова Т.Н., Мисулин Е.А., Снапко Р.Ю., Хомьук А.А.,  
студенты гр. 941301

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Дворникова Т.Н. – магистр техн. наук

**Аннотация.** Предлагается способ кодирования информации при помощи ортогональных функций. По сравнению с импульсными способами кодирования он не требует наличия синхрогруппы в сигнале, что увеличивает объем передаваемой информации в кодовой посылке, ограниченной во времени. В качестве базисных ортогональных функций предлагается использовать функции Уолша, которые позволяют эффективнее обрабатывать принятый сигнал. В статье приведены результаты моделирования процесса передачи информации и структурные схемы устройств, позволяющих реализовать предложенный способ.

В условиях, когда информацию нужно передать в ограниченное время, необходимы специальные меры для увеличения пропускной способности канала связи. Известно, что информационная емкость канала оценивается выражением.

$$V_k = \tau_k \cdot \Delta f_k \cdot \ln \left( \frac{P_c}{P_{ш}} \right),$$

где  $\tau_k$  – интервал времени, в течение которого принимается сигнал;  $\Delta f_k$  – полоса пропускания канала;  $P_c$  и  $P_{ш}$  – мощность сигнала и шума в канале.

При заданном отношении сигнал/шум и малых фиксированных значениях  $\tau_k$  и  $\Delta f_k$  резервом увеличения объема передаваемой информации является исключение синхронизации, т.е. использование той части сигнала, которая указывает начало кода для передачи информации. В работе предлагается для формирования информационного сигнала использовать ортогональные преобразования Уолша.

Функции Уолша находят применение в передаче и обработке информации. Функции Уолша являются кусочнопостоянными функциями с нормированными интервалами определения (0,1) или [-0.5 до 0.5] и интервалом изменения аргумента который зависит от порядка системы функции Уолша и равен  $\frac{1}{2^n}$ , где n равно 1,2. Известны определения функции Уолша через разностные уравнения, функции Радемахера, тригонометрической функции и в виде матриц.

Функции Уолша через функции Радемахера определяются следующим образом:

$$W(n, \theta) = R(n_{R-1}, \theta), R(n_{R-1}, \theta), \dots, R(n_0, \theta),$$

где  $n = 2^{n_{r-1}} + 2^{n_{r-2}} + \dots + 2^{n_{r0}}$

Простота обработки – это основное достоинство преобразований в базисе Уолша, однако для формирования таких функций нужны специальные генераторы. В настоящее время существует достаточно большое количество схем генераторов функций Уолша. Один из возможных вариантов схемы генератора первых восьми функций представлен на рис.1.

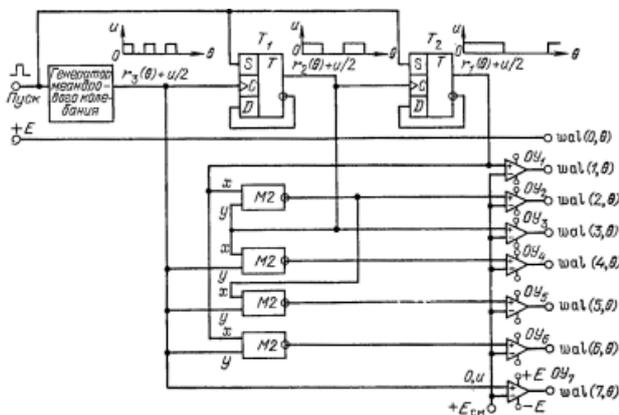


Рисунок 1. Генератор первых восьми функций Уолша

Алгоритм формирования функций Уолша в этом генераторе основан на перемножении функций Радемахера:  $r_1(\theta)$ ,  $r_2(\theta)$  и  $r_3(\theta)$ . Функция  $r_3(\theta)$  типа меандр вырабатывается непосредственно задающим генератором и имеет максимальную частоту для используемого набора базисных функций. Функции  $r_2(\theta)$  и  $r_1(\theta)$  получаются при помощи триггеров со счетным входом путем деления частоты входного сигнала на 2. Для получения остальных функций Уолша в качестве умножителей используются сумматоры по модулю 2 с инверсными выходами. Следует отметить, что на выходе триггеров и схем сложения по модулю 2 напряжение имеет два уровня 0 и 1, в то время как функции Уолша по определению имеют уровни  $-1$  и  $+1$ . Преобразование уровней осуществляют операционные усилители, которые сравнивают входной сигнал с напряжением смещения  $E_{см} = \frac{1}{2}$ .

С целью проверки возможности использования базиса Уолша для кодирования информации проведено математическое моделирование работы системы кодирования и декодирования информации.

На рис. 2.а приведен график функции Уолша, которая является пятой функцией в ортогональном базисе. На рис. 2.б показан результат преобразования в базисе Уолша такого сигнала. Как видно из рис. 2.б, только один (пятый) коэффициент разложения не равен нулю. На рис. 3 приведен график информационного сигнала  $Y$ , представляющего собой сумму девяти базисных функций.

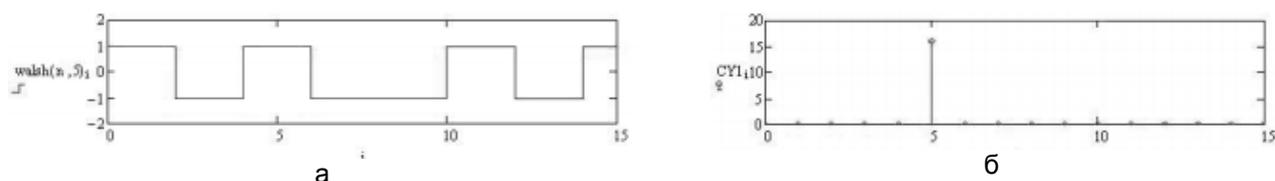


Рисунок 2.а – Пятая базисная функция Уолша, б – Результат преобразования функции  $walsh(n, 5)$  в базисе Уолша

Слагаемыми являются функции с номерами 1, 3, 4, 7, 8, 9, 11, 13. Если принять, что первая базисная функция соответствует самому старшему разряду кода, который формируется из 15 функций, тогда суммарный информационный сигнал содержит код  $K_w := (1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0)$

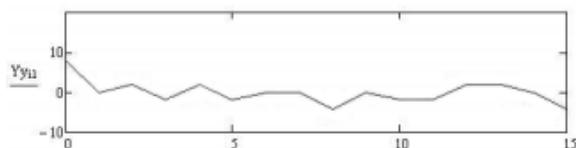


Рисунок 3. Информационный сигнал в результате сложения 8 функций Уолша

На рис. 4 показан результат ортогонального преобразования такого сигнала в базисе Уолша, где видно, что коэффициенты разложения, не равные нулю, соответствуют номерам слагаемых гармоник, а массив коэффициентов соответствует переданному коду. Проведенные расчеты показали, что массив коэффициентов разложения не зависит от временного сдвига функций. Это подтверждает вывод о том, что данный способ передачи информации не требует синхронизации во времени.

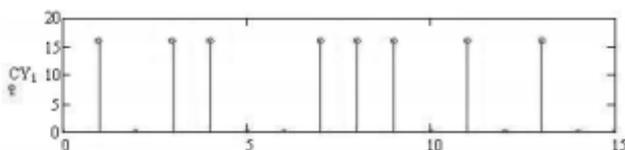


Рисунок 4. Восстановление переданного кода

Выполненный анализ обосновывает возможность использования ортогональных функций Уолша для кодирования информации. Такой способ кодирования позволяет увеличить объем передаваемой информации в условиях жесткого ограничения на время передачи.

**Список использованных источников:**

1. Радиотехнические цепи и сигналы / Гоноровский И.С. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
2. Основы теории дискретных сигналов конечных интервалах / Трахтман А.М. – М.: Советское радио 1975. – 208 с.
3. Теория кодирования / Касами Т., перевод с японского Кузнецова А.В. – М.: Мир 2006. – 571 с.

## СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ АППАРАТУРЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Денис А.А., магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Гринкевич А.В. – канд. техн. наук, доцент

Современные печатные платы содержат сложную элементную базу с плотной компоновкой. Поиск неисправности, при отсутствии видимых проявлений, может затянуться на продолжительное время. Целью является разработка комбинированной универсальной системы диагностики аппаратуры специального назначения, которая позволит делать вывод о корректности функционирования печатного узла и, в случае отклонений, с высокой точностью локализовать неисправность.

Диагностика печатного узла представляет из себя процесс определения неисправных компонентов, которые вызывают сбои в работе цепи. Важность диагностики обусловлена как практическими, так и теоретическими соображениями.

Неисправности, возникающие в процессе эксплуатации аппаратуры специального назначения, можно подразделить на три категории:

- неисправности устройства;
- неисправности сборки;
- эксплуатационные неисправности.

Распространены четыре метода поиска неисправностей, которые можно разделить на две группы: неэлектрические, включающие в себя визуальный и рентген-контроль, и электрические, состоящие из внутрисхемного и функционального тестирования.

Анализ существующих неисправностей и методов диагностики аппаратуры специального назначения говорит о том, что существует необходимость разработки комплексной универсальной системы технической диагностики, которая позволила бы повысить скорость определения неисправностей.

Разработанная система диагностики печатных узлов аппаратуры специального назначения на основе метода неразрушающего контроля обеспечивает необходимую скорость диагностики, повышает безопасность персонала за счет отсутствия необходимости находиться вблизи от системы при настройке или обслуживании и обладает высокой мобильностью. Ее конструкция представлена на рисунке 1.

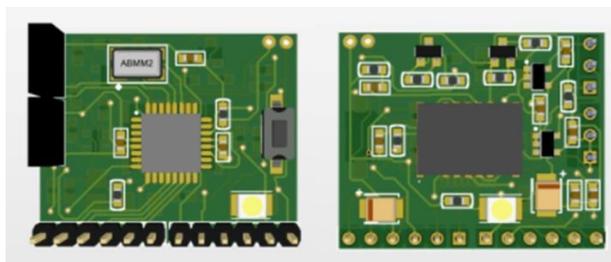


Рисунок 1 – Конструкция системы диагностики печатных узлов аппаратуры специального назначения

Существует возможность передавать изображение на персональный компьютер (рисунок 2) для частичной автоматизации процесса диагностики, динамическом просмотре работы печатного узла аппаратуры специального назначения, необходимости записи полученных результатов.



Рисунок 2 – Передача изображения на персональный компьютер

### Список использованных источников:

1. Система технического обслуживания и ремонта техники: ГОСТ 18322-2016 – 01.09.2017 – Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2017. – 16 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ КАТУШЕК ДЛЯ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОГО ПИТАНИЯ

Жмойдяк А.П., Янович А.И., студенты гр.740401

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Титович Н.А. – канд. техн. наук, доцент

**Аннотация.** В работе рассмотрены возможности метода беспроводной передачи энергии (БПЭ) с помощью взаимосвязанных параллельных колебательных контуров и исследовано влияние различных форм приёмно-передающих катушек на эффективность передачи.

**Ключевые слова.** Беспроводная передача энергии, параллельный колебательный контур, взаимдуктивность.

Основным способом питания электронной аппаратуры и модулей, располагающихся на вращающихся частях устройства, является вращающееся контактное устройство - устройство, предназначенное для передачи постоянных, переменных и импульсных электрических сигналов между источником и приёмником, расположенными во взаимно вращающихся частях объекта. Такие устройства обеспечивают надёжный электрический контакт между вращающимися частями, но имеют низкую износостойкость. Альтернативным решением является система беспроводного питания, когда энергия передаётся с помощью электромагнитного поля, что исключает проблему износостойкости контакта.

Существует несколько методов беспроводной передачи энергии с помощью электромагнитного поля. Они подразделяются по характерным зонам распространения электромагнитного поля. Известно, что, в зависимости от расстояния от источника излучения выделяют две условные зоны распространения электромагнитного поля (ЭМП): ближнюю зону и дальнюю зону [1]. Наиболее распространённым в настоящее время является метод электромагнитной индукции, основанный на использовании ЭМП ближней зоны и позволяющий передавать большие мощности при небольшом расстоянии между катушками.

Проектируемая система, структурная схема которой изображена на рисунке 1, состоит из трёх основных устройств: передатчика, приёмника, имеющих связь через радиоканал 2,4 ГГц, и устройства контроля. Частота 2,4 ГГц выбрана в соответствии с отчётом МСЭ-R SM.2303-2 [2].

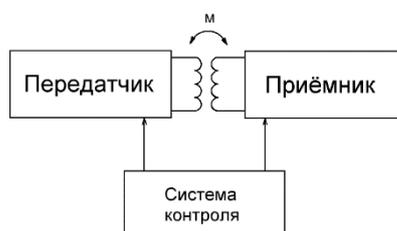


Рисунок 1 – Структурная схема системы БПЭ

Передатчик осуществляет преобразование постоянного напряжения в переменное напряжение синусоидальной формы с заданной частотой, которое формирует переменное магнитное поле вокруг передающей катушки. На приёмной катушке, располагающейся в переменном магнитном поле, возникает ЭДС индукции. Формируемый переменный индукционный ток преобразуется в постоянный для питания нагрузки. Блок контроля следит за оптимальной передачей энергии и при необходимости вносит изменения в работу передатчика и приёмника.

Очевидно, что передающая и приёмная катушки должны быть расположены перпендикулярно относительно оси вращения устройства, на которое передаётся энергия, а центр катушек должен располагаться на оси вращения для того, чтобы в любой момент времени получать максимальную мощность на приёмнике.

Исследовались три вида катушек, имеющих форму круга: однослойная плоская, намотанная одиночным проводом (1, рисунок 2); однослойная плоская бифилярная катушка (2); однослойной плоская катушки из многожильного провода (3). Каждая катушка изготавливалась, как в однослойном, так и в двухслойном исполнении. Для расчёта индуктивности плоских спиральных катушек использовалась методика, изложенная в [3].

Для измерения зависимости КПД от расстояния между катушками приёмная и передающая катушки располагались соосно в двух параллельных плоскостях на расстоянии  $l$ . Между катушками находился диэлектрик (воздух). При проведении измерений приёмная катушка отдалялась от передающей с шагом в 5 мм.

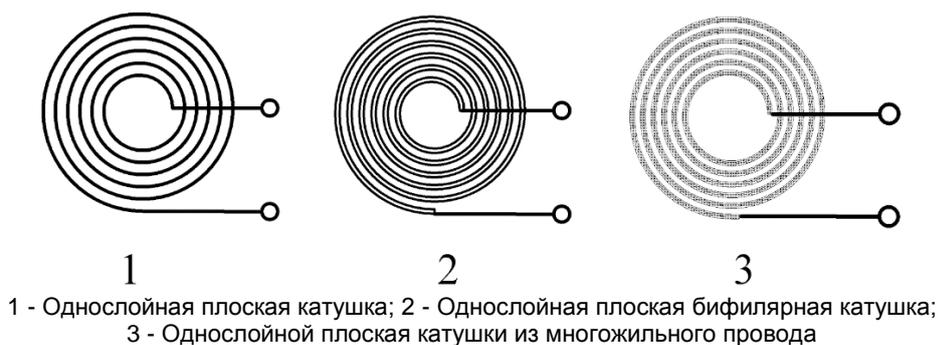


Рисунок 2 – Внешний вид исследуемых катушек

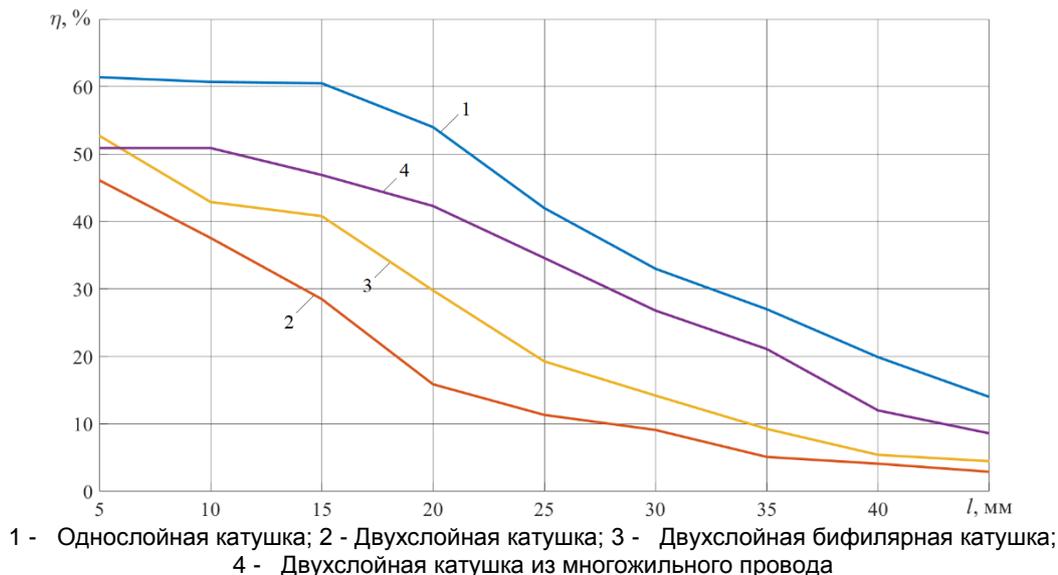


Рисунок 3 – Зависимость КПД устройства от расстояния между передающей и приёмной катушками

Из полученных результатов видно, что при передаче энергии на расстояние до 15 мм оптимальным решением будет использование однослойных катушек или двухслойных катушек из многожильного провода.

По результатам исследований можно утверждать о перспективности метода магнитной индукции в области обеспечения питания вращающихся элементов различных устройств. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что однослойная катушка и двухслойная катушка из многожильного провода являются наиболее подходящими для применения в подобных системах питания. В дальнейших исследованиях планируется изучить зависимость передаваемой мощности от количества витков в передающей и приёмной катушках, а также определить минимально необходимое количество приёмных и передающих контуров в системе для обеспечения заданной мощности. Довольно перспективным может быть использование прямоугольных катушек.

**Список использованных источников:**

1. Кураев А.А. Электродинамика и распространение радиоволн / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А. К. Сеницын. Минск: Бестпринт; 2004.
2. Отчёт МСЭ-R SM.2303-2 (06/2017) Беспроводная передача энергии с использованием технологий, не предусматривающих передачу с помощью радиочастотного луча.
3. Немцов М.В. Справочник по расчёту параметров катушек индуктивности. 2-е издание. Москва: Энергоатомиздат; 1989.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОКАНАЛА В АВТОМОБИЛЬНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

Зайцев И. А., студент гр.741301

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Дворникова Т. Н. – магистр технических наук

**Аннотация.** В данной статье рассмотрена эффективность применения радиоканала перед GSM-каналом связи. Предложен альтернативный существующим диапазон частот для охранных автомобильных систем.

**Ключевые слова.** Радиоканал, радиочастотный диапазон, автомобильная сигнализация, охранная система.

В современном мире автомобиль необходимое средство передвижения, особенно в условиях пандемии. Все больше и больше человек покупают личное авто для социального дистанцирования, чтобы не пользоваться общественным транспортом.

После покупки автотранспортного средства любой водитель задается вопросом установки охранной системы, поскольку беспокоится за безопасность своей машины. На сегодняшний день производители могут предложить многообразие разного рода устройств и систем, обладающих своими преимуществами и недостатками.

Существует два вида каналов связи в охранных системах для автомобиля:

- Радиоканал;
- GSM-канал.

Однако, основной канал, использующийся в подобных системах, это радиоканал. В сравнении с радиоканалом существенным недостатком GSM-канала является низкая помехозащищенность, лёгкая подавляемость, работа сети GSM не всегда отличается высокой стабильностью, привязка к телефону и зоне покрытия мобильной сети, а также обслуживание SIM-карты охранной системы.

В соответствии с решением Государственной комиссии по радиочастотам при Совете Безопасности Республики Беларусь «О выделении радиочастотного спектра для радиоэлектронных средств малого радиуса действия» от 28.08.2012 № 12К/12 «Неспецифические устройства малого радиуса действия» требования, предъявляемые к системам, относящимся к этой группе такие, что в частотных диапазонах 169,4-169,4875 МГц и 433,05-434,79 МГц предельная мощность передатчика составляет 10 мВт.

В настоящее время наиболее распространённый радиочастотный диапазон брелоков автомобильных сигнализаций, пейджеров, пультов составляет 433,05-434,79 МГц. И как следствие данный диапазон будет перегружен в периоды, когда на стоянке стоит большое количество машин. В каждом автомобиле находится приемопередатчик охранной системы, который обменивается сигналами со своим брелоком. В данный момент времени будут перебои в связи на приемной стороне. Также некоторые брелоки разных производителей и моделей, работающие на одинаковой радиочастоте 433,92 МГц совместимы между собой. Что приводит к угрозе безопасности автотранспортного средства. Злоумышленник, зная какая модель сигнализации стоит на определенной машине, может подобрать брелок или симитировать сигнал брелока, чтобы открыть авто. Существует большое количество таблиц в сети, где показаны какие модели брелоков каких производителей совместимы между собой.

Альтернатива диапазону 433,05-434,79 МГц составляет диапазон 169,4-169,4875 МГц. Диапазон, который также не нуждается в лицензировании. При переходе охранной системы в данный диапазон влияние сигналов от других сигнализаций будут незначительны. Потому что большинство систем в машинах работает в других полосах частот. Также исходя из того, что частота сигнала уменьшилась, дальность распространения радиоволны увеличится, что приведет к увеличению дальности связи между автомобилем и его владельцем.

Таким образом, уход от распространенного на сегодняшний день диапазона 433,05-434,79 МГц для автомобильных охранных систем и переход в диапазон 169,4-169,4875 МГц повышает помехоустойчивость охранной системы в условиях сложной городской помеховой обстановки и повышает дальность действия радиосвязи за счет перехода в более низкий диапазон частот.

### Список использованных источников:

1. Решение Государственной комиссии по радиочастотам при Совете Безопасности Республики Беларусь «О выделении радиочастотного спектра для радиоэлектронных средств малого радиуса действия» от 28.08.2012 № 12К/12.
2. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем. Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 228 с.

## ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛИ

### «ВЕСЕЛЫЙ САМУРАЙ»

*Зарембо А.И., студент гр.844691*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Славинская О.В. – канд. пед. наук, доцент*

**Аннотация.** В современном мире большинство людей отдают предпочтение покупкам в интернете взамен традиционному способу. Аудитория интернета стремительно растет, тем самым расширяя рынок сбыта товаров и услуг. В статье описано разрабатываемое программное средство, посредством которого будет осуществляться розничная торговля в сети интернет для заказчика - ООО «МЯТА ЛАУНДЖ».

**Ключевые слова.** Программное средство, интернет-магазин, розничная торговля, электронная торговля, разработка сайтов, продукты питания, доставка.

Розничная торговля — продажа товаров и услуг, предназначенных для личного или семейного использования (не связанного с предпринимательской деятельностью), непосредственно конечному потребителю. [1]

Электронная торговля — осуществление торгово-закупочной деятельности через Интернет. Она включает в себя:

- передачу информации, продуктов или услуг через онлайн ресурсы;
- предоставление услуг электронным путем;
- организацию онлайн методами обычной торговли. [2]

На сегодняшний день интернет-торговля имеет массу преимуществ перед традиционной торговлей, например:

- 1) нет нужды выходить из дома и сталкиваться с другими покупателями, что сохраняет время и уменьшает риск заболевания;
- 2) при отсутствии нужного товара за несколько секунд можно перейти на другое программное средство торговли, что является гораздо быстрее, чем добираться до следующей торговой точки;
- 3) имеет богатый ассортимент товаров;
- 4) отзывы покупателей, с помощью которых можно оценить качество продукции;
- 5) отсутствие очередей.

Актуальность разработки программного средства розничной торговли «Веселый самурай» обусловлена необходимостью увеличения продаж, систематизации статистики заказов и уменьшения расходов путем цифровизации продаж. Заказчиком выступает ООО «МЯТА ЛАУНДЖ». Благодаря разработке программного средства, мы полагаем, что будут увеличены продажи за счет дополнительной комфортной функции доставки товара по указанному адресу в рамках зоны доставки, а также увеличено качество товара за счет возможности оставить отзыв о продукции компании, не выходя из дома. Продукцией компании-заказчика являются готовые продукты питания, в особенности блюда японской кухни, чем и обусловлено название программного средства.

Программное средство имеет следующие требования заказчика:

- простой, продуманный и отзывчивый дизайн;
- быстрая скорость работы;
- доступность всем клиентам;
- отказоустойчивость;
- возможность продвижения в поисковых системах;
- рентабельные и современные технологии;
- установленное название.

Основное назначение разрабатываемого программного средства – расширение клиентской базы, повышение продаж и качества продукции. Его главная страница представлена на рис. 1.

Основными функциями разрабатываемого программного средства являются:

- регистрация и авторизация;
- корзина с добавлением, изменением и удалением товара;
- информация о работе торговых точек;

- оформление заказа с товарами;
- акции и скидки на продукцию;
- оформление доставки товаров на указанный адрес, который входит в зону доставки;
- личный кабинет с информацией и адресами доставки;
- обратная связь;
- информация о составе товара.

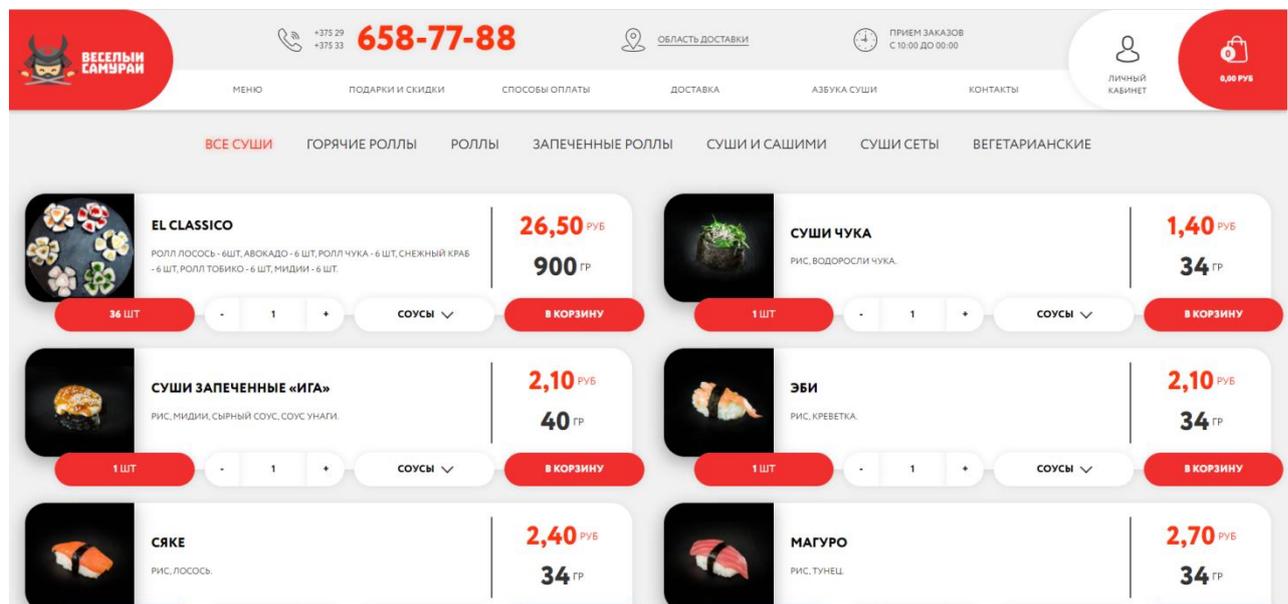


Рисунок 1 – Главная страница программного средства «Веселый самурай»

Преимуществами разрабатываемого программного средства в отличие от его существующих аналогов являются:

- эффектный и удобный интерфейс;
- адаптивный дизайн;
- гибкая система предоставления индивидуальных бонусов;
- мультиязычность;
- доступность с различных устройств;
- трекер состояния заказа.

При разработке были использованы следующие средства:

- интегрированная среда разработки JetBrains PhpStorm;
- ядро CMS OpenCart;
- скриптовый язык общего назначения PHP;
- мультипарадигменный язык программирования JavaScript;
- реляционная система управления базами данных MySQL;
- стандартизированный язык разметки документов HTML;
- формальный язык описания внешнего вида документа CSS;
- технология AJAX для обеспечения неблокирующей клиент-серверной архитектуры;
- менеджер пакетов NPM;
- JavaScript-библиотека jQuery.

Разрабатываемое программное средство розничной торговли «Веселый самурай» позволяет увеличивать продажи, привлекая новых клиентов, а также упрощает пользователю процесс получения желаемой продукции (которая в большинстве своем актуальна в свежеприготовленном виде), без затрат времени на хождение в торговую точку.

**Список использованных источников:**

1. Розничная торговля // Википедия – свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа [https://ru.wikipedia.org/wiki/Розничная\\_торговля](https://ru.wikipedia.org/wiki/Розничная_торговля) – Дата доступа: 30.03.2021.
2. Электронная торговля // Википедия – свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа [https://ru.wikipedia.org/wiki/Электронная\\_торговля](https://ru.wikipedia.org/wiki/Электронная_торговля) – Дата доступа: 30.03.2021.

УДК 621.396.2

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЛИТЕЛЬНОГО НАКОПЛЕНИЯ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ДЛЯ РЛС С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПО ДАЛЬНОСТИ С УЧЕТОМ УГЛОВЫХ РЫСКАНИЙ САМОЛЕТОВ

Ле Ван Кыонг, аспирант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Козлов С.В. – д.т.н., доцент

**Аннотация.** Приведены результаты анализа эффективности алгоритмов некогерентной и комбинированной обработки при длительном накоплении (ДН) отраженного сигнала (ОС) от многоэлементной радиолокационной цели типа «самолет». Показана необходимость и предложена процедура адаптивной оценки междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала после компенсации миграции дальности и частоты в каждом отчете по дальности. С использованием математического моделирования показано, что предлагаемые алгоритмы обеспечивают возможность обнаружения сигнала, отраженного от многоэлементной цели при угловых рысканиях последней в условиях низких, менее минус 10 дБ, отношениях сигнал/шум на выходе внутрипериодной обработки (ВПО).

**Ключевые слова.** Радиальное ускорение, миграция дальности и частоты, блестящие точки, центр масс цели, угловые рыскания, когерентное накопление, комбинированное накопление.

В [1] приведены разработанные на основе [2] алгоритмы длительного накопления (ДН) отраженного сигнала (ОС) для РЛС высоким разрешением по дальности с учетом угловых рысканий самолета. Цель настоящей работы – выявление и обсуждение основных закономерностей указанного накопления. Используемые исходные данные и обозначения соответствуют [1].

### Закономерности накопления отраженного сигнала при детерминированной модели рысканий

На рис.1. приведены формируемые при длительном когерентном накоплении радиолокационные изображения (РЛИ) цели с параметрами согласно [1] при  $T_{\text{КН}}=256$  мс, периоде повторения импульсов РЛС  $T_r=1$  мс, числе импульсов в пачке  $Q=T_{\text{КН}}/T_r$  и длине волны  $\lambda=10$  см при гипотетическом случае отсутствия угловых рысканий цели и различной степени рассогласования параметров движения цели и параметров системы обработки. Цель совершала разворот с ускорением  $3g$ , отношение сигнал/шум на выходе внутрипериодной обработке (ВПО) по одной блестящей точке цели составляло  $-10,9$  дБ, разрешение по дальности, радиальной скорости и ускорению составляло 3 м, 0,2 м/с и 0,78 м/с<sup>2</sup>, соответственно. Горизонтальная ось на рисунках соответствует доплеровскому сдвигу частоты, вертикальная – дальности.

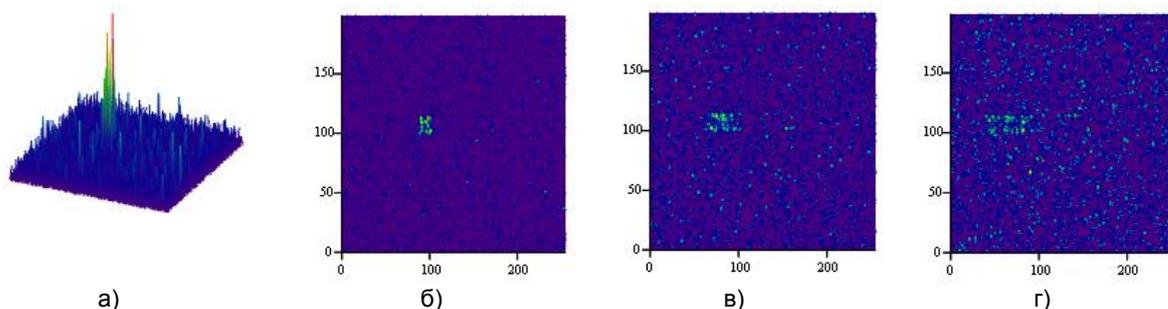


Рисунок 1 - Трехмерное (а) и яркостное (б-г) РЛИ цели в координатах дальность-доплеровский сдвиг частоты при точном (а, б) согласовании параметров системы обработки и рассогласовании по ускорению 20 м/с<sup>2</sup> (в) и 40 м/с<sup>2</sup> (г)

Как видно из рис.1, при отсутствии угловых рысканий и точном согласовании параметров движения цели и системы обработки формируется характерное РЛИ объекта в виде совокупности ярких по отношению к фону точек, распределенных по дальности и доплеровскому сдвигу частоты. Размер РЛИ по дальности соответствует наблюдаемой радиальной протяженности объекта. Размер РЛИ по частоте определяется разностью доплеровских частот отдельных блестящих точек (БТ) цели, что создает предпосылки для оценивания размера объекта в картинной плоскости. При рассогласовании радиального ускорения объекта и системы обработки РЛИ «размывается» преимущественно по оси частот, и, при достаточно большом рассогласовании обнаружение цели становится затруднительным.

На рис.2-4 приведены формируемые РЛИ при точном совпадении с параметров системы обработки с параметрами движения центра масс самолета и различных периодах рыскания  $T_{рыск}$  при когерентном, некогерентном и комбинированном накоплении. Отношение сигнал/шум по одной БТ на выходе ВПО составляло минус 10,9 дБ, общее число БТ 19, потенциальное ОСШ по всей продолжительности наблюдения для гипотетического случая когерентного суммирования отраженных от всех блестящих точек сигналов составляет 26 дБ. Пунктирной линией для случаев некогерентного и комбинированного накопления показан порог, сформированный исходя из предположения о нормализации фона при вероятности ложной тревоги  $10^{-6}$ . Комбинированное накопление реализовывалось путем разделения интервала наблюдения на 8 подпачек. Сглаживание осуществлялось в экспоненциальном фильтре с постоянной времени, равном удвоенному значению периода (10 нс) дискретизации. При выбранных исходных данных за время накопления блестящие точки цели смещаются на расстояние равное, в среднем, 22 элементам разрешения по дальности. Смещение цели за время наблюдения примерно соответствует ее длине.

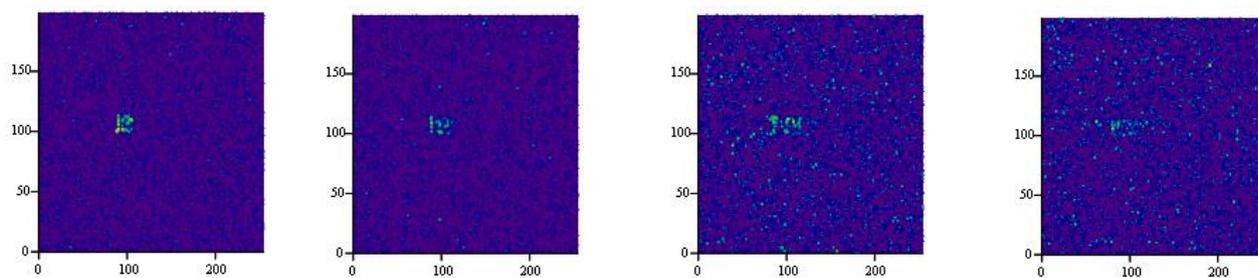


Рисунок 2 - РЛИ цели в координатах дальность-доплеровский сдвиг частоты при периоде рысканий 2, 1, 0,5 и 0,25 с при когерентном накоплении

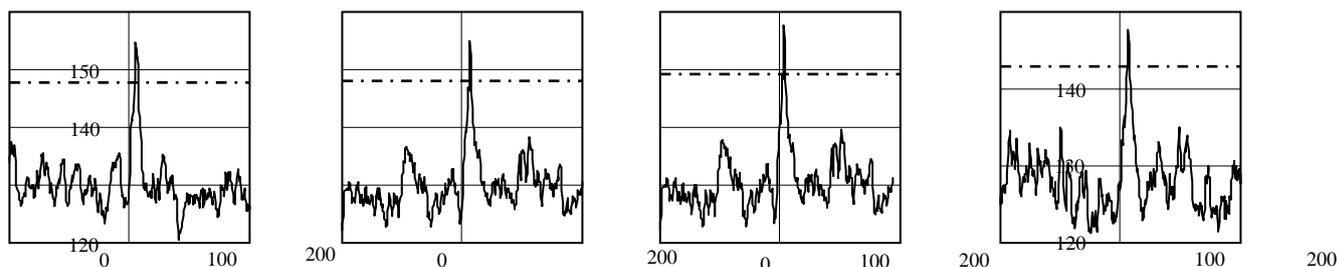


Рисунок 3 - Результат некогерентного накопления при периоде рысканий 2, 1, 0,5 и 0,25 с

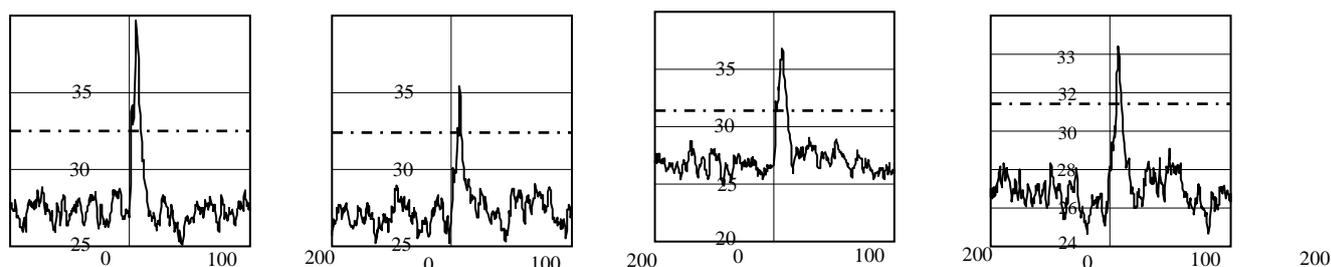


Рисунок 4 - Результат комбинированного накопления при периоде рысканий 2, 1, 0,5 и 0,25 с

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- при достаточно малой угловой скорости рысканий с периодом повторения  $T_{рыск} = 2$  с РЛИ объекта при когерентном накоплении практически не изменяется в сравнении со случаем отсутствия рысканий; при увеличении скорости рысканий происходит размывание РЛИ по оси частот и, при достаточно большой скорости рысканий, визуальное обнаружение цели по результатам когерентного накопления становится затруднительным;
- при некогерентном и комбинированном накоплении уверенное обнаружение цели обеспечивается для всех значений периода угловых рысканий;
- качество некогерентного накопления по данной цели, оцениваемое визуально по выходному сигналу, примерно соответствует качеству комбинированного накопления; в данном случае это можно объяснить интерференцией сигналов, отраженных от различных блестящих точек цели, что приводит к возникновению «доплеровского шума» и случайному перемещению сигнала по доплеровским фильтрам при комбинированном накоплении; однако среднее квадратическое отклонение «шумовой» дорожки в элементах разрешения по дальности, где блестящие точки цели отсутствуют, несколько меньше, чем для некогерентного накопления; как будет показано ниже, если блестящие точки цели

разрешаются по дальности, то комбинированное накопление более эффективно, чем некогерентное накопление, причем число подпачек, на которые разбивается общий интервал наблюдения необходимо выбирать в соответствии с интервалом рысканий (временем нахождения сигнала в доплеровском фильтре при разделении на подпачки) по аналогии с выбором времени когерентного накопления по флуктуирующему сигналу [3].

Таким образом, предложенные [1] алгоритмы обеспечивает возможность обнаружения сигнала, отраженного от многоэлементной цели при угловых рысканиях последней в условиях низких, менее минус 10 дБ, отношениях сигнал/шум на выходе внутрипериодной обработки для РЛС с высоким разрешением по дальности.

### **Закономерности накопления отраженного сигнала при случайных рысканиях цели при полете в турбулентной атмосфере**

Рассмотренный выше случай ввиду использования гармонического изменения угловых рысканий является модельным и позволяет выявить основные закономерности длительного накопления отраженного сигнала. В реальных условиях радиолокационного наблюдения за самолетом его угловые рыскания будут определяться турбулентностью атмосферы и представлять из себя случайный процесс с заданными статистическими свойствами.

Для оценки эффективности длительного накопления отраженного сигнала с учетом турбулентности атмосферы необходима соответствующая модель отраженного сигнала. В настоящее время широко используется модель радиолокационных характеристик вторичного излучения аэродинамических целей, реализованная в специализированном программном комплексе «Back Scattering Simulation» (BSS), созданной Я.Д. Ширманом [4] и развиваемом его учениками. Комплекс обеспечивает реализацию имитационной модели отраженных сигналов от маневрирующих аэродинамических объектов при узкополосном и сверхширокополосном зондировании в заданном диапазоне частот. В качестве входных параметров цели используются: координаты положения центра масс цели; координаты положения БТ относительно центра масс; параметры движения цели.

Исследование эффективности длительного накопления проводилось при следующих исходных данных в программном комплексе BSS:

- наблюдаемые радиолокационные цели: тип-1 – среднеразмержный самолет, в качестве которого принимался заданный в программном комплексе объект типа F-15; тип-2 – крупноразмерный самолет, в качестве которого принимался заданный в программном комплексе объект типа B-52;

- параметры режима полета: начальный азимут цели – 0 град; начальная дальность до центра масс цели – 50 км; высота полета – 4000 м; начальный курсовой угол – 225 град; скорость полета – 1100 км/ч;

- параметры РЛС: зондирующие сигналы в виде когерентных пачек линейно-частотно-модулированных радиоимпульсов с прямоугольной огибающей (без оконной обработки); длительность импульса – 10 мкс; девиация частоты – 50 МГц; длина волны – 3 см; поляризация сигнала – горизонтальная; частота повторения импульсов – 1000 Гц; размер строка дальности – 600 м, число элементов дальности в строке – 512.

С указанными выше параметрами РЛС, разрешающая способность РЛС по дальности много меньше радиальной протяженности объекта, поэтому цель занимает примерно 5-7 элементов разрешения по дальности. Результаты моделирования отраженных сигналов (шумы отсутствовали) на достаточно большом временном интервале до и после компенсации миграции дальности с использованием различных форм представления выходных результатов приведены на рис. 5-7. На рис. 5 приведена амплитудная огибающая ОС для различных значений номера  $k$  импульса пачки. Как видно из рис.5, ОС представляет собой совокупность некоторых комплексных амплитуд, относящихся к различным элементам разрешения по дальности. Положения максимумов в пределах строка дальности характеризуют миграцию дальности, которая в данном случае весьма значительна. Элементы радиолокационного портрета характеризуют радиальное распределение областей отражения объекта с учетом его конструктивных особенностей и вносят разный вклад в формирование отраженного сигнала. Флуктуация сигналов БТ также различны в процессе наблюдения: есть стабильные элементы, а есть - интенсивно флуктуирующие. При учете турбулентности атмосферы флуктуации происходят с меньшим временем корреляции и с большей интенсивностью. Особенно наглядно эффект миграции дальности и флуктуаций отраженного сигнала проявляется на яркостном РЛИ в координатах «дальность – номер импульса пачки». Из рис. 7 видно, что эффект МД при указанном разрешении по дальности нужно учитывать даже при небольшом времени накопления. Яркая линия с изменяющейся интенсивностью заметно наклонена по отношению к горизонтальной оси. После компенсации МД (рис. 7 д-з) эта линия перпендикулярна горизонтальной оси, что обеспечивает возможность когерентного, комбинированного и некогерентного накопления в каждом элементе разрешения по дальности.

На рис. 8,9 показано формирование РЛИ при полностью когерентном накоплении (рис. 8) и некогерентном накоплении (рис. 9) при времени наблюдения 1 с и 256 мс. Несмотря на то, что пик

сигнала на выходе когерентного накопителя сформировался правильно, эффективность когерентного накопления оказалась низкой. Об этом свидетельствует сравнение амплитуды сигналов на выходе ВПО (рис. 5) и на выходе когерентного накопителя (рис. 8,9), а также то, что результат когерентного накопления за время 256 мс оказался существенно лучше, чем за время 1 с.

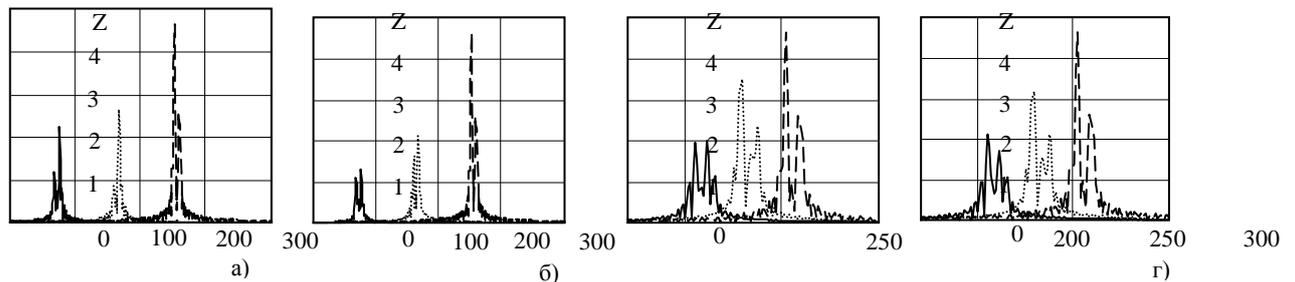


Рисунок 5 – Пример отраженного цели тип-1 сигнала на выходе ВПО при времени наблюдения  $T_{KH} = 1$  с (а,б) и при  $T_{KH} = 256$  мс (в,г) в случаях без учета атмосферы (а,в) и турбулентности ясной погоды (б,г). (длинный штрих –  $k = 0$ ; круглые точки  $k = 500$  (а,б), 128 (в,г); сплошная линия  $k = 999$  (а,б), 255 (в,г))

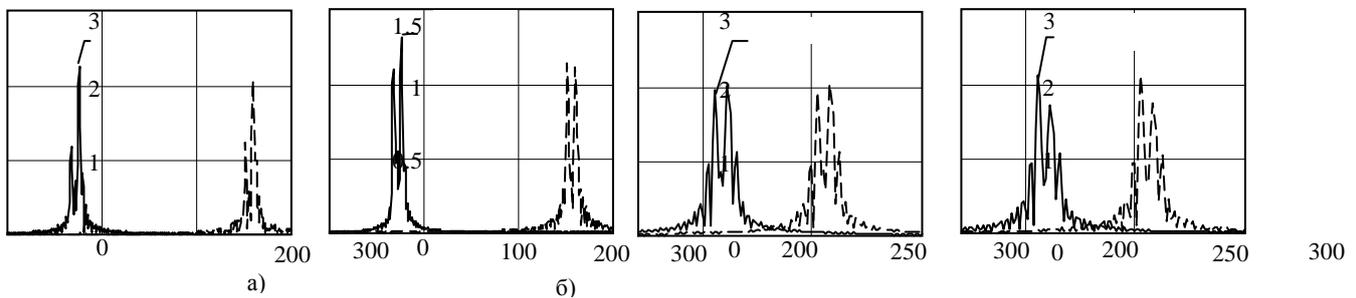


Рисунок 6 – Сигнал на выходе ВПО до (сплошная линия) и после (длинный штрих) компенсации миграции дальности при времени наблюдения  $T_{KH} = 1$  с (а,б) и при  $T_{KH} = 256$  мс (в,г) в случаях без учета атмосферы (а,в) и турбулентности ясной погоды (б,г)

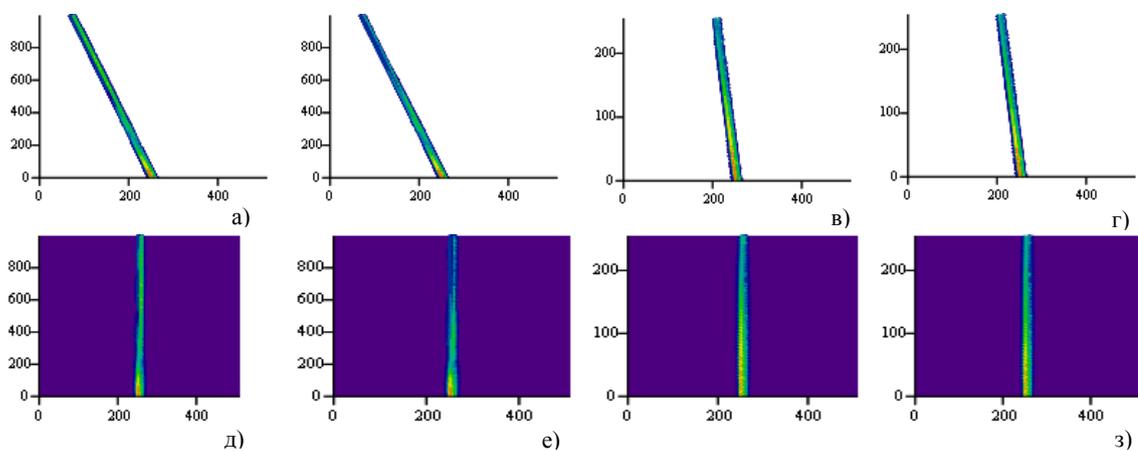


Рисунок 7 – Яркостное РЛИ на выходе ВПО в виде сигналов до (а-г) и после (д-з) компенсации миграции дальности при времени наблюдения  $T_{KH} = 1$  с (а, б, д, е) и при  $T_{KH} = 256$  мс (в,г, ж, з) в случаях без учета атмосферы (а, в, д, е) и турбулентности ясной погоды (б, г, е, з)

Некогерентное накопление с компенсацией миграции дальности (рис. 9) менее чувствительно к флуктуациям отраженного сигнала. В результате некогерентного накопления на выходе системы обработки сформировался устойчивый дальномерный портрет цели, протяженность которого по уровню 0,5 примерно совпадает с продольной протяженностью цели.

В соответствии с [3] для отраженных сигналов с произвольными флуктуациями при реализации комбинированного накопления необходимо использовать строго определенное соотношение между временем когерентного и некогерентного накопления.

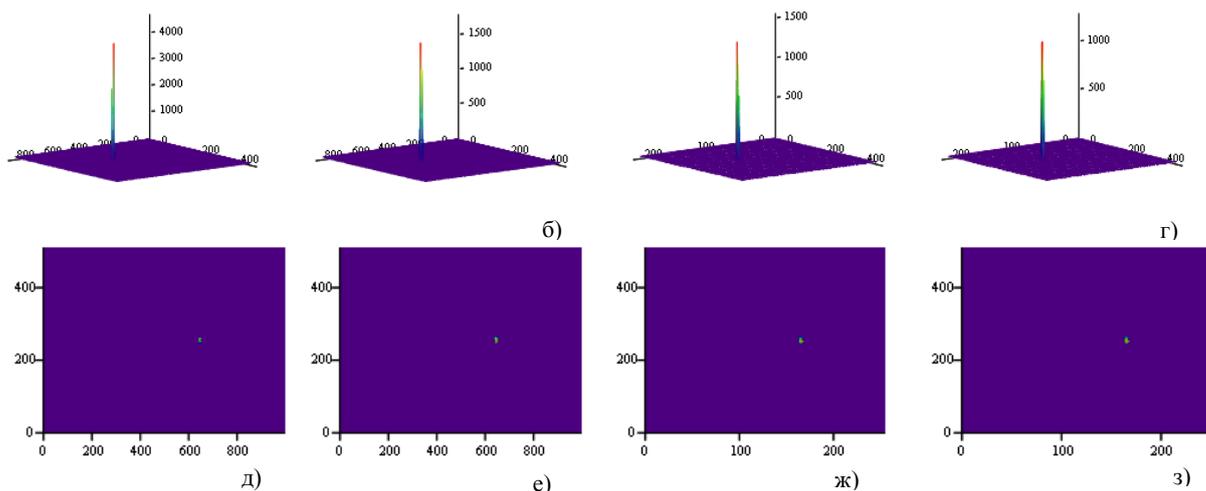


Рисунок 8 - Трехмерное (а-г) и яркостное (д-з) РЛИ самолета F15 в координатах дальность-доплеровский сдвиг частоты при времени наблюдения  $T_{KH} = 1$  с (а, б, д, е) и при  $T_{KH} = 256$  мс (в, г, ж, з) в случаях без учета атмосферы (а, в, д, е) и турбулентности ясной погоды (б, г, е, з)

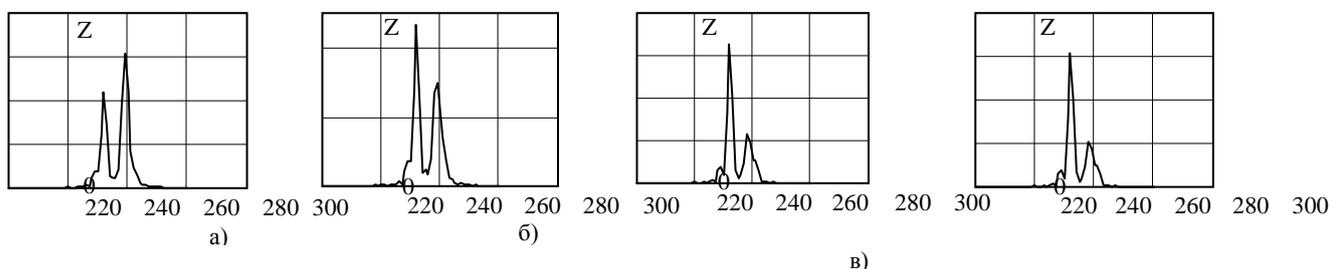


Рисунок 9 - Результат некогерентного накопления при времени накопления  $T_{KH} = 1$  с (а,б) и при  $T_{KH} = 256$  мс (в,г) в случаях без учета атмосферы (а,в) и турбулентности ясной погоды (б,г)

На рис. 10 приведен вид выходного сигнала при одной и той же реализации при комбинированном накоплении с различным числом  $Q_1$  подпачек (рис. 10 а, б, в), на которые разбивается общее время наблюдения, и при некогерентном накоплении. В качестве показателя эффективности при комбинированном накоплении примем величину

$$\beta = \frac{Z_{\max} - \bar{Z}_{\text{ш}}}{\sigma_{\text{ш}}}, \quad (1)$$

где  $Z_{\max}$  - максимальное значение результатов комбинированного накопления;  $\bar{Z}_{\text{ш}}, \sigma_{\text{ш}}$  - среднее значение среднее квадратическое отклонение результатов накопления для отсчетов, где присутствует только шум. Величина  $\beta$  является аналогом отношения сигнал/шум при когерентном накоплении, причем, с учетом нормализации порог при обнаружении сигнала  $\ell = \bar{Z}_{\text{ш}} + \sigma_{\text{ш}} \Phi^{-1}(1 - F_{\text{лт}})$

, где  $\Phi^{-1}(\bullet)$  - функция, обратная интегралу вероятности вида  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt$ ,  $F_{\text{лт}}$  - вероятность ложной тревоги.

В табл. 1 для тех же исходных данных, что и на рис. 10 приведены оценки  $\sigma_{\text{ш}}$  и параметра  $\beta$ , полученные для наиболее мощной блестящей точки цели. Из приведенных результатов видно, что оптимальным (при заданной дискретности оценивания) является разделение общей продолжительности наблюдения на  $Q_1=4$  подпачек, при котором шумовые отсчеты и отсчет, содержащий отраженный сигнал, разделяются наилучшим образом.

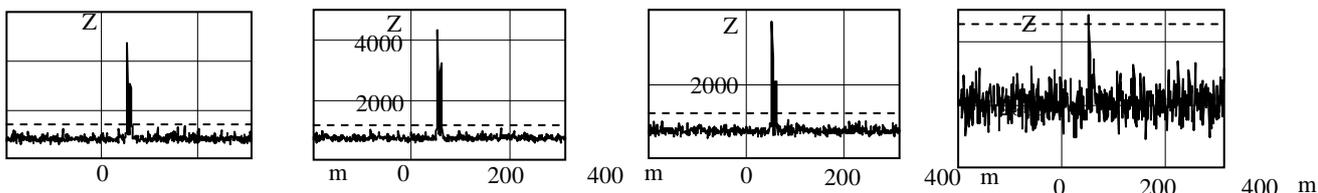


Рисунок 10 - Результат комбинированного накопления при изменении числа подпачек, на которые разбивается пачка  $Q_1=2$  (а),  $Q_1=10$  (б),  $Q_1=4$  (в) и некогерентного накопления (г).

Таблица 1 – СКО шума и параметр эффективности комбинированного некогерентного накопления

Параметр	Комбинированное накопление			некогерентное накопление
	$Q_1 = 2$	$Q_1 = 10$	$Q_1 = 4$	
$\sigma_{\text{ш}}$	57.549	120.56	70.331	884.53
$\beta$	41.927	24.19	48.429	6.285

**Алгоритм оценивания междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций**

Так как междупериодные коэффициенты корреляции флуктуаций сигналов для различных элементов разрешения по дальности, в которых находится отраженный от цели сигнал, различны и априори неизвестны, возникает необходимость их адаптивного оценивания по принятой реализации [6, 7].

С учетом специфики, обусловленной предварительной компенсацией миграции дальности и частоты, возможный алгоритмов оценки заключается в следующем. Оценим мощность ОС, попадающего в  $m$ -м отсчет дальности. С учетом возможности оценки мощности шума по все «шумовой дорожке» на участках, где сигнала нет, оценку  $\hat{P}_{\text{ш}}$  мощность шума считаем известной с высокой точностью  $\hat{P}_{\text{ш}} \rightarrow P_{\text{ш}}$ .

Так как с учетом некоррелированности сигнала и шума  $\frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |\dot{U}_{m,k}|^2 \approx \hat{P}_{Cm} + P_{\text{ш}}$ , где  $\dot{U}_{m,k}$  -

отсчеты сигнала на выходе ВПО после компенсации миграции дальности, то наиболее простой алгоритм оценки мощности ОС имеет вид

$$\hat{P}_{Cm} = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |\dot{U}_{m,k}|^2 - \hat{P}_{\text{ш}}. \tag{2}$$

Отметим, что в соответствии с (2) оценка  $\hat{P}_{Cm}$  может оказаться меньше нуля, что будет соответствовать либо шумовому отсчету, либо отсчету, содержащему предельно слабый и, следовательно, необнаруживаемый сигнал, по которому дальнейшие оценки не проводятся.

Оптимальный алгоритм оценки коэффициента корреляции предполагает вычислении логарифма функции правдоподобия (ФП).

$$\psi_m(r) = \mathbf{u}_m^+ \mathbf{R}^{-1}(r) \mathbf{u}_m + \ln |\mathbf{R}(r)|, \tag{3}$$

где  $\mathbf{u}_m = (\dot{U}_{m,0}, \dot{U}_{m,1}, \dots, \dot{U}_{m,K-1})^T$  - вектор, составленный из отсчетов медленного времени для  $m$ -го отсчета быстрого времени;  $\mathbf{R}(r)$  - оценка корреляционной матрицы (КМ) суммы флуктуирующего сигнала и шума с элементами

$$R_{k_1, k_2} = r^{|k_1 - k_2|} e^{j2\pi F_{DS}(k_1 - k_2) T_r} \hat{P}_{Cm} + \begin{cases} P_{sh}, & \text{при } k_1 = k_2; \\ 0, & \text{при } k_1 \neq k_2, \end{cases} \tag{4}$$

где  $F_{DS}$  - доплеровский сдвиг частоты, который полагается известным.

При типовых значениях  $r = 0,7 \dots 0,95$  элементы как прямой, так и обратной КМ быстро убывают при удалении от главной диагонали, поэтому прямую и обратную КМ можно заменить ленточными, выполняя вычисление эрмитовой формы в (3) путем суммирования по главной диагонали матрицы и  $N-1$  перекрестным элементам в столбце от главной диагонали. Для этого вычисляется редуцированная корреляционная матрица  $\mathbf{R}_p(r)$  флуктуирующего сигнала размером  $N \times N$  элементов согласно (4) и проводится ее обращение  $\mathbf{Q}_p(r) = \mathbf{R}_p^{-1}(r)$ . В полученной матрице  $\mathbf{Q}_p(r)$  далее используется только первый столбец.

Редуцированная решающая статистика при накоплении сигнала по лентам корреляционной матрицы будет иметь вид

$$\psi_{p_m}(r) = \sum_{k=0}^{K-1} Q_{p_{0,0}} |\dot{U}_{m,k}|^2 + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=0}^{K-n-1} Q_{p_{0,n}} \dot{U}_{m,k} \dot{U}_{m,k+n}^* + \frac{K}{N} \ln |R_p(r)|. \quad (5)$$

Тогда оценка междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала для  $m$ -го отсчета по дальности

$$\hat{r}_m = \underset{r}{\operatorname{argmax}} \psi_{p_m}(r). \quad (6)$$

На рис. 11 приведены зависимости решающей статистики  $\psi_{p_m}(r)$  для двух элементов разрешения, где находятся компоненты отраженного сигнала, отраженного от радиолокационных целей тип-1,2. Зависимости приведены для различных значений размерности  $N$  учитываемых перекрестных членов решающей статистики (5).

Как видно из рис. 11а-б, для крупноразмерной цели значение коэффициента междупериодной корреляции флуктуаций отраженного сигнала изменяется в пределах 0,7...0,9, то есть отраженный сигнал в каждом элементе разрешения имеет относительно малое время корреляции флуктуаций. Для среднеразмерной цели (рис. 11 в-г) значение междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала изменяется в пределах 0,988...0,996, то есть время корреляции флуктуаций отраженного сигнала намного больше. После оценивания междупериодного коэффициента корреляции отраженного сигнала по каждому из элементов разрешения (отсчету по дальности) определяется время  $T_{KH_m}$  когерентного накопления и число  $Q_1$  подпачек, на которые разделяется общая длительность наблюдения

$$T_{KH_m} = -\frac{T_r}{\ln(\hat{r}_m)}; \quad Q_1 = \frac{KT_r}{T_{KH_m}}. \quad (7)$$

и проводится оптимальное комбинированное накопление отраженного сигнала в каждом из элементов разрешения по дальности. Результат сравнивается с адаптивно формируемым порогом, определяемым заданной вероятностью ложных тревог, оценкой  $\hat{P}_\Sigma$  мощности шума и особенностями логики накопления при предлагаемом варианте длительного комбинированного накопления (суммированием максимумов квадратов модулей результатов когерентного накопления в подпачках [1]).

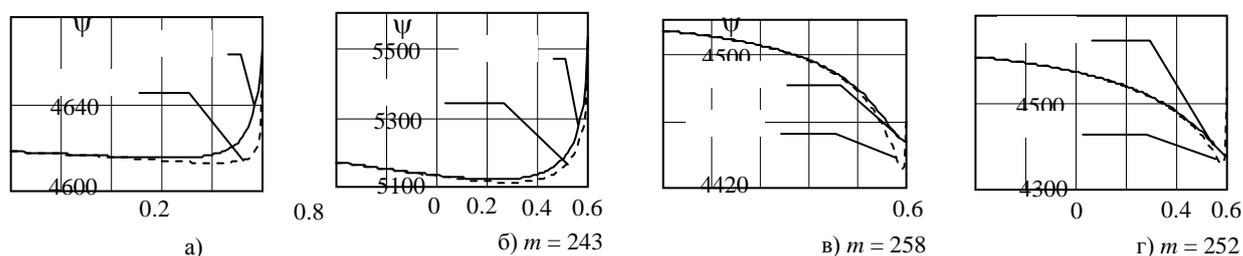


Рисунок 11- зависимости решающей статистики (5) от коэффициента корреляции для отраженных сигналов для цели тип-2 (а-б) и тип-1 (в-г) для различных значений номера  $m$  элемента разрешения в строке дальности

При этом цель считается обнаруженной, если произошло обнаружение хотя-бы в одном элементе разрешения по дальности. Несколько более упрощенный подход может заключаться в:

- предварительной локализации области  $m_1...m_2$  нахождения цели по отсчетам быстрого времени, например, по оценкам (2) мощности ОС;
- оценкам коэффициента междупериодной корреляции ОС согласно (6) и вычислении среднего из них;
- определении оптимального в среднем времени когерентного накопления в соответствии с (7) и комбинированном накоплении отраженных сигналов.

Для этого случая применительно к цели тип-1 на рис. 12 приведен сигнал на выходе ВПО до компенсации миграции дальности в виде яркостного РЛИ и результат длительного накопления при оценке среднего значения междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала 0,996. Отношение сигнал/шум по самой мощной блестящей точке цели на выходе ВПО составляло  $-10$  дБ, число накапливаемых импульсов  $K = 1000$ . Как видно из рис. 12а, по яркостному РЛИ на выходе ВПО обнаружение цели, например, оператором, невозможно: на РЛИ отсутствует характерная наклонная линия (см. рис. 7) повышенной в сравнении с фоном яркости. Неэффективным является и некогерентное накопление после компенсации миграции дальности (рис. 12б). В то же время при комбинированном накоплении после компенсации миграции дальности и адаптивной оценкой среднего значения междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций, отраженный сигнал хорошо выделяется на фоне шума (рис. 12в).

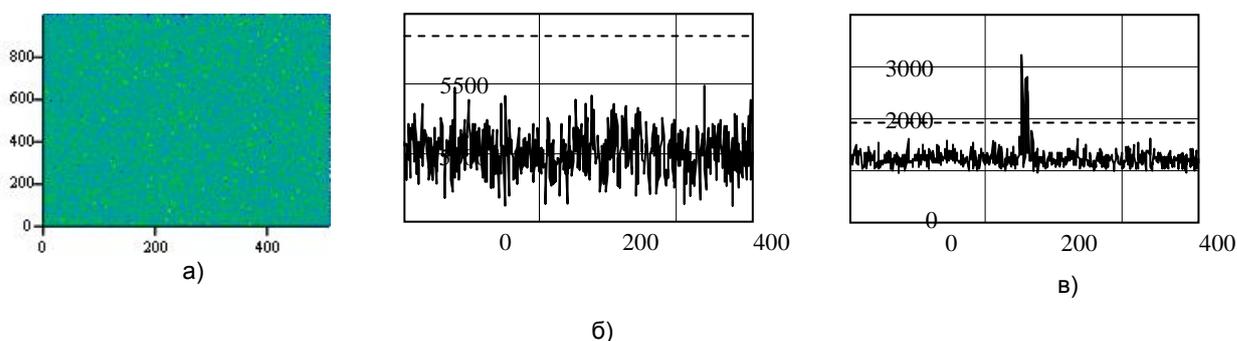


Рисунок 12 - Яркостное РЛИ (а), результаты некогерентного (б) и комбинированного (в) накопления при среднем значении междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала 0,9

### Выводы

Из приведенного выше анализа можно сделать следующие выводы:

- применительно к РЛС с высоким разрешением по дальности при решении задачи обнаружения типовых радиолокационных целей – самолетов при длительном накоплении отраженных сигналов необходима предварительная компенсации миграции дальности и доплеровской частоты; указанная компенсация может быть эффективно выполнена в спектральной области с использованием предлагаемых [1,2] алгоритмов;

- время корреляции флуктуаций отраженных сигналов в различных отсчетах по дальности в пределах радиальной протяженности цели зависит от большого числа факторов: номера отсчета по дальности, ракурса наблюдения, динамики взаимного изменения взаимного пространственного положения цели и РЛС, типа цели, характеристик атмосферы и т.д., в связи с чем после компенсации миграции дальности необходима адаптивная оценка междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала в каждом отсчете дальности;

- адаптивная оценка междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала в каждом отсчете дальности после компенсации миграции дальности и частоты достигается путем решения оптимизационной задачи, предусматривающей оценку средних мощностей шума и отраженного сигнала, вычисления редуцированной корреляционной матрицы суммы флуктуирующего сигнала и шума и вычисления решающей статистики для всех возможных значений междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала;

- получение оценки междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций обеспечивает возможность близкого к оптимальному времени когерентного накопления отраженного сигнала с использованием алгоритма комбинированного накопления [1] с учетом угловых рысканий цели, предусматривающего суммирование максимумов квадратов модулей результатов когерентного накопления в подпачках; при выборе правильного числа подпачек, на которые разбивается общая длительность радиолокационного наблюдения, комбинированное накопление существенно более эффективно, чем некогерентное накопление;

- при длительном комбинированном накоплении в РЛС с высоким разрешением по дальности возможно формирование качественного дальностного портрета, протяженность которого коррелирована с радиальной протяженностью цели.

Таким образом, предлагаемые алгоритмы длительного накопления отраженных сигналов в РЛС с высоким разрешением по дальности с компенсацией миграций дальности и частоты и адаптивной оценкой междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала обеспечивают существенное повышение возможностей радиолокационного наблюдения радиолокационных целей типа «самолет» при низких отношениях сигнал/шум. Существенное изменение дальности и скорости цели, а также ее угловые рыскания в турбулентной атмосфере на интервале радиолокационного контакта с целью не являются препятствиями для длительного накопления отраженного сигнала.

#### Список использованных источников:

1. Алгоритмы длительного накопления отраженного сигнала для РЛС с высоким разрешением по дальности с учетом угловых рысканий самолетов / Ле Ван Кыонг // В настоящем сборнике.
2. Экономичные алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным / Козлов С. В., Ле Ван Кыонг // материалы Республиканской научно-практической конференции, Минск, БГУИР, 28-29 октября 2020 г.–С.173-177.
3. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Часть 1. Основы радиолокации. Военное издательство министерства обороны СССР, Москва 1983, 456 с.
4. Shirman Y.D. Radar Target Backscattering Simulation Software and User's Manual. Artech House, Boston, London, 2002, 69 p.
5. Shirman Y.D. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, & Tracking. Artech House, Boston, London, 2001, 294p.
6. Характеристики обнаружения радиолокационного приемника, учитывающего корреляционные свойства отраженного сигнала / Габец С. А., Седышев С. Ю // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2014.– № 1 (42). – С.81–87.
7. Адаптивное к корреляционным характеристикам отраженного сигнала устройство междупериодной обработки / Габец С. А., Седышев С. Ю. // Изв. НАН РБ.2015.– № 4. – С.100–106.

UDC 621.396.2

## EFFICIENCY OF LONG-TERM ACCUMULATION OF A REFLECTED SIGNAL FOR HIGH-RANGE RESOLUTION RADARS TAKING INTO ACCOUNT ANGULAR YAW OF AIRCRAFT

Le Van Cuong

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>1</sup>, Minsk, Republic of Belarus

Kozlov S.V – D. Sci., associate professor

**Annotation.** The results of the analysis of the efficiency of algorithms for incoherent and combined processing with long-term accumulation of the reflected signal from a multi-element radar target of the "airplane" type are presented. The necessity is shown and the procedure of adaptive estimation of the inter-period correlation coefficient of fluctuations of the reflected signal after compensation of the range and frequency migration in each range report is proposed. Using mathematical modeling, it is shown that the proposed algorithms provide the possibility of detecting a signal reflected from a multi-element target at angular yaw of the latter in conditions of low, less than minus 10 dB, signal-to-noise ratios at the output of intraperiodic processing.

**Keywords.** Radial acceleration, range and frequency migration, scatterers of the aircraft, target center of mass, angular yaw, coherent accumulation, combined accumulation.

## МОДЕЛЬ И ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ ТИПОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ НАКОПЛЕНИИ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ

Ле Ван Кьонг, аспирант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Козлов С.В. – д.т.н., доцент

**Аннотация.** Рассмотрены модели движения типовых радиолокационных целей при длительном накоплении отраженных сигналов, приведены результаты анализа параметров движения, влияющих на эффективность алгоритмов обработки.

**Ключевые слова.** Скорость, ускорение, производная ускорения, миграция дальности, миграция частоты, длительное накопление.

Обоснование алгоритмов длительного накопления (ДН) отраженного сигнала (ОС) [1,2] предполагает определение модели (закона) и параметров движения типовых радиолокационных целей (РЛЦ). ДН наиболее актуально для РЛЦ, имеющих малую эффективную площадь рассеяния и (или) находящихся на больших дальностях. Обоснованные модель и параметры используются для устранения миграции дальности (МД) и частоты (МЧ) ОС [2]. В качестве типовых РЛЦ рассмотрим малогабаритный беспилотный летательный аппарат (БЛА) на участках прямолинейного полета и разворота, самолет, совершающий прямолинейный полет или маневр с заданной перегрузкой, участки земной поверхности и расположенные на ней объекты при локации с искусственного спутника Земли (ИСЗ) или наоборот, и баллистический объект (снаряд), движущийся под действием силы тяжести и сопротивления атмосферы. Для реализации когерентного накопления (КН) [1] необходимо, чтобы за время  $T_{\text{КН}}$  ДКН изменения  $\Delta V$ ,  $\Delta a$  скорости и ускорения РЛЦ были меньше, чем разрешающие способности  $\Delta V = \lambda/2T_{\text{КН}}$ ,  $\Delta a = \lambda/2T_{\text{КН}}^2$  по указанным параметрам. Зависимости  $\Delta V(T_{\text{КН}})$ ,  $\Delta a(T_{\text{КН}})$  для различных значений длины волны  $\lambda$  РЛС приведены на рис. 1.

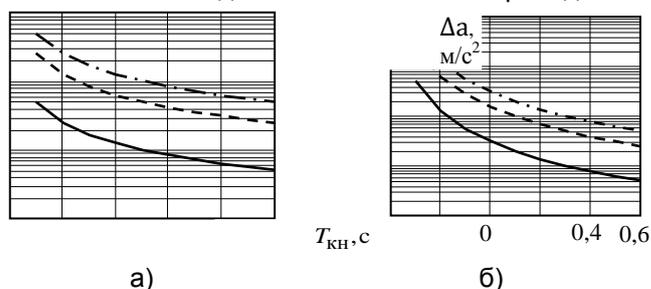


Рисунок 1- Зависимость разрешающей способности по скорости (а) и ускорению (б) для различных значений длины волны (сплошная кривая -  $\lambda=1$  см, пунктирная -  $\lambda=5$  см, штрихпунктирная -  $\lambda=10$  см)

Как видно из рис.1, при времени КН 0,5...1 с изменение скорости и ускорения не должны превышать десятых-сотых долей м/с и м/с<sup>2</sup>, соответственно. Если указанное условие не выполняется, то при синтезе алгоритмов необходимо учитывать МЧ. Миграцию дальности необходимо учитывать, если радиальное перемещение РЛЦ

$$\delta r = |V_{0r}T_{\text{КН}} + a_r T_{\text{КН}}^2/2| > c/(2\Delta f_0) \text{ где } \Delta f_0$$

- ширина спектра сигнала;  $V_{0r}$ ,  $a_r$  - радиальные скорость (в момент начала наблюдения) и ускорение РЛЦ.

В качестве наиболее общей модели

взаимного перемещения РЛС и цели примем полином третьей степени [2], когда дальность изменяется по закону

$$r(t) = r_0 + V_{0r}t + \frac{a_r t^2}{2} + a_r' t^3 / 6, \quad (1)$$

где  $r_0$  начальная дальность между РЛС и РЛЦ;  $a_r'$ - производная радиального ускорения.

Для обоснования параметров  $V_r, a_r, a_r'$  на рис.2-4 приведены типичные законы изменения указанных параметров от времени наблюдения для самолета, совершающего прямолинейный полет со скоростью 250 м/с (курсовая дальность и параметр 30 км), самолета, совершающего разворот с различным радиусом, БЛА, движущегося по окружности, артиллерийского снаряда с начальной скоростью 500 м/с (курсовая дальность и параметр относительно РЛС 30 км) и ИСЗ, движущегося по круговой орбите на высоте 500 (600) км, на интервале времени наибольшего сближения с некоторой точкой на земной поверхности.

Анализ полученных зависимостей проведем применительно к времени накопления 0,5...1,0 с при ширине спектра сигнала  $\Delta f_0 = 10...50$  МГц. Основные выводы состоят в следующем:

- при ДН сигнала, отраженного от прямолинейно движущегося самолета, необходимо учитывать линейную миграцию дальности и МЧ, обусловленную радиальным ускорением; учет производной радиального ускорения не требуется;

- при ДН сигнала, отраженного от самолета или БЛА, совершающих разворот, требуется учет линейной и квадратичной миграции дальности и миграции частоты, обусловленной, в том числе, производной дальности третьего порядка; так, при типичных значениях  $a_r' = 1...2$  м/с<sup>3</sup> при маневрировании приращение скорости РЛЦ за время наблюдения может составить  $a_r T_{\text{кн}}^2 / 2 = 1$  м/с, что существенно превышает потенциальную разрешающую способность по радиальной скорости;

- для баллистического объекта (снаряда) в большинстве случаев можно ограничиться линейной миграцией дальности; для миграции частоты должны учитываться три производные дальности;

- для ИСЗ, особенно при реализации длительного (единицы-десятки секунд в прожекторном режиме при синтезировании апертуры) накопления необходимо учитывать минимум три производные дальности между РЛС и целью.

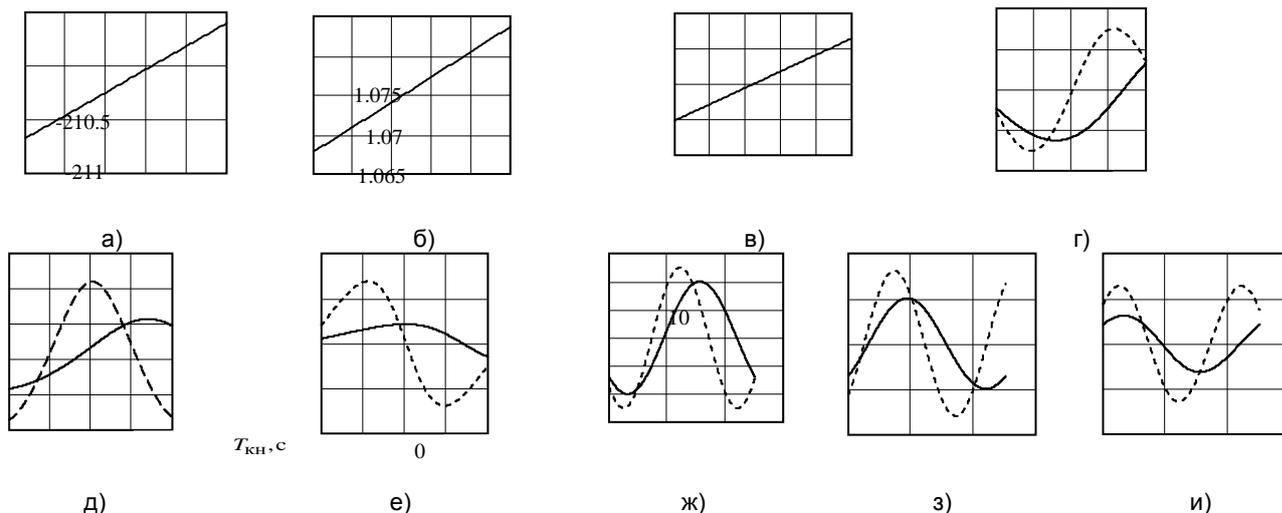


Рисунок 2 – Зависимость радиальной скорости (а, г, ж), ускорения (б, д, з) и производной ускорения (в, е, и) от времени наблюдения при прямолинейном движении самолета (а, б, в), при развороте самолета (г, д, е) с радиусом 6250 м (сплошная кривая) и 4500 м (пунктирная кривая) и при движении БЛА (ж, з, и) по окружности (сплошная кривая – радиус 80 м, пунктирная – радиус 78 м)

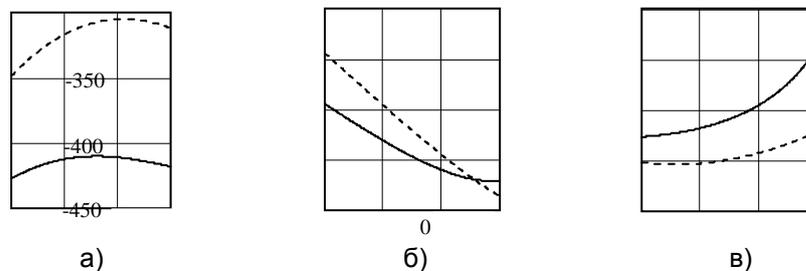


Рисунок 3 – Зависимость, радиальной скорости (а), радиального ускорения (б), и производной ускорения (в) снаряда от времени наблюдения (сплошная кривая - угол запуска 30°, штрих - угол запуска 45°)

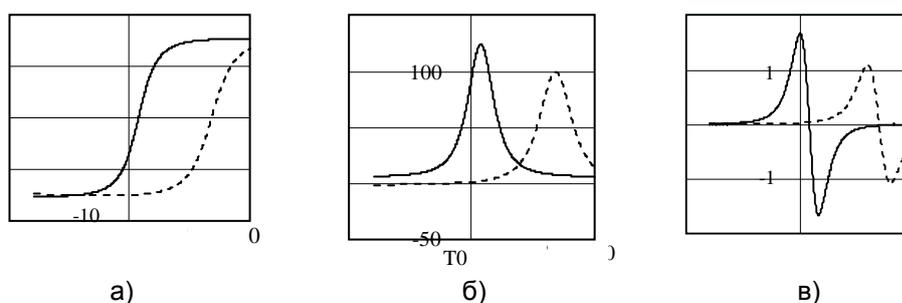


Рисунок 4– Зависимость радиальной скорости (а), радиального ускорения (б), и производной ускорения ИСЗ (в) от времени наблюдения (сплошная – высота 500 км, штрих – высота 600 км)

Таким образом, при синтезе алгоритмов ДН ОС может быть использована модель (1), число учитываемых производных дальности и их максимальные значения в которой определяется типом РЛЦ и условиями наблюдения.

**Список использованных источников:**

1. Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.В. Соколова // Перспективы повышения эффективности метровых РЛС при использовании длительного когерентного накопления (по результатам экспериментальных исследований). / С.И. Нефедов [и др.]. М.: Радиотехника, 2003. –С. 49-63.
2. Long-time coherent integration for weak maneuvering target detection and high-order motion parameter estimation based on keystone transform / P. Huang, G. Liao, Z. Yang, X.-G. Xia, J-T. Ma, J. Ma. // IEEE Trans. Signal Process. vol. 64, no. 15. –P.4013-4026.

## АЛГОРИТМЫ ДЛИТЕЛЬНОГО НАКОПЛЕНИЯ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ДЛЯ РЛС С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПО ДАЛЬНОСТИ С УЧЕТОМ УГЛОВЫХ РЫСКАНИЙ САМОЛЕТОВ

*Ле Ван Кыонг, аспирант*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Козлов С.В. – д.т.н., доцент*

**Аннотация.** Приведены модификации алгоритмов некогерентной и комбинированной обработки при длительном накоплении отраженного сигнала от многоэлементной радиолокационной цели типа «самолет», предусматривающие компенсацию миграции дальности для всех возможных значений радиальных скорости и ускорения цели на выходе внутрипериодной обработки. При последующем некогерентном накоплении проводится суммирование квадратов модулей отсчетов в элементах разрешения по дальности, сглаживание результатов обработки экспоненциальным фильтром и обнаружение сигнала в каналах обработки с грубым определением радиальной скорости по максимуму сформированной статистики. При комбинированном накоплении сигналы в каждом элементе разрешения по дальности разделяются на подпачки, для которых выполняется преобразование Фурье с последующим отбором и суммированием квадратов спектральных отсчетов с наибольшей амплитудой и сглаживанием результата экспоненциальным фильтром.

– **Ключевые слова.** Радиальное ускорение, миграция дальности и частоты, блестящие точки, центр масс цели, угловые рыскания.

Одним из методов повышения дальности обнаружения воздушных объектов (ВО) при низком отношении сигнал/шум является увеличение времени накопления отраженного сигнала (ОС). Для РЛС с высокой (единицы метров) разрешающей способностью по дальности при длительном накоплении ОС будет наблюдаться миграция дальности (МД) и миграция доплеровской частоты (МЧ). Варианты алгоритмов коррекции МД и МЧ в спектральной области и когерентного накопления ОС для точечной цели приведены в [1,2]. Для многоэлементной цели типа «самолет» использование этих алгоритмов осложняется угловыми рысканиями цели [3,4], при наличии которого различные блестящие точки (БТ) цели будут иметь разные значения радиальных скорости и ускорения. Пусть на интервале наблюдения строительная ось цели совершает гармонические колебания в горизонтальной плоскости с амплитудой по углу  $\gamma_n$ , периодом повторения  $T$  и начальной фазой  $\varphi$ . Закон поступательного движения центра масс цели  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$  координаты  $n = \overline{1, N}$  видимых БТ цели определяются радиусами  $R_n$  и углами  $\gamma_n$  БТ в горизонтальной плоскости. Тогда закон изменения координат БТ может быть записан в виде

$$X_n(t) = x(t) + R_n(t) \cos(\gamma_n(t) + \Delta\gamma \cos(\omega t + \varphi) + \gamma_n); Y_n(t) = y(t) + R_n(t) \sin(\gamma_n(t) + \Delta\gamma \cos(\omega t + \varphi) + \gamma_n); Z_n(t) = z(t), \text{ где } \gamma_n = \arccos \dot{y}(t)/\dot{x}(t) - \text{курс цели; } \omega = 2\pi/T. \text{ Дальность до } n\text{-ой БТ изменяется по закону } r_n(t) = \sqrt{X_n^2(t) + Y_n^2(t) + Z_n^2(t)}, \text{ а радиальная скорость и ускорение } V_n(t) = \frac{dr_n(t)}{dt}; a_n(t) = \frac{d^2r_n(t)}{dt^2}$$

Иллюстрация возникающих при угловых рысканиях самолета эффектов приведена на рис. 1-3, где показаны модель самолета в виде совокупности БТ и радиальные скорости и ускорения трех БТ с наибольшим (треугольники на рис. 1) отклонением от центра масс. Иллюстрация выполнена для  $x(0) = 30$  км;  $\dot{x}(0) = -0,30$  км/с;  $y(0) = 30$  км;  $\dot{y}(0) = 0$  км/с;  $\ddot{y}(0) = 30$  м/с<sup>2</sup>;  $z(0) = 5$  км,  $T = 2$  с;  $\Delta\gamma = 2^\circ$ . Как видно из рис.2 и 3, радиальные скорости ускорения отдельных БТ различны и изменяется на интервале наблюдения нелинейно, при этом радиальные ускорения БТ колеблются относительно радиального ускорения центра масс цели с амплитудой, определяемой расстоянием БТ до центра масс и периодом рысканий.

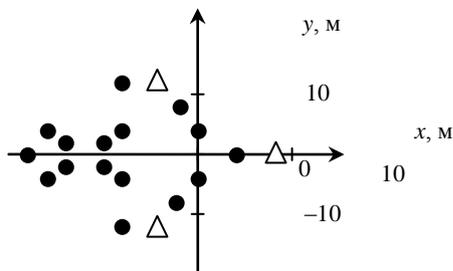


Рисунок 1 - Расположение БТ на цели

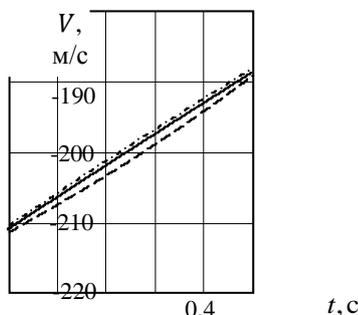


Рисунок 2 – Зависимость радиальной скорости БТ от время наблюдения

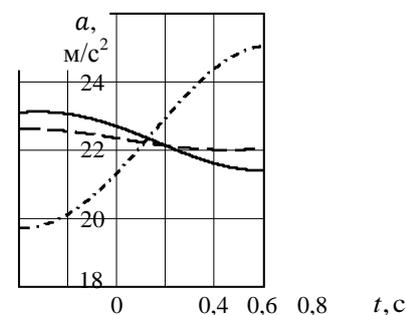


Рисунок 3 – Зависимость радиального ускорения БТ от время наблюдения

Для реализации длительного когерентного накопления (КН) необходимо, чтобы за время КН изменение ускорения цели было меньше, чем разрешающая способность по ускорению  $\Delta a = \lambda / 2T_{\text{КН}}^2$  [1]. Зависимость  $\Delta a(T_{\text{КН}})$  для различных значений длины волны  $\lambda$  РЛС приведена на рис. 4. Сравнивая характерные значения изменения ускорения на рис.3 с величиной разрешающей способности по ускорению на рис.4, можно сделать вывод, что когерентное накопление сигналов, отраженных от отдельных БТ, возможно при относительно небольшой длительности интервала накопления 0,05...0,1 с. При дальнейшем увеличении времени КН отраженный сигнал будет мигрировать в соседние доплеровские фильтры и эффективность когерентного накопления снизится.

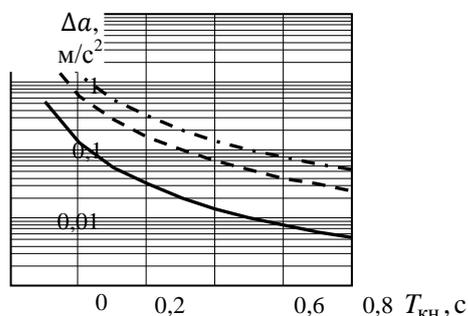


Рисунок 4 - зависимость  $\Delta a(T_{\text{КН}})$  для различных значений длины волны  $\lambda$ .  
Сплошная -  $\lambda = 1$ см, штрих  $\lambda = 5$ см, штрих-пунктир-  $\lambda = 10$ см

проводится суммирование квадратов модулей результатов ВПО после устранения миграции дальности. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 5.

В указанных условиях возможна реализация некогерентного накопления и комбинированного когерентно-некогерентного накопления. Входными данными является матрица  $K \times M$  комплексных отсчетов  $\dot{U}_{k,m}$  принимаемой реализации, где  $m = \overline{1, M}$  - индекс «быстрого» времени в пределах одного периода повторения;  $k = \overline{1, K}$  - индекс «медленного» времени по периодам повторения. Алгоритм комбинированного накопления предполагает устранение МД в каждом периоде повторения в соответствии с ожидаемыми значениями скорости и ускорения  $V_{0r}$ ;  $a_r$  с использованием алгоритмов [1], разделение сигналов на  $Q$  подпачек по  $K_1 = K/Q$  импульсов, вычисление преобразования Фурье (ПФ) по каждой подпачке, выбор спектральных отсчетов с максимальным значением амплитуды и суммирование их квадратов. После этого проводится сглаживание в экспоненциальном фильтре с постоянной времени  $\tau_\phi$ . При некогерентном накоплении



Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма комбинированного и некогерентного накопления

Предлагаемые алгоритмы могут быть использованы в РЛС с высокой разрешающей способностью по дальности для повышения вероятности обнаружения воздушных объектов при низком отношении сигнал/шум на выходе внутрипериодной обработки.

**Список использованных источников:**

1. Базовый алгоритм длительного когерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным / Козлов С. В., Ле Ван Кыонг // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020: материалы Республиканской научно-практической конференции, Минск, БГУИР, 28-29 октября 2020 г.–С. 115-120.
2. Экономичные алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным / Козлов С. В., Ле Ван Кыонг // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020: материалы Республиканской научно-практической конференции, Минск, БГУИР, 28-29 октября 2020 г.–С. 173-177.
3. Доброленский Ю.П. Динамика полета в неспокойной атмосфере. – М.: Машиностроение, 1968. 256 с.
4. ISAR Autofocus Imaging Algorithm for Maneuvering Targets Based on Phase Retrieval and Gabor Wavelet Transform / Hongyin S., Ting Y., Zhijun Q // Remote Sens. 2018, 10, 1810; doi:10.3390/rs10111810.

## ВАРИАНТ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ КОГЕРЕНТНОМ НАКОПЛЕНИИ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА

Ле Ван Кыонг, аспирант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь

Козлов С.В. – д.т.н., доцент

**Аннотация.** Предложен новый вариант оценки ускорения и производной ускорения радиолокационной цели (РЦ), основанный на выравнивании задержек отраженных сигналов (ОС) для различных периодов повторения с точностью, достаточной для их попадания в один элемент разрешения по дальности, частичной компенсации квадратичного фазового набега, обусловленного ускорением цели, построении решающей статистики (РС) для каждого элемента разрешения по дальности на основе когерентного накопления (КН) попарных произведений отсчетов медленного времени и фазового множителя, зависящего от ускорения и производной ускорения РЦ, и некогерентного накопления (НН) квадратов модулей результатов КН для различных сдвигов по времени сигналов в попарных произведениях. Показана возможность компромисса между требованиями к вычислительным ресурсам и потерями при обработке за счет выбора числа суммируемых слагаемых при некогерентном накоплении.

**Ключевые слова.** Ускорение, производная ускорения, миграция дальности, миграция частоты, длительное накопление.

В [1, 2] представлены метод трехмерного масштабированного преобразования для реализации КН и оценки параметров движения для маневрирующих целей при низком ОСШ и алгоритм КН при оценке параметров движения, основанный на разности фаз второго порядка в частотной области. Однако сложное трехмерное преобразование не в полной мере подходит для практических приложений. Кроме того, недостатками подходов [1,2] является снижение точности оценки параметров движения при наложении спектров сигналов, отраженных от нескольких РЦ. В [3] предложены два варианта экономичных в вычислительном плане алгоритмов длительного КН при наличии миграции дальности (МД) и ее производных. Целью настоящей работой является обоснование варианта КН с адаптивностью оценкой параметров движения РЦ, обладающего высокой чувствительностью при относительно небольшом и ситуационно выбираемом объеме вычислений.

Предлагаемый вариант реализуется следующим образом (с обозначениями [1]).

1. Вычисляются спектры  $\dot{G}(F, t_k)$  ОС по «быстрому» времени в  $k = \overline{0, K-1}$  каждом периоде повторения.

2. Проводится компенсация миграции дальности и частичная компенсация миграции доплеровской частоты в каждом периоде повторения в спектральной области с одновременным умножением на КЧХ согласованного фильтра одиночного сигнала [3]. В результате формируется спектры выходных сигналов СФ вида:

$$\dot{G}_1(F, t_k) = \dot{G}_{\text{сф}}(F) e^{j \frac{2\pi f_0}{c} a_s t_k^2} e^{j \frac{2\pi f_0}{3c} a'_s t_k^3} \times e^{j \frac{4\pi}{c} \left( F + \frac{2f_0(V_{0s} + a_s t_k + \frac{1}{2} a'_s t_k^2)}{c} \right) \left( \left( V_{0s} + \frac{f_0}{\mu_c} a_s \right) t_k + \frac{1}{2} \left( a_s + \frac{f_0}{\mu_c} a'_s \right) t_k^2 + \frac{1}{6} a'_s t_k^3 + \frac{c F_{\text{сф}}}{2\mu_c} \right)} \dot{G}(F, t_k). \quad (1)$$

Параметры обработки  $V_{0s}$ ,  $a_s$ ,  $a'_s$  выбираются из условий:

$$\Delta V_{\text{лмд}} = |V_{0r} - V_{0s}| T_{\text{кн}} < \frac{c}{4\Delta f_0}; \Delta a_{\text{квмд}} = \frac{1}{2} |a_s - a_r| T_{\text{кн}}^2 < \frac{c}{4\Delta f_0}; \Delta a'_{\text{кубмд}} = \frac{1}{6} |a'_s - a'_r| T_{\text{кн}}^3 < \frac{c}{4\Delta f_0}, \quad (2)$$

что определяет требуемый шаг сетки по радиальной скорости, ускорению и производной ускорения

$$\Delta V_{\text{лмд}} = \frac{c}{4\Delta f_0 T_{\text{кн}}}; \Delta a_{\text{квмд}} = \frac{c}{2\Delta f_0 T_{\text{кн}}^2}; \Delta a'_{\text{кубмд}} = \frac{3c}{2\Delta f_0 T_{\text{кн}}^3}. \quad (3)$$

Для ширины спектра сигнала  $\Delta f_0 = 10$  МГц и  $T_{\text{кн}} = 1$  с получим  $\Delta V_{\text{лмд}} = 7,5$  м/с,  $\Delta a_{\text{квмд}} = 15$  м/с<sup>2</sup>,  $\Delta a'_{\text{кубмд}} = 45$  м/с<sup>3</sup>. Полученное значение производной радиального ускорения практически не встречается для реальных РЦ, поэтому компенсацией КубМД можно пренебречь, приняв в (1)  $a'_s = 0$ .

Требуемое число каналов составит  $N = \frac{4|V_{\text{max}}| \cdot |a_{\text{max}}|}{\Delta V_{\text{лмд}} \Delta a_{\text{квмд}}}$ , где  $|V_{\text{max}}|$ ,  $|a_{\text{max}}|$  - модули

максимальных значения модулей скорости и ускорения. Так, например, при обнаружении квадрокоптера при  $|V_{\text{max}}| = 50$  м/с,  $|a_{\text{max}}| = 30$  м/с<sup>2</sup> получим  $N = 53$  канала обработки.

3. После обратного преобразования Фурье получим временное представление выходного сигнала в каждом периоде повторения при компенсированной миграции дальности и частично компенсированном квадратичном фазовом набеге:

$$\dot{S}_1(t_m, t_k) = F^{-1} \{ \dot{G}_1(F, t_k) \} = \text{Asinc}(\Delta f_0(t_m - \tau_0)) e^{j \frac{4\pi}{\lambda} V_{0r} k T_r} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (a_s - a_r)(k T_r)^2} e^{j \frac{2\pi}{3\lambda} a'_r (k T_r)^3}. \quad (4)$$

Составив для каждого отсчета  $m$  быстрого времени попарные произведения отсчетов медленного времени, отличающихся на  $\chi$  периодов повторения, получим:

$$\dot{S}_1(t_m, t_{k-\chi}) \dot{S}_1^*(t_m, t_k) = A^2 e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} V_{0r} \chi T_r} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} \chi^2 T_r^2} e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} (a_s - a_r) T_r^2 \chi k} e^{j \frac{2\pi}{3\lambda} a'_r T_r^3 ((k-\chi)^3 - k^3)}.$$

Эти попарные произведения после компенсации кубического фазового множителя (при необходимости) для различных значений  $k$  могут быть накоплены когерентно, а результат для различных значений  $\ell$  в диапазоне  $\ell = 1 \dots \chi_{\text{нн}}$  - некогерентно, что приводит к решающей статистике вида

$$\psi(\delta a, a'_r, m) = \sum_{\chi=1}^{\chi_{\text{нн}}} \left| \sum_{k=\chi}^{K-1} \dot{S}_1(t_m, t_{k-\chi}) \dot{S}_1^*(t_m, t_k) e^{j \frac{4\pi}{\lambda} \delta a T_r^2 \chi k} e^{-j \frac{2\pi}{3\lambda} a'_r T_r^3 ((k-\chi)^3 - k^3)} \right|^2, \quad (5)$$

где  $\delta a = a_s - a_r$ , и совместной оценке параметров  $\delta a$ , производной ускорения  $a'_r$  и номера отсчета быстрого времени на интервале интервалах  $m \in (m_1, m_2)$ , где находится может находиться РЦ:

$$(\hat{\delta a}, \hat{a}'_r, \hat{m}) = \underset{\delta a, a'_r, m}{\text{argmax}} \psi(\delta a, a'_r, m). \quad (6)$$

Максимизация (6) ведется в областях  $\delta a \in [-\Delta a_{\text{квмд}}/2, \Delta a_{\text{квмд}}/2]$ ,  $m \in [m_1, m_2]$  и заданной области изменения  $a'_r$ , после чего решается задача стабилизации уровня ложных тревог и обнаружения РЦ. Для расчета (5) целесообразно использовать дробное преобразование Фурье.

На рис. 1 показан характерный вид РС при  $a_r' = 0$  для отсчета  $m$  быстрого времени, где находится ОС, на рис. 2 – вид РС при одновременном поиске по ускорению и его производной. В табл. 1 приведены оценки частоты правильного обнаружения РЦ от параметра  $\chi_{HH}$  ( $a_r' = 0$ ). Расчеты проводились для пачки из  $K=100$  импульсов при отношении сигнал/шум по пачке 18 дБ.

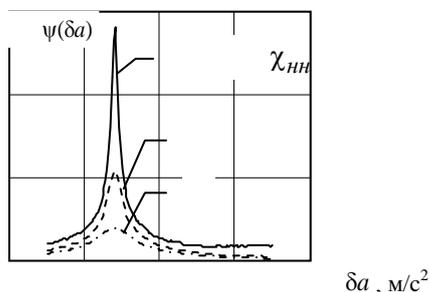


Рисунок 1 – Вид РС для разных значений  $\chi_{HH}$

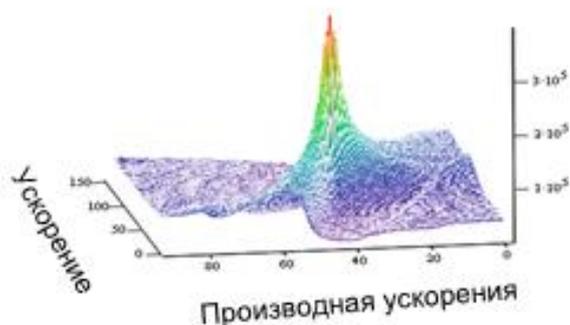


Рисунок 2 - Форма РС при одновременном поиске по ускорению и его производной

Таблица 1- Частота обнаружения РЦ для различных значений числа  $\chi_{HH}$

$\chi_{HH}$	1	2	3	4	5	6	7	10	15
Частота обнаружения РЦ	0,15	0,23	0,39	0,50	0,62	0,78	0,79	0,91	1,0

Параметр  $\chi_{HH}$  определяет вычислительную сложность оценки параметров движения, которая растет линейно от  $\chi_{HH}$ , поэтому выбор указанного параметра является компромиссным между требованиями к вычислительным ресурсам и потерями энергии полезного сигнала при обработке.

**Список использованных источников:**

1. Radar High-Speed Maneuvering Target Detection Based on Three-Dimensional Scaled Transform / Zheng J.B., Liu H.W., Liu J., Du X.L., Liu Q.H // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens. 2018, № 11. Pp. 2821–2833.
2. Coherent Integration for Radar High-Speed Maneuvering Target Based on Frequency-Domain Second-Order Phase Difference / Jin K., Lai T., Wang Y., Li G., Zhao Y // Electronics 2019, № 8. <https://doi.org/10.3390/electronics8030287>.
3. Экономичные алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным / Козлов С. В., Ле Ван Кыонг // материалы Республиканской научно-практической конференции, Минск, БГУИР, 28-29 октября 2020 г. С. 173-177.

## ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ ДО БЛА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ДОПЛЕРОВСКИХ СДВИГОВ ЧАСТОТ В БИСТАТИЧЕСКОЙ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Легкоступ В.В., Кашкин А.Ю.

ОАО «АЛЕВКУРП»

д. Королев Стан, Минский район, Республика Беларусь

Маркевич В.Э. – канд. техн. наук

**Аннотация.** Разработана методика оценки расстояния между БЛА и разностно-дальномерной навигационной системой при движении БЛА вдоль гиперболы положения с помощью измеряемых доплеровских сдвигов частоты навигационных сигналов.

**Ключевые слова.** БЛА, разностно-дальномерная навигационная система, наведение по гиперболе, измерение дальности.

В [1] рассматривается метод наведения беспилотного летательного аппарата (БЛА) в точку цели с помощью разностно-дальномерной навигационной системы путем вывода БЛА на гиперболу положения, проходящую через точку цели с последующим его движением вдоль заданной гиперболы (рисунок 1). Такой метод наведения позволяет уменьшить на одну количество передающих

навигационных позиций и использовать для наведения на плоскости две позиции. При этом синтезируя контур управления БЛА по методу Лётова-Калмана (линейно-квадратичный) или синергетически можно заключить, что для приближенного к оптимальному закону наведения требуется знание дальности от БЛА до навигационной системы.

В статье оценку дальности предлагается осуществить через измерения доплеровских сдвигов частоты принимаемых радионавигационных сигналов для случая движения БЛА вдоль гиперболы положения, на которой находится цель, двигаясь через базу бистатической разностно-дальномерной навигационной системы. Методика оценки дальности может быть следующей: на борту БЛА производится оценка двух доплеровских сдвигов частот навигационного сигнала. В момент пролёта БЛА через линию базы доплеровские сдвиги окажутся близкими к нулевым. В этот момент начинается интегрирование проекций вектора скорости БЛА на линии, соединяющие БЛА и навигационные позиции, производя оценка и выдачу расстояния между БЛА и навигационной системой.

Кроме того, если на борту БЛА производится оценка собственной скорости полета (с помощью инерциальной навигационной системы или доплеровского измерителя скорости), то имеется возможность оценивать дальность от БЛА до навигационной системы на основании измеряемых доплеровских сдвигов частоты навигационных сигналов и сопоставления их с реальной скоростью БЛА.

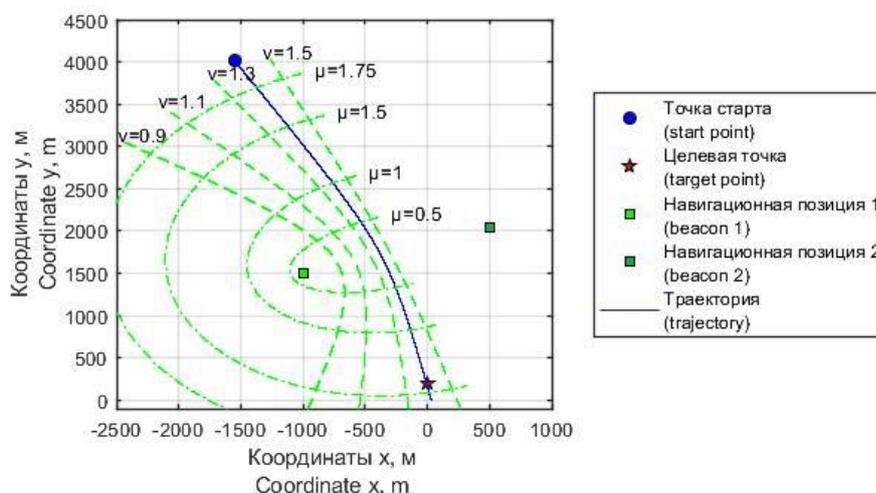


Рисунок 1 – Движение БЛА по гиперболе, проходящей через точку цели

#### Список использованных источников:

1. Легкоступ В.В., Маркевич В.Э. Методика определения кинематической связи между управляющими летательным аппаратом ускорениями и его эллиптическими координатами для задачи наведения по разностно-дальномерной информации // Системный анализ и прикладная информатика. – 2021. – №1

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИГРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК СРЕДСТВО ОБУЧЕНИЯ В УЧРЕЖДЕНИЯХ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Мусский А.И., студент гр.844691

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Парафиянович Т.А. – канд.пед.наук., доцент

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема использования компьютерных игровых технологий как специализированного программного продукта, выполняющего задачу обучения посредством игры, как средства обучения в учреждениях высшего образования, необходимого для повышения эффективности образовательного процесса. Представлены особенности реализации компьютерных игровых технологий как способ организации, позволяющий повысить индивидуальность обучения, мотивированность обучающихся к получению знаний или умений, как вариативная, динамично развивающаяся форма организации целенаправленного взаимодействия участников при педагогическом руководстве со стороны преподавателя, способствующая раскрытию личностного потенциала обучающегося.

**Ключевые слова.** Компьютерные игровые технологии, средства обучения, образовательный продукт, информационно-коммуникационные технологии, специализированный программный продукт, личность обучающегося.

В статье рассматриваются способы применения компьютерных игровых технологий в

образовательном процессе учреждений высшего образования. Целью работы является исследование особенностей использования компьютерных игровых технологий как средства обучения в учреждениях высшего образования на примере учреждения высшего образования Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

Внедрение информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в образовательный процесс привело к появлению новых методов и форм проведения занятий, а так же позволило расширить диапазон возможностей традиционных форм обучения путем использования образовательных продуктов, разработанных на основе ИКТ (учебно-методические мультимедиа материалы, удаленные занятия и лабораторные практикумы, компьютерное тестирование, тренажеры, электронные учебные пособия и т.д., а также компьютерные дидактические игры) [1, с. 1]. Информационно-коммуникационные технологии включают в себя целый арсенал средств интенсификации образования. Под интенсификацией учебного процесса мы понимаем создание оптимальных психолого-педагогических и организационных условий познавательной деятельности обучающихся, увеличение дозы знаний на единицу времени на основе применения передовых ИКТ; использование идей педагогики сотрудничества и игровых технологий и методов обучения.

Одним из быстро развивающихся направлений является использование компьютерных игровых технологий в процессе обучения. Игра так или иначе всегда присутствовала в обучении. Но в последние годы произошел рост интереса к компьютерным играм, показавший, что использование компьютерных игровых технологий является одним из ключевых трендов образования [2].

Компьютерные игровые технологии – специализированный программный продукт, выполняющий задачу обучения посредством игры. Отличием компьютерных игровых технологий от других образовательных технологий, основанных на принципах игры, является применение подходов, характерных для компьютерных игр, с целью повышения вовлеченности обучающихся в процесс обучения [3].

Выделяют следующие виды компьютерных игровых технологий [4]:

1. Программа-тренажер. Программный продукт, целью которого является формирование определенных навыков или закрепление какой-либо темы, позволяющие организовать индивидуальный подход и дать возможность обучающимся выполнять задания в оптимальном темпе и режиме. В БГУИР подобные тренажеры служат для развития скорости набора текста.

2. Виртуальная лаборатория. Программный продукт, который позволяет познакомить обучающихся с научными понятиями путем выполнения деятельности в виртуальной среде.

3. Готовые программные продукты (обучающие компьютерные игры), использование которых способствует повышению интенсивности и эффективности образовательного процесса на различных занятиях. Данная технология удобно тем, что там, как правило, уже представлены правила начисления бонусов, составления таблиц, рейтинга и т.д., что упрощает процесс оценки знаний.

4. Онлайн среда разработки учебных заданий в игровой форме: виртуальные модели.

Компьютерные игровые технологии оказывают большое влияние на развитие познавательной деятельности обучающихся. В результате систематического их использования в учебном процессе формируются такие процессы мышления как сравнение, анализ, умозаключение и т.д. [1, с. 1].

Создание компьютерных игровых технологий, требует совместной и слаженной работы специалистов разных профессиональных направлений и варьируется в зависимости от сложности реализуемого программного продукта. К таким специалистам можно отнести:

– дизайнер пользовательского опыта отвечает за функции, адаптивность программного продукта и то, какие эмоции программный продукт вызовет у пользователя при использовании;

– дизайнер пользовательского интерфейса определяет основные элементы программного продукта, с которыми будет взаимодействовать пользователь;

– художник или аниматор формирует графическую составляющую программного продукта;

– дизайнер игровых сцен аккумулирует полученную на предыдущих итерациях разработки информацию и формирует на ее основе игровую сцену;

– инженер-программист формирует программную логику игры;

– специалист по тестированию проверяет полученный программный продукт на наличие отклонений от первоначально поставленных требований [2].

Ключевую роль в создании программных продуктов, реализующих компьютерные игровые технологии в образовательном процессе, играет преподаватель т.к. именно перед преподавателем стоит цель контроля соблюдения следующих условий [5, с. 3]:

– соответствие программного продукта образовательным целям;

– доступность для обучающихся данного этапа подготовки;

– допустимость интерпретации программы образовательного процесса.

Существенную роль в разработке компьютерных игровых технологий имеет оптимальное сочетание традиционных правил составления игр с достоинствами и ограничениями компьютера, связанных с психофизиологическими особенностями обучающихся; выбор материала для проектирования игр – лучше всего фактологического или понятийного характера; жесткая селекция

вопросов применительно к определенной аудитории; разработка вариантов одного и того же игрового задания с целью создания у каждого из обучающихся иллюзии персональной игровой ситуации в рамках образовательного процесса; первоначальное определение учебных потребностей для эффективного адаптивирования [6].

Таким образом, компьютерные игровые технологии – новый способ организации позволяющий повысить индивидуальность обучения, а также мотивированность обучающихся к получению знаний или умений, это вариативная, динамично развивающаяся форма организации целенаправленного взаимодействия всех участников при педагогическом руководстве со стороны преподавателя. Игровые технологии раскрывают личностный потенциал студента: каждый участник может продиагностировать свои собственные возможности в отдельности и в совместной деятельности с другими участниками. Студенты становятся творцами не только профессиональных ситуаций, но и "создателями" собственной личности. Они решают задачи самоуправления, ищут пути и средства оптимизации профессионального общения, выявляют свои недостатки и предпринимают меры по их устранению. В этом им помогает преподаватель. При подготовке игры преподаватель, как правило, рекомендует им попытаться мыслить за своего персонажа, продумать подготовительный этап так, как продумал бы его специалист. В то же время студент учится преодолевать трудности вербального (словесного) и невербального (языка жестов) общения. Основным критерием в создании качественного программного продукта, предназначенного для учреждения высшего образования, являются требования преподавателя к разработке технологии т.к. он формирует цели и задачи поставленные перед обучением. Научно-методическое обеспечение учебных дисциплин, сочетание традиций и инноваций, интеграция учебной и внеучебной деятельности, субъект-субъектное взаимодействие, построенное на взаимосвязях «преподаватель – студент» позволяют нам задать круг ценностей и способствовать формированию их личностных качеств студентов [7]. Выбор той или другой технологии обучения определяется, прежде всего, спецификой содержания учебной дисциплины и способом ее конструирования. Всякая перестройка в структуре учебной дисциплины влечет за собой перемены в способах преподавания и учения. Современное образование ставит перед собой цель «оснащения» будущего специалиста навыками самостоятельного существования в реальном мире.

**Список использованных источников:**

1. Балыкина, Е.Н. Компьютерная дидактическая игра как компонента современных педагогических технологий / Е.Н. Балыкина, А.А. Приборович // Развитие методологических исследований и подготовка кадров историков в Республике Беларусь, Российской Федерации и Республике Польша: сб. науч.ст.; под науч. ред. проф. А.Н. Нечухрина. – Гродно: ГрГУ, 2012. – С. 303–312.
2. Геймификация в образовании [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://psyjournals.ru/jmfp/2016/n3/83892.shtml>. Дата доступа: 02.04.2021
3. Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22236>. Дата доступа: 01.04.2021.
4. Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22236>. Дата доступа: 01.04.2021
5. Полякова В. А., Козлов О. А. Воздействие геймификации на информационно-образовательную среду школы: научная статья. – Журнал «Современные проблемы науки и образования». – 2015. – № 5
6. Треков, А. Проектирование и разработка игр в образовании / А. Треков, С. Машенко // Российский неофициальный сайт Game Maker [Электронный ресурс]. // Режим доступа: <http://gmrus.ru/download/proektirovanie.doc>. – Дата доступа: 02.04.2021.
7. Парафиянович, Т. А. Формирование социально-личностных компетенций студентов университета / Т. А. Парафиянович // Высшее техническое образование : проблемы и пути развития = Engineering education: challenges and developments : материалы IX Международной научно-методической конференции, Минск, 1-2 ноября 2018 года / редкол. : В. А. Богуш [и др.]. – Минск : БГУИР, 2018. – С. 351 – 354. Режим доступа: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/33657>

## МОДУЛЬНЫЙ ПОДХОД КАК ОСНОВА ПЕРСОНАЛИЗАЦИИ ОБУЧЕНИЯ

*Новоселов Н.А., Сабило В.А., студенты группы 844691*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Парафиянович Т.А. – канд.пед.наук, доцент*

**Аннотация.** В тезисах представлен вариант реализации эффективного использования персонализированного обучения путём тестирования студентов автоматизированными системами на предмет задатков, способностей личности и уровня знаний по теме.

**Ключевые слова.** Цифровая трансформация образования, модульный подход, веб-сервисы, онлайн-платформа дистанционного образования, персонализация обучения.

Образование является главным источником знаний и одним из главных инструментов социализации человека, оно включает обучение и воспитание в интересах личности, общества и

государства, направленные на усвоение знаний, умений, навыков, формирование гармоничной, разносторонне развитой личности обучающегося [1]. Роль образования заключается как в трансляции и распространении знаний и культуры в обществе, так и в экономическом росте и научном прогрессе. Образовательный процесс организуется учреждением образования в целях освоения обучающимися содержания образовательных программ. Сегодня система образования не может существовать вне изменений, вызванных цифровой трансформацией общества. Современный подход к подготовке будущих педагогов-программистов, и в целом к решению проблемы кадрового обеспечения инновационной экономики, подразумевает комплексное развитие человеческого капитала [2, с.230]. Цифровая трансформация в сфере образования представляет собой формирование новой цифровой культуры личности и осознанный подход к преобразованию процессов обучения на основе использования современных информационных технологий [2, с.231].

В настоящее время достаточно распространены системы обучения на основе веб-сервисов с записанными занятиями и последующей проверкой знаний (Coursera.org, Stepik.org, внутренние проекты учреждений образования различного уровня), однако они не организуют процесс образования действительно персонализировано, так как не проверяют начальный уровень подготовки обучающегося, преобладающий канал получения и передачи информации, склонности и интересы обучающегося. Мы хотим предложить систему персонализированного обучения, которая в полной мере обеспечивала бы модульный подход к обучению и персонализацию с учётом задатков обучающегося. Мы рассматриваем систему персонализированного обучения как способ проектирования и реализации образовательного процесса, в котором обучающийся выступает субъектом учебной деятельности. Персонализированный подход базируется на положении, что обучающийся учится и развивается лучше, если он мотивирован, активен и если учитываются его индивидуальные особенности. Обучающемуся предоставляется возможность планировать собственную образовательную траекторию, ставить значимые для себя учебные цели, управлять временем и темпом обучения, выбирать задания, способы их решения и проверки, работать индивидуально и в группе, мотивировать себя и других. Система персонализированного обучения могла бы быть в относительно короткие сроки реализована на основе веб-сервиса с удобным интерфейсом, для обеспечения комфортного доступа к учебным материалам с любого устройства, имеющего доступ к сети Интернет.

Особенности предлагаемой системы:

- 1) входное тестирование на определение у обучающегося преобладающего канала восприятия информации (VARK);
- 2) тестирование обучающегося для определения склонностей и интересов личности (в случае заранее разработанной программы обучения может не проводиться, например, в университете);
- 3) модули как основная единица обучения с обязательным зачётом при окончании;
- 4) автоматизированные тесты на основе изученного материала в ходе модуля для контроля знаний;
- 5) материалы в модулях подстраиваются под обучающегося на основе тестирования на преобладающий канал восприятия;
- 6) сертификация по окончании модуля, либо специальности (набора модулей).

Материалы для обучающей системы необходимо подготовить заранее, путём записи на видео, аудио, в виде электронных документов обучающих материалов квалифицированными педагогами. Промежуточные тесты внутри модулей могут как создаваться вручную педагогами, так и генерироваться автоматически. Входное тестирования на определение у обучающегося преобладающего канала восприятия информации производится путём выдачи обучающемуся теста из 16 вопросов, на основании которых выставляются коэффициенты определяющие преобладающие каналы восприятия. Такие тесты разработаны и даже применяются в учебных заведениях. В зависимости от того какие результаты обучающийся получил на основе тестирования система будет отображать контент внутри модулей, который наиболее подходит для восприятия обучающимся. «Модуль – относительно обособленная, логически завершенная часть образовательной программы по специальности, обеспечивающая формирование определенной компетенции (группы компетенций). Компетенция – знания, умения, опыт и личностные качества, необходимые для решения теоретических и практических задач[3]. Модуль как основная единица обучающего материала представляет собой отдельную дисциплину, либо семестр дисциплины, если она слишком обширна для одного модуля. В каждом модуле имеются разделы, представляющие из себя логически завершенные темы внутри модуля, после завершения которых обучающийся получает зачётные баллы, которые необходимы для допуска к итоговому тестированию и сертификации.

Тесты для оценки усвоения материала обучающимся и выставления зачётных баллов должны быть обязательно с элементами случайного распределения вопросов и проверки знаний студента вопросами, которые дестабилизировали бы обучающегося в случае, если материал освоен недостаточно хорошо. Вопросы для тестов преподаватели могут готовить заранее, либо их можно генерировать на основе контента модуля автоматически, но в любом случае их количество должно

быть значительно больше, чем для одного варианта теста. В идеальном варианте – отображать обучающемуся в одном тесте не более 10 вопросов из общего набора в 30-40 вопросов, которые на основе генератора случайных чисел выбираются из общей выборки, при этом один вопрос из выборки обязательно «запутывающий».

Тестирование по окончании модуля становится доступным только после получения обучающимся заданного количества зачётных баллов за пройденные разделы внутри модуля. Этот тест идентичен по структуре с тестами внутри модуля, однако имеет большее количество вопросов, которые выбираются уже из общего перечня вопросов тестов внутри модуля. Тем самым выборка вопросов получается достаточно большой, с высокой вероятностью на должном уровне проверить качество усвоенного материала, при этом не создавая дополнительной нагрузки на преподавателя для составления разных вариантов теста, так как они генерируются автоматически.

Преимуществами такой системы персонализированного обучения является:

- 1) уменьшение количества требуемого преподавательского состава путём автоматизации большинства процессов связанных с контролем знаний и передачей информации. Педагог должен лишь записать материал для модуля и загрузить в систему;
- 2) возможность быстрой смены образовательной программы в соответствии с текущими требованиями рынка труда;
- 3) мобильность обучающихся;
- 4) возможность организовать модульное обучение на дистанционной основе и в удобное для обучающихся время;
- 5) персонализация обучения на основе способностей и интересов обучающегося повышает качество усвоения информации;
- 6) надёжная система подтверждения уровня знаний через промежуточные и итоговые тесты;
- 7) возможность создания системы доступного образования для людей с ограниченными способностями по средствам веб-технологий (A11Y);
- 8) снижение затрат на образование;
- 9) возможность реализации корпоративных курсов для коммерческих организаций, связанных со сферой обучения.

Таким образом, образование ориентировано на требования стандартов, оптимизацию подготовки специалистов, обеспечение качества, развитие дистанционных и сетевых форм обучения, повышение мобильности, формирование фундаментальных знаний обучающихся для их практического применения. В настоящее время существуют и разрабатываются новые технические средства, обучающие онлайн-платформы, благодаря которым образовательный процесс становится более интересным, современным и продуктивным.

**Список использованных источников:**

1. Кодекс Республики Беларусь об образовании от 13.01.2011 № 243-З (с изм. и доп.) // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2011. – № 8/24152;
2. Парафиянович, Т. А. Дистанционные образовательные технологии в формировании универсальных компетенций будущего педагога-программиста / Парафиянович Т. А., Мурашкина З. Н. // Дистанционное обучение – образовательная среда XXI века : материалы XI Международной научно-методической конференции, Минск, 12-13 декабря 2019 г. / редкол. : В. А. Прытков [и др.]. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 230-231
3. Образовательный стандарт высшего образования I ступени от 22.12.2018 №124 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2018. - №8/33799;
4. Вдовина Светлана Борисовна Персонализированное образование: проблемы и перспективы // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2015. №1.

Токтарова Вера Ивановна, Маматов Дмитрий Раулевич Реализация модели адаптивного обучения на основе познавательных стилей // Теория и практика общественного развития. 2015. №8.

## ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОЛИНГВИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

*Петроченко М.С., студент гр.944691*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Парафиянович Т.А. – канд. пед. наук, доцент*

**Аннотация.** Будущий педагог-программист, освоивший содержание образовательной программы по специальности, должен обладать комплексом компетенций: универсальными, базовыми профессиональными и специализированными компетенциями. В тезисах ведущим в образовательном процессе выступает личностно-ориентированный подход, также предлагается познакомиться с нейролингвистическим подходом обучения в образовательном процессе - как педагогическом методе, базирующемся на умении общаться и оказывать влияние на окружающих,

**Ключевые слова.** Образовательный процесс, образовательные программы по специальности, специалист, нейролингвистический подход, нейролингвистическое программирование, умение эффективно общаться и оказывать влияние на окружающих, педагог, обучающийся.

В настоящее время одной из основных задач современного образовательного процесса является подготовка компетентного, гибкого, конкурентоспособного специалиста, способного к продуктивной профессиональной деятельности, к быстрой адаптации в условиях информатизации и цифровизации экономики. Одним из объектов профессиональной деятельности будущего педагога-программиста является образовательный процесс в учреждениях профессионально-технического, среднего специального и высшего образования, что требует от него социально-профессиональной и практико-ориентированной компетентности и умения использовать полученные знания при решении профессиональных задач.

Современный специалист, освоивший содержание образовательной программы по специальности, должен обладать комплексом компетенций: универсальными, базовыми профессиональными и специализированными компетенциями [1]. Ведущей идеей образования студентов выступает личностно-ориентированный подход, центрирующий внимание на личностном развитии студента, поддержке его конструктивной инициативы в процессе саморазвития, самообучения самоопределения и формировании универсальных компетенций как сегмента блока социально-профессиональной компетентности будущего специалиста [2, с.231].

Проблемная ситуация заключается в том, что на практике далеко не всегда специалисты с высшим образованием способны реализовать подобные задачи, т.к. традиционная подготовка специалистов, ориентированная на формирование знаний, умений и навыков в предметной области, всё больше отстаёт от современных требований.

Основой образования сегодня должны стать не столько учебные дисциплины, сколько способы мышления и деятельности. Необходимо не только выпустить специалиста, получившего подготовку высокого уровня, но и включить его уже на стадии обучения в разработку новых технологий, адаптировать к условиям конкретной производственной среды, сделать его способным к принятию новых решений.

Сложившаяся ситуация побуждает педагогов искать способы совершенствования образовательного процесса. Так как, совершенствование процесса обучения происходит на протяжении всей истории развития педагогики, было выявлено два основных направления совершенствования образовательного процесса, обусловивших два подхода к организации. Информационный подход совмещает в себе тенденции информатизации, массовости, фундаментальности, непрерывности образования. Персонализированный подход ориентирован на личностное знание, уникальное, присущее определенному человеку и потому особо ценное.

Для моделирования успешности студента, нам необходимо рассмотреть использование нейролингвистического подхода в образовательном процессе, когда педагог при правильном использовании техник нейролингвистического подхода в обучении способен значительно улучшить результаты деятельности.

Начнем с того что нейролингвистический подход – это педагогический метод, базирующийся на умении общаться и оказывать влияние на окружающих; это одно из направлений практической педагогики и психологии, рассматривающее копирование вербального и невербального поведения людей, а также взаимосвязь между формами речи, движением глаз, тела и рук, с влиянием на окружающих [3]. Нейролингвистический подход, поможет преподавателю ответить на вопрос: «как мыслит студент?», чтобы оказать психолого-педагогическую поддержку и сопровождение студенту в развитии личности. Мыслительная деятельность представляет систему мыслительных действий, направленных на решение какой-либо проблемы. В то же время она является совокупностью мыслительных операций (анализ, синтез, абстракция, сравнение, обобщение).

Основой данного подхода стало применение разных лингвистических и коммуникативных приемов, напрямую влияющих на сознания студента. Точнее, временно отключающих его и открывающих доступ к самому сокровенному каждого человека – подсознанию. Ведь все неосознаваемое нами исходит именно из него. Практически, это то же самое, что и владение навыками «на автоматизме», когда руки и ноги «сами знают, что и как делать». От всех понемногу были перенята техника копирования поведения человека как на уровне вербального общения, т.е. с помощью слов, так и невербального, предполагающего то же самое, только в качестве «носителя информации» становится неконтролируемое движение рук, мимики и т.п.

Нейролингвистическое программирование (НЛП) – это техника применения методов убеждения и влияния на обучающихся, это комплекс техник, аксиом и убеждений, применяемых главным образом как подход к личностному развитию. Специфичным представлением в применении техники НЛП является принцип определения, что каждый человек обладает внутренними ресурсами для решения собственных проблем [3]. Сегодня наука о нейролингвистическом программировании широко применяется на учебных занятиях при рассмотрении психолого-педагогических задач и ситуаций, при этом современный педагог должен быть способен оказывать достаточное влияние на

окружающих людей, на студентов. В практической деятельности НЛП применяется для установления и осуществления эффективной коммуникации, при профилактике, коррекции моделей поведения обучающихся, позволяет провести их само-программирование на более адаптивные модели поведения на основе особенностей переработки информации. Ещё до формирования принципов НЛП ученые обращали внимание на то, что обучающиеся разделяются на определенные категории по типу восприятия [3]:

1. Визуальная. Люди-визуалы воспринимают окружающий мир через зрительный анализатор (глаз). Они лучше усваивают информацию после наглядной демонстрации материала.

2. Аудиальная. Люди-аудиалы воспринимают окружающий мир через слуховой анализатор. Вся услышанная информация «врезается» в память и стимулирует воображение.

3. Кинестетическая. Кинестетики воспринимают и запоминают информацию лучше, если у них есть возможность дотронуться до объекта или выполнять какие-либо действия самому.

4. Дискретная. Она опирается в своей работе на логический анализ информации, полученной от остальных система. Другими словами, дискрету, чтобы понять материал, отобразить его в своем воображении и запомнить, нужно провести логический анализ данных.

Следующим шагом после определения типа восприятия студента наиболее явной точки воздействия становится прием, который часто называют «разрыв шаблона». При этом НЛП осуществляется в момент, когда испытуемый во время нахождения в ступоре из-за нетипичного поведения собеседника, воспринимает поступающие знания не разумно, а напрямую подсознанием. Например, во время объяснения новой темы, после многократного повторения правильного действия, педагог может сказать неправильно, сделать вид, что оговорился, и студенты тут же заметят это и поправят педагога. Такие приемы как «неполные предложения», «позитивные комментарии» также помогают педагогу легко сконцентрировать на себе внимание группы.

В процессе НЛП могут быть применены и другие правила, например:

– исключать из разговора фразы, предполагающие извинение или пренебрежение к собеседнику. Например, «Извините, но вы на уроке» или «Давайте быстро разберем с вами новую тему»;

– избегать фраз «нападения», вроде «Что за безобразие здесь происходит?».

Лучше прибегнуть к использованию фраз, которые вызывают у студента положительные эмоции:

– упомянуть в разговоре анекдотическую ситуацию, произошедшую с вашим знакомым;

– задать пару вопросов личного характера, способствующих откровенному настрою студента (например, о родителях, самочувствии и т. п.).

Таким образом, нейролингвистический подход в деятельности будущего педагога-программиста предполагает совершать сознательные действия студента, чтобы воздействуя на структуры психики, получить подсознательные результаты, что будет способствовать подготовке в образовательном процессе компетентного, гибкого, конкурентоспособного специалиста, способного к продуктивной профессиональной деятельности.

#### **Список использованных источников:**

1. Образовательный стандарт высшего образования I ступени от 22.12.2018 №124 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2018. - №8/33799;

2. Парафиянович, Т. А. Дистанционные образовательные технологии в формировании универсальных компетенций будущего педагога-программиста / Парафиянович Т. А., Мурашкина З. Н. // Дистанционное обучение – образовательная среда XXI века : материалы XI Международной научно-методической конференции, Минск, 12-13 декабря 2019 г. / редкол. : В. А. Прытков [и др.]. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 230-231

3. Применение нейролингвистического подхода в процессе обучения детей / С. А. Естафьева, Г. Ю. Кушнерёва, А. В. Станкевич [и др.] // Образование и воспитание. — 2017. — № 5 (15). — С. 1-4.

## **ТЕСТИРОВАНИЕ АППАРАТНОГО МОДУЛЯ ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ В СОСТАВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА СЕМЕЙСТВА STM32**

*Пикуза М.О.<sup>1</sup>, аспирант*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Михневич С.Ю. – доцент, к.ф.м.н.*

**Аннотация.** Собран макет для проверки аппаратного модуля генератора случайных чисел в составе микроконтроллера семейства STM32 на основе отладочной платы STM32F4DISCOVERY. Проведено тестирование модуля генератора случайных чисел с использованием набора тестов NIST. Показаны результаты тестирования в зависимости от размера выборки.

**Ключевые слова.** Генератор случайных чисел, микроконтроллер STM32, набор тестов NIST.

Генераторы случайных чисел (ГСЧ), используемые для криптографических приложений, обычно производят последовательности, состоящие из случайных битов нулей и единиц. Существует два основных класса ГСЧ: детерминированный ГСЧ или псевдослучайный и недетерминированный ГСЧ или истинный.

Псевдослучайный ГСЧ состоит из алгоритма, который производит последовательность битов из начального значения, называемого зерном. Значения, производимые псевдослучайным ГСЧ, полностью предсказуемы, если известны зерно и алгоритм генерации, поэтому зерно должно храниться в секрете и генерироваться из истинного ГСЧ.

Истинный ГСЧ создает случайную последовательность, которая зависит от некоторого непредсказуемого физического источника (источника энтропии), не зависящего от воздействия человека.

В некоторых сериях семейства микроконтроллеров STM32 от производителя STMicroelectronics (серии F2, F4, F7, L0, L4, L4+, H7, L5) присутствует встроенный аппаратный модуль истинного ГСЧ.

Истинный ГСЧ, реализованный в микроконтроллерах STM32, основан на аналоговой схеме. Эта схема генерирует непрерывный аналоговый шум, который используется при работе модуля ГСЧ для получения 32-битного случайного числа. Схема состоит из нескольких кольцевых генераторов, выходы которых объединяются методом XOR. Работа ГСЧ синхронизируется специальным источником тактирования с постоянной частотой [1].

Для проверки ГСЧ используются как различные наборы тестов, анализирующие входную последовательность случайных чисел, такие как набор тестов NIST и Diehard, так и тесты, анализирующие сам источник энтропии [2].

В основе тестов NIST лежит понятие нулевой гипотезы, т.е. предположения, что между двумя фактами отсутствует какая-либо взаимосвязь. Существует также альтернативная гипотеза, которая опровергает нулевую гипотезу: т.е. между явлениями взаимосвязь существует. За нулевую гипотезу принимается предположение, что последовательность является истинно случайной, знаки которой появляются равновероятно и независимо друг от друга. Следовательно, если нулевая гипотеза верна, то генератор производит достаточно «хорошие» случайные числа.

Набор тестов NIST содержит в себе 15 тестов. Для тестирования с ГСЧ снимается некоторое число последовательностей заданной длины. При интерпретации результатов тестирования статистика последовательности, снятой с генератора, сравнивается с эталонной и если отклонение больше заданной погрешности  $p$ , то делается вывод, что нулевая гипотеза не верна с большей надежностью. В ходе тестирования по каждому из тестов также проводится проверка доли последовательностей, прошедших статистический тест, и проверка однородности результатов тестирования путем определения распределения значений вероятности  $p$  [3].

Тестирование аппаратного модуля ГСЧ в составе микроконтроллера семейства STM32 проводилось с использованием отладочной платы STM32F4DISCOVER, которая собрана на основе микроконтроллера STM32F407VG, который имеет в своем составе аппаратный модуль истинного ГСЧ [4]. Для тестирования был собран макет, который состоит из отладочной платы STM32F4DISCOVER подключенной к персональному компьютеру с помощью преобразователя интерфейсов TTL-USB, который позволяет отладочной плате подключиться к виртуальному COM-порту персонального компьютера по интерфейсу USB. Микроконтроллер на отладочной плате с помощью модуля ГСЧ производит случайные слова размером 32 бит и передает их по последовательному интерфейсу UART на преобразователь интерфейсов, который ретранслирует полученные случайные слова в виртуальный COM-порт персонального компьютера, в котором полученные числа сохраняются с помощью приложения Терминал.

Тестирование ГСЧ микроконтроллера проводилось с использованием тестов NIST. Для этого с помощью макета было получено и протестировано 12 Мбайт случайных чисел. Результаты тестирования при заданном значении погрешности  $p=0,01$  показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты тестирования аппаратного модуля ГСЧ в составе микроконтроллера STM32

№ п/п	Наименование теста	Результаты 1 (ST) (10x512000 бит)		Результаты 2 (пл) (10x512000 бит)		Результаты 3 (пл) (100x1000000 бит)	
		P-VALUE	PROP	P-VALUE	PROP	P-VALUE	PROP
1	частотный побитовый тест	0.911413	1.000	0.739918	1.000	0.657933	0.990
2	частотный блочный тест	0.534146	1.000	0.122325	1.000	0.657933	1.000
3	тест кумулятивных сумм (ср)	0.436621	1.000	0.825665	1.000	0.508752	0.990
4	тест на последовательность одинаковых битов	0.739918	1.000	0.534146	1.000	0.816537	0.980
5	тест на самую длинную	0.534146	0.900	0.534146	1.000	0.616305	0.970

	последовательность единиц в блоке						
6	тест рангов бинарных матриц	0.739918	1.000	0.213309	1.000	0.616305	0.980
7	спектральный тест	0.534146	1.000	0.991468	0.900	0.171867	<b>0.910*</b>
8	тест на совпадение неперекрывающихся шаблонов (ср)	0.554145	1.000	0.499111	0.977	0.496918	0.982
9	тест на совпадение перекрывающихся шаблонов	0.739918	1.000	0.350485	1.000	0.798139	1.000
10	универсальный статистический тест Маурера	0.739918	1.000	0.066882	1.000	0.066882	1.000
11	тест приближительной энтропии	0.350485	1.000	0.066882	<b>0.700*</b>	<b>0.000070*</b>	<b>0.890*</b>
12	тест на произвольные отклонения (ср)	-	1.000	-	1.000	0.469837	0.982
13	другой тест на произвольные отклонения (ср)	-	1.000	-	1.000	0.403517	0.995
14	тест на периодичность (ср)	0.442315	1.000	0.000319	<b>0.550*</b>	<b>0.000000*</b>	<b>0.735*</b>
15	тест на линейную сложность	0.534146	1.000	0.911413	1.000	0.262249	0.990

В таблице указаны наименования тестов, результаты проверки распределения однородности последовательностей (P-VALUE) и результаты проверки доли прошедших тест последовательностей (PROP). В таблице представлены три набора результатов: результаты тестирования выборки размером 10 последовательностей по 512000 бит, приведенные производителем микроконтроллера (Результаты 1) [1], результаты тестирования такой же выборки, полученные с помощью отладочной платы (Результаты 2) и результаты тестирования с большей выборкой: 100 последовательностей по 1000000 бит (в соответствии с рекомендациями NIST [3]), полученные с помощью отладочной платы (Результаты 3).

Для некоторых тестов, в которых проводится несколько серий тестирования, результаты указаны как среднее арифметическое результатов каждого из тестирования. Так же для некоторых тестов результат не удалось получить из-за маленькой выборки.

Для выборки в 10 и 100 последовательностей при заданном значении погрешности  $p=0,01$  значение PROP должно быть в пределах 0,895 .. 1 и 0,960 .. 1 соответственно, а P-VALUE должно быть  $\geq 0.0001$  независимо от количества последовательностей [3]. Результаты выходящие за рамки допустимых отмечены «\*».

Как видно из результатов, реальные характеристики ГСЧ в составе микроконтроллера немного хуже заявленных производителем, однако большинство тестов были успешно пройдены даже при увеличенной выборке, что говорит о возможности использовать ГСЧ в составе микроконтроллера во многих применениях.

**Список использованных источников:**

1. AN4230 STM32 microcontroller random number generation validation using the NIST statistical test suite: Application note. - STMicroelectronics, 2010. – 27 p.
2. Herrero-Collantes, M. Quantum Random Number Generators / M. T. Crane // Reviews of Modern Physics. – 2017. – №89(1). – 54 p.
3. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications. – National Institute of Standards and Technology, 2010. – 131 p.
4. UM1472 Discovery kit with STM32F407VG MCU: User manual. - STMicroelectronics, 2020. – 32 p.

УДК 628.396

## СОСТАВ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ – ЦИФРОВОМУ «ДВОЙНИКУ» ПОДСИСТЕМЫ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ СПУТНИКА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Радионович В.В.<sup>1</sup>, аспирант

Лобан М.А.<sup>2</sup>, инженер

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** В статье рассмотрена актуальность создания цифрового двойника (ЦД) радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) спутника системы дистанционного зондирования Земли. Обоснованы основные требования, предъявляемые к ЦД РСА. Приведена структура ЦД, перечень моделируемых составных частей аппаратуры и алгоритмов обработки информации. Рассмотрен вопрос выбора языка программирования высокого уровня для реализации ЦД.

**Ключевые слова.** Цифровой двойник, синтезирование апертуры, активная фазированная антенная решетка, диаграммообразование, среда программирования.

Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) космического базирования являются эффективным средством получения оперативной и долговременной информации о состоянии и динамике объектов и районов земного шара в глобальных и региональных масштабах независимо от метеорологических условий и времени суток [1]. Именно из-за независимости от погоды и освещенности, а также из-за высокого разрешения получаемого изображения, для решения задач ДЗЗ используются радиолокаторы с синтезированием апертуры (РСА) [1,2].

Создание цифровых двойников, а также моделирование различных процессов, протекающих в оборудовании, очень важно из-за экономии времени и ресурсов. Для обеспечения надежности и безопасности дорогостоящего высокотехнологичного оборудования необходимо резкое увеличение числа испытаний, которые, несомненно, быстрее и дешевле делать в виртуальном пространстве на стадии проектирования, чем на реальном оборудовании. А если речь идет об аппаратуре космического базирования, то практические испытания провести еще сложнее, так как необходимо еще воссоздавать условия наблюдения земной поверхности с заданной орбиты. Поэтому разработка цифрового двойника аппаратуры радиолокационного наблюдения космического базирования является, безусловно, актуальной задачей.

У самого термина «цифровой двойник» довольно много толкований [3-6, 8] – от самого широкого, когда цифровым двойником называют все проекты, где создают любую цифровую копию живого или неживого объекта, проекта или системы, до специализированного наукоемкого толкования, когда цифровыми двойниками называют решение, которое соответствует выполнению целого ряда жестких требований, направленных на повышение уровня адекватности: наличие мультифизической модели, моделирование материалов на микро- и макроуровне, одновременное наличие физических и статистических моделей, основанных на эксплуатационных данных, получаемых от датчиков, передаче данных физическим и цифровым двойниками в реальном времени.

В некоторых определениях [4, 5] речь идет только о виртуальной части (модели), состоящей из двух частей: «цифровой мастер», «цифровая тень». Цифровой мастер содержит информацию, достаточную для изготовления аппаратуры (системы) с определенными свойствами, а цифровая тень – набор данных, получаемых от датчиков, и модель, которая позволяет прогнозировать свойства объекта в определенных пределах [4]. Применительно к РСА цифровой мастер должен содержать информацию о том, как изготавливать радиолокатор: массогабаритные параметры самого спутника, антенной решетки, панелей солнечных батарей, конкретные характеристики по стабильности частоты опорного генератора, емкости аккумуляторных батарей и т.д. А цифровая тень, используя информацию от датчиков и модель, способна прогнозировать работоспособность отдельных модулей и системы при решении как известных, так и новых задач, а также получать количественные оценки эффективности решения указанных задач в различных условиях съемки и в различных сигнально-помеховых ситуациях.

Такое многообразие толкований и определений имеет тесную связь с развитием возможностей моделирования. На сегодняшний день процесс моделирования можно улучшить и упростить средствами визуализации, использованием готовых библиотек, модулей, а также программ для поиска ошибок. Поэтому моделирование является обязательной частью проектирования, а уровень детализации с использованием современных вычислительных средств может быть настолько подробным, что модель можно назвать цифровым двойником. В перспективе, разработанная модель может быть использована и при эксплуатации для контроля состояния оборудования. Исходя из вышесказанного, можно разбить процесс эволюции концепции цифровых двойников как показано на рисунке 1 [4].

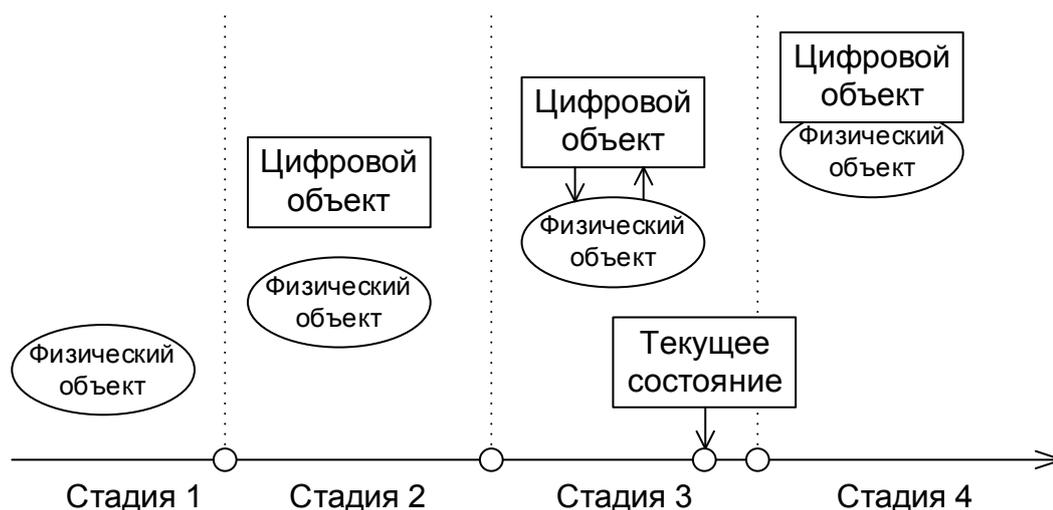


Рисунок 1 – Эволюция концепции цифровых двойников [4]

Первый этап развития цифровых двойников соответствует периоду, когда физические объекты создавались без цифрового прототипа. Второй этап относится к периоду, когда искусственные объекты проектировались с помощью цифровой модели, которая использовалась только на стадии создания объекта, что на рисунке 1 отражено самостоятельным (без пересечения) существованием физического и цифрового объекта. На третьем этапе начинается взаимодействие (обмен информацией) между физическим и цифровым двойниками. И, четвертый – характеризует сближение и «пересечение» физического и цифрового двойников, когда информационный обмен и обновление цифрового и физического двойников идет практически в реальном времени.

Создание цифрового двойника для РСА необходимо для того, чтобы проверить будет ли хотя бы модель функционировать, насколько достоверные данные будут от цифрового двойника, как будут взаимодействовать различные модули между собой, будет ли осуществляться правильное функционирование при различных новых и (или) нестандартных ситуациях.

Для создания цифрового двойника какого-либо оборудования необходимо проанализировать его составные части. Структурная схема бортовой РСА совместно с другими составными частями взаимодействующего оборудования, приведена на рисунке 2.

После определения структуры оборудования необходимо определить перечень задач по математическому моделированию для каждого их составных блоков. Например, модель модуля активной фазированной антенной решетки (АФАР) [13-17] должна обеспечивать решение следующих задач:

- расчета диаграммы направленности (ДН) модуля на передачу как функции частоты на горизонтальной или вертикальной поляризации с учетом ошибок установки амплитудно-фазового распределения на апертуре и межмодульной задержки зондирующих сигналов;
- расчет ДН на прием на горизонтальной и вертикальной поляризации как функции частоты с учетом ошибок установки амплитудно-фазового распределения на апертуре;
- формирование траекторного сигнала на выходе модуля с учетом внутреннего шума.

Модель процессора обработки сигналов должна обеспечить воспроизведение процессов анализа помеховой обстановки, формирование весовых коэффициентов адаптированных приемных каналов, весового суммирования сигналов модулей АФАР с учетом неравномерностей комплексных частотных характеристики приемных каналов, ошибок синхронизации по времени (джиттера) и частоте, разбаланса квадратурных смесителей и т.д. На выходе процессора обработки сигналов должны формироваться адаптированные траекторные сигналы в суммарном и разностных или интерферометрических приемных каналах с заданным положением фазовых центров.

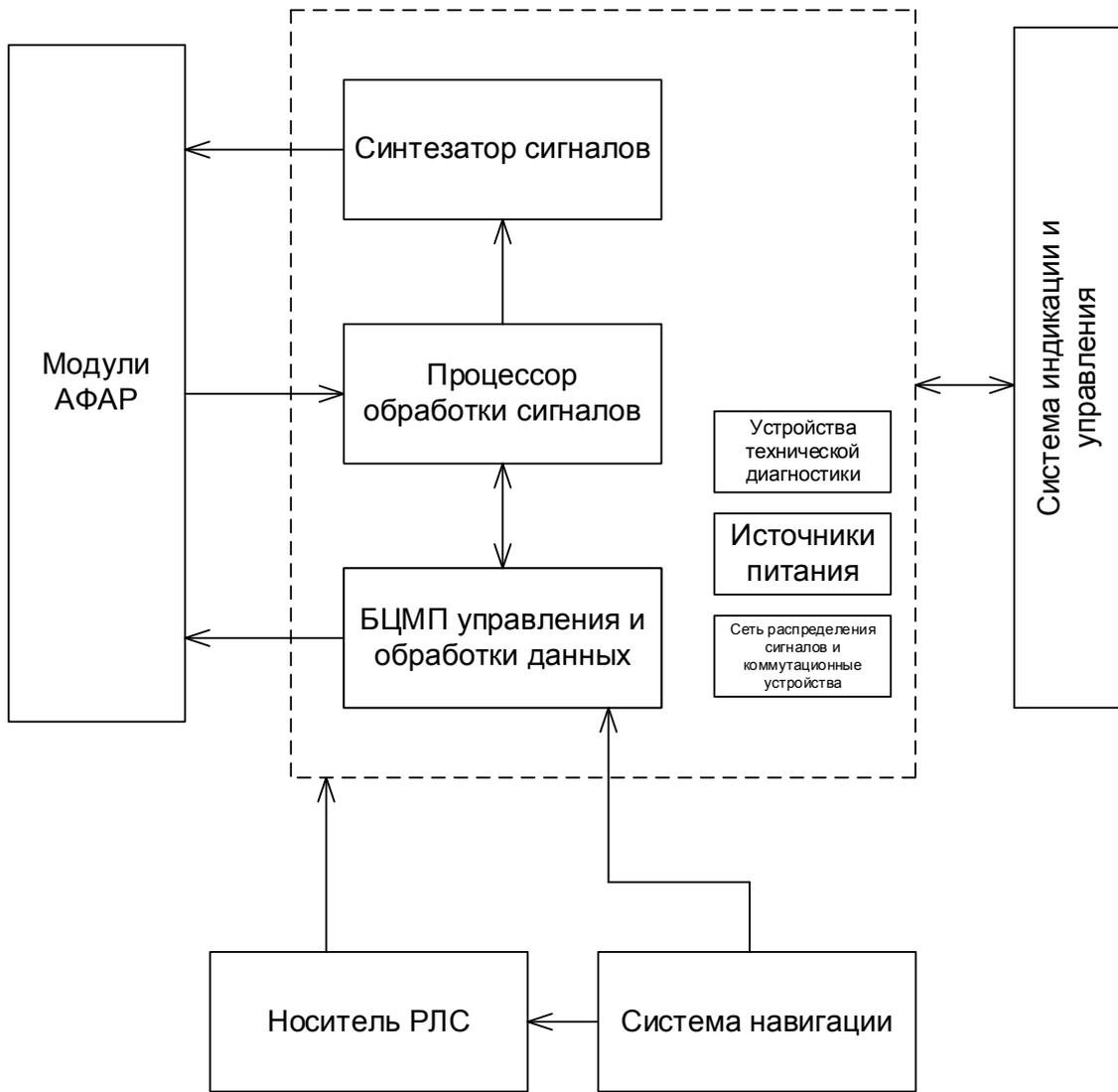


Рисунок 2 – Структурная схема бортовой аппаратуры РСА [2]

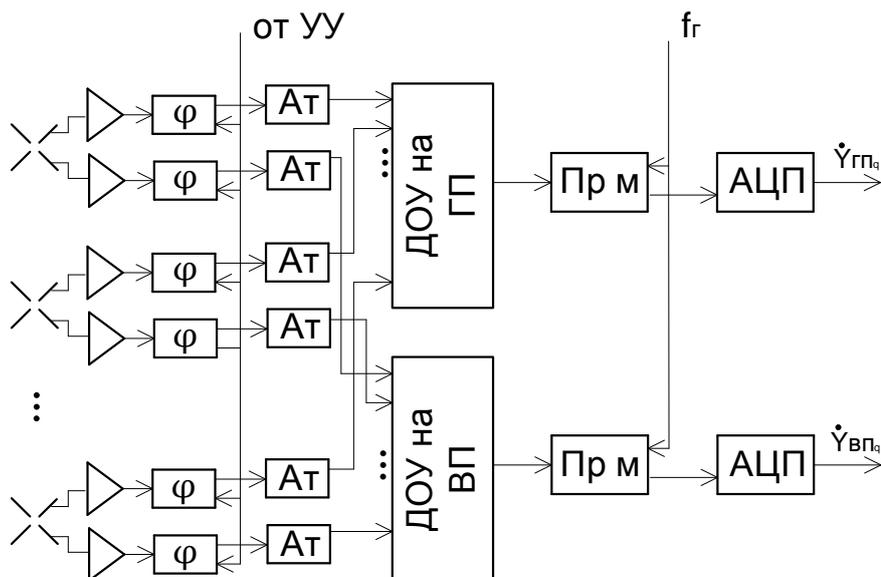


Рисунок 3 – Структурная схема модуля АФАР (приемные канал)

Модель синтезатора сигналов должна выдавать математический эквивалент колебаний заданной частоты, частот модуляции и преобразования для модулей АФАР с учетом ошибок при

распределении указанных сигналов между модулями АФАР. Так как модель является абстракцией, то запрограммировать высокостабильный опорный генератор, который присутствует в реальном синтезаторе частот, не составляет труда. Это обеспечит взаимную когерентность всех сигналов.

БЦВМ управления и обработки данных обеспечивает согласование работы и режимов всех устройств РСА и ее носителя в соответствии с задачей, а также обработку данных с выхода процессора.

Таким образом, математические модели модулей АФАР, синтезатора частот, БЦВМ управления и обработки, должны работать по следующему алгоритму. Формирование многоканального траекторного сигнала на двух поляризациях осуществляется в цифровых двойниках модулей АФАР. ЦД модулей АФАР взаимодействуют с ЦД опорного генератора и распределительной системы сигналов временной синхронизации и опорной частоты. Сформированный многоканальный сигнал является исходными данными для функционирования ЦД процессора обработки сигналов. На выходе ЦД процессора обработки формируются сигналы адаптированных приемных каналов и осуществляется их сжатие в согласованном фильтре внутривыходной обработки.

Сформированный многоканальный сигнал сохраняется в памяти и с заданной периодичностью (при нахождении в зоне видимости) передается наземный пункт приема и обработки. Так как объем запоминаемых и передаваемых сигналов очень велик, то осуществляется сжатие сигналов с использованием соответствующего алгоритма адаптивного кодирования. Это сопровождается некоторым снижением качества, что требует разработки соответствующей модели – ЦД алгоритма кодирования.

Дальнейшая обработка проводится в цифровых двойниках наземного пункта приема и обработки информации, где осуществляется декодирование траекторных сигналов, формирование комплексных, амплитудных и фазовых РЛИ на двух поляризациях и измерение параметров (например, высоты точек земной поверхности) [1,2,11].

Цифровой двойник наземной аппаратуры РСА обязан поддерживать и различные режимы работы. На сегодняшний день в РСА космического базирования реализуются практически все типовые режимы съемки мониторинга земной поверхности. Наиболее распространенными и перспективными из них являются режимы [11]:

- полосовой съемки;
- телескопической (прожекторной) съемки;
- обнаружения наземных движущихся целей;
- видео РСА;
- когерентного обнаружения изменений;
- интерферометрической съемки;
- поляриметрический режим съемки.

Данные режимы уже активно используются в различных РСА для решения широкого круга задач – это и получение детальных РЛИ, и обнаружение наземных движущихся целей, непрерывное наблюдение заданного района и изменений обстановки в нем, также оперативная оценка отражающих свойств объекта при изменении ракурса его обзора, получение информации о высоте местности и объектов, которая может использоваться для визуализации трехмерных топографических изображений и обнаружения замаскированных объектов и т.д. [12].

Для адекватного воспроизведения обработки сигналов в наземном пункте необходимы цифровые двойники следующих процессов:

- компенсации линейной, квадратичной и, при необходимости, кубической миграции дальности и миграции частоты;
- формирования комплексных и амплитудных радиолокационных изображений приемных каналов с автофокусировкой (при необходимости) на горизонтальной и вертикальной поляризации;
- некогерентного накопления радиолокационных изображений и фильтрации спекл-шума;
- определение поляризационных параметров и степени когерентности элементов радиолокационного изображения;
- измерения угловых положений точек (пикселей) на радиолокационных изображениях горизонтальной и вертикальной поляризации путем моноимпульсных измерений или развертки интерферометрической фазы;
- преобразования построенных радиолокационных изображений из системы координат «продольная-поперечная дальность» в систему географическую координат; преобразование РЛИ в удобный для пользователя вид («раскрашивание» РЛИ на горизонтальной и вертикальной поляризации).

Разрабатываемые цифровые двойники должны с требуемой степенью детальности воспроизводить функционирование аппаратуры и реализуемых в ней алгоритмов функционирования.

Технологические цифровые двойники реализуются в виде комплекса взаимосвязанных программ (имитационных моделей), написанных на языке программирования высокого уровня. В настоящее время существует множество программных продуктов, которые позволяют осуществить создание ЦД

РСА. Основными из них являются Python, C++, C# и MATLAB. Можно долго рассуждать, какой из языков программирования является лучшим, но в реальности каждый обладает своими достоинствами и недостатками [9].

Python характеризуется простотой и легкостью прочтения кода, также он предоставляет доступ ко многим мощным библиотекам и их функциям. Данный язык программирования имеет большую популярность, поэтому сообщества Python могут дать ответы на вопросы, которые вам необходимы, в публичном доступе. Также язык имеет свои недостатки. Например, трудность в обнаружении ошибок, так как Python является интерпретируемым языком программирования.

В отличие от Python, язык C++ имеет высокие показатели в производительности и имеет легкую структуру кода. В большинстве случаев программы для «цифровых двойников» пишутся на C/C++. C# является одним из наиболее часто используемых языков программирования в производственной отрасли, но разработка программного обеспечения (ПО) ограничена операционной системой Windows. C#, как и Python, предоставляет широкий спектр библиотек.

Для разработки ПО используют кроссплатформенный фреймворк (Qt). Он позволяет запускать написанное с его помощью программное обеспечение в большинстве операционных систем путём простой компиляции программы для каждой системы без изменения исходного кода. Также многие программисты используют интегрированную среду обработки (Visual studio). Она, как и Qt, поддерживает несколько языков программирования. В их числе Python, C, C++, C# и др. В свою очередь Qt поддерживает различные компиляторы, включая набор Visual Studio.

MATLAB — это не просто язык, это целая среда программирования. MATLAB широко используется инженерами для анализа и моделирования своих проектов и алгоритмов, в том числе, создание ЦД. Данная среда характеризуется мощной системой для анализа данных, скоростью написания кода и реализацией сложного моделирования. MATLAB предоставляет возможность параллельных вычислений с использованием графических процессоров (graphics processing unit, GPU).

Существует программная система, которая находится в открытом доступе, использующая совместимый с MATLAB язык высокого уровня – это GNU Octave. Основная миссия данного программного продукта – это быть достойной заменой MATLAB. GNU Octave справляется с задачами лучше остальных открытых математических пакетов, демонстрируя результат сопоставимый с результатами в среде MATLAB.

Подводя итоги, язык программирования Python чаще используется для небольших и быстрых проектов. C# представляет собой баланс между производительностью и быстрыми результатами, но не может использоваться в других операционных системах, кроме как Windows. C++ и MATLAB являются наиболее удобными языками в реализации современных ЦД с требуемой надёжностью и производительностью.

С учетом всего вышесказанного можно обозначить конкретные требования к цифровому двойнику РСА. А именно:

- отражать структуру и характер рабочей миссии физического РСА
- с высокой детальностью воспроизводить функционирование аппаратуры и реализуемых в ней алгоритмов функционирования
- собирать данные о физическом состоянии РСА, и на основании этих данных делать прогноз о его состоянии.

**Список использованных источников:**

1. Леухин А.Н., Безродый В.И., Воронин А.А. Дистанционное зондирование Земли с помощью радиолокаторов с синтезированием апертурой антенны – Марийский государственный университет, г.Йошкар-Ола, 2018, С.25-41.
2. Конратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: «Радиотехника», 2005. – 368 с.
3. Минаев В.А., Мазин А.В., Здирук К.Б., Куликов Л.С. Цифровые двойники объектов в решении задач управления / В.А. Минаев, А.В. Мазин, К.Б. Здирук, Л.С. Куликов // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, №3. С. 68-78.
4. Прохоров А., Лысачев М., Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное / Под ред. А. Боровкова – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.
5. Боровков А.И., Гамзикова А.А., Кукушкин К.В., Рябов Ю.А. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Краткий доклад (сентябрь 2019) – СПб.: ПОЛИТЕХПРЕСС, 2019. – 62 с.
6. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Определение, разработка и применение цифровых двойников: подход Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» Цифровая подстанция. – 2019. - №12. – С. 20-25.
7. Керский Е.В., Балакин Д.А. Моделирование антенного радиоэлектронного комплекса средствами MATLAB и Simulink / Е.В. Керский, Д.А. Балакин // Центр инженерных технологий и моделирования «Экспонента».
8. Здирук К. Б. Применение цифровых двойников в системах управления сложными объектами [Электронный ресурс] // Экстремальные технологии и системы. URL: <https://www.extansy.com/> (дата обращения: 07.07.2019).
9. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 420 с.
10. Демьянов А.В., Губанов Д.В., Лазутин Р.Ю., Алешкин А.П. Модель функционирования космических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны // Вопросы радиоэлектроники. 2017. №9. С. 78-84.
11. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.

12. Балакин Д.А., Керский Е.В. Разработка цифрового двойника радиолокационной станции дальнего обнаружения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020.
13. Корнеева Т. Фазированные антенные решетки – М.: «Электроника:НТБ», 1998. №5-6. С.37-40.
14. Добычина Е.М., Кольцов Ю.В. Цифровые антенные решетки в бортовых радиолокационных системах – М.: Издательство МАИ, 2013. 160 с.
15. Добычина Е.М., Шмачилин П.А. Построение цифровых антенных решеток для современных радиоэлектронных систем // Научно-технические серии. К.3. Активные и цифровые антенные решетки. Коллективная монография; под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2014. 172 с.
16. Balanis C. *Antenna Theory. Analysis and Design*. John Wiley & Sons, Inc. 2016. 1072 p.
17. Воскресенский Д.И., Канащкова А.И., Активные фазированные антенные решетки – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.

UDC 628.396

## COMPOSITION AND BASIC REQUIREMENTS TO THE MATHEMATICAL MODEL - DIGITAL "TWIN" OF THE PRIMARY INFORMATION PROCESSING SUBSYSTEM OF A RADAR STATION WITH SYNTHESIS OF THE SATELLITE APERTURE

*Radionovich V.V.<sup>1</sup>*

*Loban M.A.<sup>2</sup>*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>1</sup>, Minsk, Republic of Belarus*

*Kozlov S.V. – D.Sc.*

**Annotation.** The article discusses the relevance of creating a digital twin (DT) of a radar with synthesized antenna aperture (SAR) of a satellite of the Earth remote sensing system. The basic requirements for the RSA DT are substantiated. The structure of the DT, a list of simulated components of the equipment and algorithms for information processing are given. The issue of choosing a high-level programming language for the implementation of the DT is considered.

**Keywords.** Digital twin, aperture synthesis, active electronically scanned array, diagramming, programming environment.

## АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ СПУТНИКОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

*Лобан М.А.<sup>1</sup>, инженер*

*Радионович В.В.<sup>2</sup>, аспирант*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Козлов С.В. – доктор техн. наук*

**Аннотация.** Приведены результаты анализа тенденций развития радиолокационных станций с синтезированием апертуры (РСА) систем дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). Показано, что развитие РСА ведется в направлениях расширения диапазона рабочих частот, использования многочастотных и многодиапазонных РЛС, повышения разрешающей способности по продольной и поперечной дальности, гибкого использованию режимов получения изображений, повышения помехоустойчивости за счет компенсации внешних помех при цифровом диаграммообразовании, повышения коэффициента полезного действия передатчика и снижение потерь полезного сигнала при приеме.

**Ключевые слова.** Радиолокационная станция, синтезирование апертуры, дистанционное зондирование Земли, тенденции развития.

Космические радиолокационные станции с синтезированием апертуры (РСА) представляют собой интенсивно развивающееся научно-техническое направление, обеспечивающее получение достоверной информации о земной и водной поверхности и размещенных на ней объектах независимо от метеорологических условий, времени суток, естественной освещенности, наличия дыма, пыли, растительного или снежного покрова.

К тенденциям развития РСА, размещаемых на искусственных спутниках систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) можно отнести следующие: расширение диапазона рабочих частот; использование многочастотных РЛС; повышение разрешающей способности по продольной (РСпр) и поперечной (РСпп) дальности; гибкое использование режимов получения изображений; повышение помехоустойчивости за счет компенсации внешних помех при цифровом диаграммообразовании (ЦДО); повышение коэффициента полезного действия (КПД) передатчика и снижение потерь полезного сигнала при приеме.

**Расширение диапазона рабочих частот.** В современных космических РСА, применяемых для ДЗЗ, используют L, S, C, X и Ku диапазоны длин волн [1]. При этом: L-диапазон (от 1 до 2 ГГц) и S-диапазон (от 2 до 4 ГГц) являются предпочтительными для решения задач мониторинга растительного покрова; X- и Ku-диапазоны (от 8 до 12 ГГц и от 12 ГГц до 18 ГГц соответственно) применяются при решении задач двойного назначения и для гражданского географического картографирования. Наибольшее распространение получили X- и Ku – диапазоны рабочих частот, в которых функционирует более 80% всех известных РСА систем ДЗЗ. Эти диапазоны в наибольшей степени соответствуют требованиям получения высокого пространственного разрешения, так как позволяют использовать сигналы с широким (до 200 МГц [2]) спектром. Как правило, реализуемое пространственное разрешение в 3-см диапазоне волн составляет 0,5–1,5 м, что оптимально для решения задач видовой разведки, обнаружения малоразмерных объектов на открытой местности. При увеличении разрешения до 0,3...0,5 м может быть эффективно решена задача распознавания типа объекта. В L и S-диапазонах разрешающая способность из-за ограничений на ширину спектра зондирующего сигнала и время синтезирования составляет 3–7 м. Несмотря на сниженную в сравнении с высокочастотным диапазоном разрешающую способность РСА, функционирующие в низкочастотном диапазоне, имеют некоторые преимущества, так как обеспечивается обнаружение искусственных объектов под листовым покровом, увеличивается стабильность фазы сигнала для интерферометрической обработки при построении карт рельефа и обнаружение изменений на радиолокационных изображениях методом дифференциальной интерферометрии и возрастают возможности оценки объема биомассы и определения типа и состояния растительного покрова.

**Повышение разрешающей способности по продольной (РСпр) и поперечной (РСпп) дальности.** РСпр дальности определяется по формуле:  $\Delta r_{\text{пр}} = \frac{c}{2\Delta f_0}$ , где  $c$  – скорость света ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с). Следовательно, для разрешающей способности по продольной дальности равной 1 м ширина спектра сигнала должна составлять 150 МГц (см. рисунок 1а). РСпп определяется по формуле:  $\Delta r_{\text{пп}} = \frac{\lambda \cdot R_3}{V \cdot T_c \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta}$ , где  $R_3$  – расстояние от спутника до Земли ( $R_3 = 500$  км),  $V$  – скорость движения РЛС ( $V = 8$  км/с)  $\alpha$  – угол между вектором скорости и центром зоны синтезирования ( $\alpha = \pi/2$ ),  $\beta$  – угол отклонения антенны ( $\beta = \pi/9$ ). Соответственно, для разрешающей способности по поперечной дальности равной 1 метр при различных длинах волн ( $\lambda = 0,1$  м, 0,05 м, 0,03 м соответственно) время синтезирования  $T_c$  будет равно 2, 3.5 и 7 секунд (см. рисунок 1б). Реализуемая разрешающая способность по продольной и поперечной дальности современных средств радиолокационного землеобзора космического базирования составляет от долей до сотен метров.

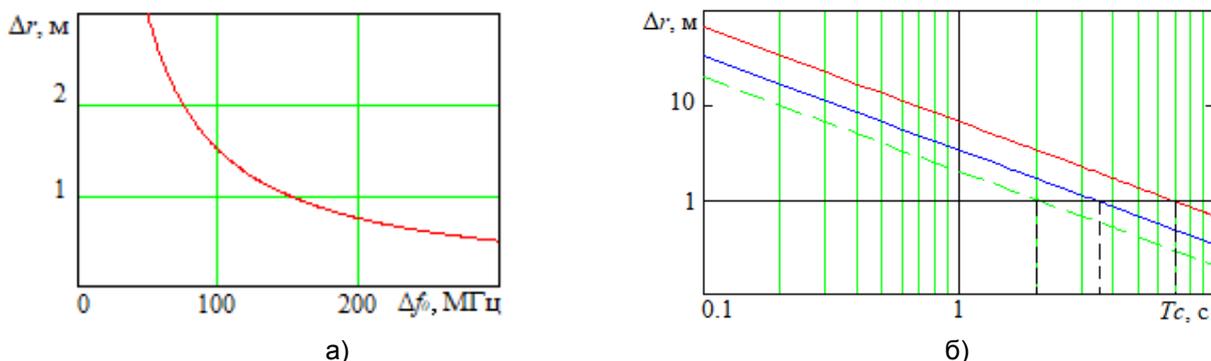


Рисунок 1 – Зависимости разрешающей способности по продольной (а) и поперечной (б) дальностям

**Использование многочастотных (многодиапазонных) РЛС.** Многочастотные РЛС используют зондирование одновременно как в коротковолновой (С, X, Ku), так и в длинноволновой части СВЧ-диапазона длин волн. На сегодняшний день считается целесообразным создание многочастотных РЛС, которые будут объединять достоинства различных диапазонов. Так, например, бортовой комплекс SIR-C/X-SAR многоканального космического корабля Space Shuttle объединяет в себе три диапазона частот (С-, L- и X-диапазоны) [2]. Такое конструктивное решение облегчает отработку антенны, её модификацию, замену вышедших из строя элементов при подготовке аппаратуры к очередному запуску на орбиту. Важным преимуществом многочастотных радиолокаторов является их

высокая помехоустойчивость. Используя технологии многочастотного зондирования, заметно увеличивается вероятность обнаружения объектов.

**Гибкое использование режимов получения изображения.** На сегодняшний день в РСА реализуются практически все типовые режимы съемки мониторинга земной поверхности. Наиболее распространенными и перспективными из них являются: режим полосовой съемки, режим телескопической (прожекторной) съемки, режим обнаружения наземных движущихся целей, режим видео РСА, режим когерентного обнаружения изменений, режим интерферометрической съемки, поляриметрический режим съемки [1]. Данные режимы уже активно используются в различных РЛС и выполняют широкий круг задач – это и получение детальных РЛИ, и обнаружение наземных движущихся целей, непрерывное наблюдение заданного района и изменений обстановки в нем, также оперативная оценка отражающих свойств объекта при изменении ракурса его обзора, получение информации о высоте местности и объектов, которая может использоваться для визуализации трехмерных топографических изображений и обнаружения замаскированных объектов и т.д.

**Увеличение помехоустойчивости за счет компенсации внешних помех при цифровом диаграммообразовании (ЦДО).** Современные радиоэлектронные устройства и системы строятся так, чтобы обеспечивалось их нормальное функционирование в условиях внешних помех [4]. Основное достоинство систем с ЦДО – снижение мощности внешних помех на 20-30 дБ в сочетании с гибким изменением параметров диаграмм направленности на излучение и прием и возможность реализации многолучевого приема.

**Повышение коэффициента полезного действия передатчика и снижение потерь полезного сигнала при приеме.** Одна из основных тенденций современной радиолокации – стремительный рост применения активных фазированных антенных решеток (АФАР) [5]. В наибольшей степени освоена технология построения модулей АФАР на основе GaAs-микросхем с КПД в режиме передачи 30-40% [5]. Перспективным является использованием модулей на GaN-микросхемах с КПД в режиме передачи до 65%, что позволит улучшить массогабаритные и энергетические характеристики [1,5].

**Список использованных источников:**

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. Сборник рабочих материалов по Международному регулированию планирования и использования радиочастотного спектра с учетом изменений, принятых ВКР-2007. Тома 1-4. НПФ «Гейзер», 2009.
3. Shuttle Radar Topography Mission X-SAR/SRTM. 3D view on Earth. DLR, Oberpfaffenhofen, Germany. CD-ROM, 2000.
4. Кузьмин, С.З. Цифровая радиолокация // С.З. Кузьмин. – Киев : КВЦ, 2000. – 35 с.
5. Викулов И. Монолитные интегральные схемы СВЧ технологическая основа АФАР // Москва «Электроника: Наука, Технологии, Бизнес». 2012. С1-70.

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ СПУТНИКОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

*Радионович В.В.<sup>1</sup>, аспирант*

*Лобан М.А.<sup>2</sup>, инженер*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь)*

*Козлов С.В. – доктор техн. наук*

**Аннотация.** Рассмотрены перспективные технические решения антенн, энергосистемы и опорных генераторов, которые используются в радиолокационных станциях с синтезированием апертуры систем дистанционного зондирования Земли. Приведена структурная схема модельной активной антенной решетки с цифровым диаграммообразованием. Приведены характеристики энергосистемы.

**Ключевые слова.** синтезирование апертуры, система дистанционного зондирования Земли, модульная антенная решетка, цифровое диаграммообразование, солнечные батареи, стандарты частоты.

Космические радиолокационные станции с синтезированием апертуры (РСА) представляют собой интенсивно развивающееся научно-техническое направление, обеспечивающее получение достоверной информации о земной и водной поверхности и размещенных на ней объектах

независимо от метеорологических условий, времени суток, естественной освещенности, наличия дыма, пыли, растительного или снежного покрова. Ниже приведен анализ перспективных технических решений, используемых в радиолокационных станциях с синтезированием апертуры космического базирования.

**Антенная система и передатчик.** Одна из основных тенденций современной радиолокации – стремительный рост применения активных фазированных антенных решеток (АФАР) [5]. В настоящее время АФАР используются в РСА космического базирования типа СПИНАР-1ДМ, SIR-C/X-SAR, PALSAR, TerraSAR-X и др.

Типовая структурная схема модульной двухполяризационной АФАР приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема модульной двухполяризационной АФАР

Схема содержит модули АФАР, являющиеся полноценными приемно-передатчиками с формированием цифрового траекторного сигнала, устройство управления, генератор опорных сигналов и процессор цифрового диаграммообразования. Число модулей в составе крупноапертурной АФАР может составлять 16-64 и определяется двумя факторами:

- производительностью процессора цифрового диаграммообразования и каналов информационного обмена цифровыми сигналами между модулями и указанным процессором;
- возможностью построения модуля на базе приемно-передающих элементов с фазовращателями (выполнения условия пространственно-временной узкополосности).

Так, например, для крупноапертурной АФАР размерами 6х2 метра при длине волны  $\lambda = 3$  см, ширине спектра зондирующего сигнала  $\Delta f_0 = 150$  МГц и максимальном угле отклонения луча от нормали к плоскости модуля  $45^\circ$  для выполнения требований по пространственно-временной узкополосности для каждого модуля может потребоваться использование 16 модулей в строке (по большей длине 6 м) и 4 модулей в столбце (по длине 2 м). Общее число модулей составит 64. Размеры модулей составят 375х500 мм.

Необходимо отметить, что несомненным достоинством указанной схемы построения крупноапертурной АФАР является высокая надежность. Это обусловлено тем, что при выходе из строя до 15...20% модулей работоспособность АФАР сохраняется при незначительном ухудшении характеристик функционирования. Кроме того, при массовом серийном производстве однотипных модулей упрощается технология их изготовления и снижается стоимость.

Структурная схема модуля АФАР является классической на базе приемно-передающих элементов (ППЭ). Каждый ППЭ включает:

- антенные элементы с горизонтальной и вертикальной поляризацией;
- малозумящие усилители для каналов горизонтальной и вертикальной поляризации;
- фазовращатель и аттенюатор с цифровым управлением каналов горизонтальной и вертикальной поляризации;
- диаграммообразующие устройства (ДОУ) каналов с горизонтальной и вертикальной поляризацией, представляющие собой многовходовые сумматоры СВЧ-сигналов;
- идентичные приемные устройства с переносом на промежуточную частоту и преобразованием в квадратуры;
- аналого-цифровые преобразователи каналов вертикальной и горизонтальной поляризации.

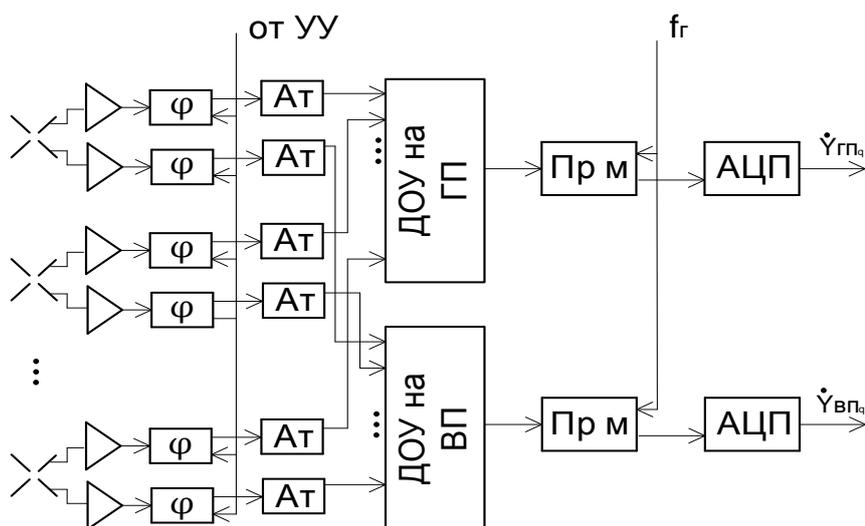


Рисунок 2 – Структура модуля АФАР (приемная часть)

Модуль АФАР работает следующим образом. Отраженные сигналы с произвольной поляризацией принимаются антенными элементами с горизонтальной и вертикальной поляризацией и поступают на входные малошумящие усилители, и, далее, на фазовращатели с аттенюаторы с цифровым управлением. Как правило, фазовращатель и аттенюатор представляют собой комплексированное устройство управления амплитудой и фазой СВЧ-сигналов. Сигналы горизонтальной и вертикальной поляризации каждого ППЭ со скорретированными фазами поступают на диаграммообразующее устройство, которое работает как сумматор, для каждой поляризации, после этого на приемник и аналого-цифровой преобразователь.

**Энергосистема.** Солнечные батареи (СБ) в настоящее время являются самым распространенным источником энергии для космических аппаратов ввиду экологической чистоты (в сравнении, например, с ядерными элементами питания), значительного ресурса, высокой надежности, масштабируемости к необходимым уровням мощности, относительно себестоимости [2,3].

В качестве материала для изготовления СБ используют кремний и арсенид галлия. При КПД около 8-13% кремниевые элементы имеют удельную мощность  $130-180 \text{ Вт/м}^2$  в начале срока эксплуатации, а в конце срока, который длится около 10-15 лет –  $70-100 \text{ Вт/м}^2$ . При использовании арсенида галлия (из 3-каскадных фотоэлектрических преобразователей) батареи будут иметь КПД 25-28% с удельной мощностью  $300 \text{ Вт/м}^2$  в начале срока активной работы и  $230 \text{ Вт/м}^2$  в конце [2].

Перспективным направлением развития СБ является создание фотоэлементов на основе наноантенн (ректенн). У ректенн недорогое сырье для производства и потенциальный КПД до 85%. Производство из-за технологических трудностей пока не налажено, но прогнозируется, что после решения проблем ректенны полностью вытеснят солнечные панели [3].

Одним из важных требований к РСА систем дистанционного зондирования Земли является обеспечение максимальной производительности и оперативности съемки заменой поверхности. Это определяет необходимость работы РСА на теновом участке орбиты, что достигается использованием аккумуляторных батарей. На сегодняшний день имеется большое количество вариантов аккумуляторов, изготавливаемых на базе никель-кадмиевой (NiCd) технологии с удельной энергией около  $40-60 \text{ Вт}^*\text{ч/кг}$ , никель-водородной (NiH<sub>2</sub>) технологии с удельной энергией  $50-90 \text{ Вт}^*\text{ч/кг}$  и литий-ионной (Li-ion) технологии с удельной энергией  $110-160 \text{ Вт}^*\text{ч/кг}$ . Литий-ионные аккумуляторы набирают все большую популярность в КА из-за надежности, отсутствия эффекта памяти, и хорошими массогабаритными характеристиками [2].

**Опорный генератор.** Возможность длительного накопления отраженного сигнала определяется при синтезировании апертуры ограничивается уходом опорной частоты (частоты гетеродина). При максимальном времени синтезирования порядка  $T=10$  с уход частоты опорного генератора не должен превысить порядка  $0,1...0,2$  Гц. Поэтому кратковременную (за 1 с) нестабильность частоты опорного генератора можно оценить величиной  $10^{-12}...10^{-11}$  (меньшее значение характерно для Ку-диапазон, большее значение – для L-диапазона). На стабильность частоты в опорных генераторах в первую очередь основной элемент, на котором построен генератор. Так, водородные генераторы (СН1-75А, СН1-75В, СН176) имеют самую большую долговременную стабильность  $10^{-15}$  /год, цезиевых (Times Cesium)  $-5 * 10^{-13}$  /год, рубидиевых (PRS10, P400, FE-5660A)  $-5 * 10^{-12}$  /год, кварцевых (Астра, М32008, М32011)  $-5 * 10^{-8}$  /год [5,6]. Кратковременная нестабильность указанных генераторов на 2...3 порядка лучше долговременной. В большинстве

случаев при времени синтезирования 1...5 секунд достаточным является использование термостабилизированных кварцевых генераторов. При очень высокой разрешающей способности необходимо использовать рубидиевые стандарты частоты.

Таким образом для космических РСА перспективным является использование АФАР с цифровым диаграммообразованием, в энергосистеме – использование солнечных панелей совместно с литий-ионными аккумуляторами, и термостабилизированных кварцевых генераторов или рубидиевых стандартов частоты в качестве генераторов опорных сигналов.

#### СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. Верба В.С., ред. Москва, Изд-во Радиотехника, 2010, 680 с
2. Костров В.В., Григас С.Э., Скорынин А.А., Терехов Ю.Е., Энергетическое обеспечение радиолокационных комплексов космического базирования для обнаружения летательных аппаратов, Проектирование электронных Устройств и систем, 2015.
3. Портал про альтернативную энергию [Электронный ресурс] // URL: <https://alter220.ru/solnce/nanoantenny.html>
4. Беляев А.А., Медведев С.Ю., Павленко Ю.К., Сахаров Б. А. Водородный стандарт частоты [Электронный ресурс] // URL: <https://findpatent.ru/patent/214/2148881.html>
5. Селиванов С. И. Рубидиевый стандарт частоты [Электронный ресурс] // URL: <https://findpatent.ru/patent/221/2213364.html>
6. Опорные генераторы. Акционерное общество «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» [Электронный ресурс] // URL: <http://oniip.ru/product/97/>

## РАЗВИТИЕ ЛИЧНОСТИ БУДУЩЕГО ПЕДАГОГА-ПРОГРАММИСТА В ГРУППОВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

Рудько Е.С., студент гр.944691

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Парафиянович Т.А. – канд. пед. наук, доцент

**Аннотация.** Становление личности каждого студента является одним из самых сложных периодов жизни. Преподаватель-куратор в университете помогает студентам осваивать систему взаимодействий в коллективе, приобщает к нормам и требованиям, обеспечивает введение в профессию. Именно с куратора начинается выработка субъект-субъектного взаимодействия «преподаватель-студент», взаимного уважения и приобщения обучающихся к профессиональным ценностям. Тенология тимбилдинг помогает формировать команды, групповое взаимодействие, результатом которого является развитие инициативы, творчества студентов, развитие личности будущего педагога-программиста .

**Ключевые слова.** Личность, групповое взаимодействие, команда, тимбилдинг, командообразование, микроклимат, отношения.

Становление личности каждого студента является одним из самых сложных периодов жизни. От того, как будет складываться межличностное взаимодействие в студенческой группе, зависит формирование будущей личности специалиста. Многие думают, что команда построится сама, необходимы только время для развития и соответствующая стратегия. Это ложное убеждение.

Из этого можно сделать единственный вывод: команды не возникают сами по себе.

Образовательный процесс БГУИР призван обеспечить высокий уровень профессиональной подготовки специалистов, критерием которого является не только «...овладение обучающимися интегральной совокупностью предметно-профессиональных знаний, умений, навыков, но и развитие личностных качеств как составляющих социально-профессиональной компетентности специалиста, необходимой для решения задач профессиональной деятельности»...[1, с.351]. Как показывает опыт, каждое новое поколение обучающихся при схожести возрастных особенностей все-таки отличается от предшественников своими мировоззренческими позициями, ценностными ориентациями, способами самореализации. В связи с этим встает вопрос о поиске новых, более эффективных путей взаимодействия с обучающимися, целесообразных форм и методов обучения и воспитания.

Преподаватель-куратор в университете является ключевой фигурой организации воспитательной работы, именно он выступает носителем традиций и ценностей БГУИР, помогает студентам осваивать систему взаимодействий в коллективе, приобщает к нормам и требованиям, обеспечивает введение в профессию. Именно с куратора начинается выработка субъект-субъектного взаимодействия «преподаватель-студент», взаимного уважения и приобщения обучающихся к профессиональным ценностям. Кроме того, преподаватель-куратор является организатором

разнообразной внеучебной деятельности и призван способствовать включению студентов в самоуправление и стимулировать инициативу, творчество, побуждать к самореализации. Внеучебная деятельность выстраивается, как логическое продолжение содержания учебных дисциплин, привлечения обучающихся к проектной деятельности, создания им «поля» профессиональной деятельности, «...объединение внеучебной деятельности и будущей профессиональной деятельности, положительно влияет, с одной стороны, на личностное становление обучающихся путём формирования у них опыта собственной деятельности, субъектности, активности, способности проявлять инициативу, с другой — на их профессиональное становление посредством превращения полученных знаний в профессиональные умения и навыки» [2, с.12 ].

Взаимодействие преподавателя и обучающегося предназначено формировать одновременно сознание и поведение последнего, побуждать его к самовоспитанию, самообразованию и саморазвитию. Актуализация гуманистических принципов управления образованием привела к разработке и формированию новых командных технологий, одной из которых является развитие концепции тимбилдинга. Тимбилдинг (англ. Team building — построение команды) — термин, применяемый к широкому диапазону действий для создания и повышения эффективности работы команды. В узком смысле, тимбилдинг представляет собой тренинг, направленный на формирование навыков командного взаимодействия. Активный тимбилдинг – это комплекс мероприятий, которые направлены на сплочение команды путем совместного активного отдыха, игр, тренингов, основной целью которых является «развитие навыков, способностей, внутренних возможностей, раскрытие резервов личности и команды, научение и тренировка полученных знаний и навыков на практике» [2, с. 13]. В состязаниях и тренинговых занятиях, облеченных в программу активного тимбилдинга, пронизанную командным духом и единением, обучающийся способен раскрыть свои подлинные личностные, профессиональные и социальные качества.

В команде самое главное – развитие интеллектуального и профессионального потенциала каждого участника команды. И здесь на помощь приходит командообразование.

Основная цель тимбилдинга – формирование сплоченного коллектива. Из отдельных учащихся требуется построить команду, способную совместно решать задачи, принимать решения и достигать целей.

Задачи тренинга командообразования [3]:

1. Сформировать единое понимание общих целей и задач процесса.
2. Установить баланс личных целей и задач с целями и задачами коллектива.
3. Усилить креативность.
4. Проявить и разрешить межличностные конфликты.
5. Улучшить психологический климат.
6. Улучшить личные взаимоотношения.

В тренинге используются следующие приемы:

- моделирование ситуаций;
- игровые моменты и их анализ;
- управление обсуждением;
- активная обратная связь;
- обсуждение значимости информационных поводов и тем;
- отслеживание участниками стратегий собственного поведения;
- одновременное восприятие нескольких слоев сообщенной информации.

Конечно, в тимбилдинге есть и свои минусы. Самая главная проблема, что многим не нравится участвовать в таких мероприятиях, так как не все любят работать в команде.

Тимбилдинг – мероприятие спорное. Тем более, что в последнее время, в связи с его распространением, очень многие поняли, как нужно вести себя на тимбилдинге: «беги со всеми, кричи со всеми, и все будет хорошо!» – вряд ли это именно та цель, которую необходимо достигнуть.

Для командной работы характерны некоторые важные особенности. Это согласие между целями студентов, ориентация на результат, гибкое лидерство внутри команды, способность принимать общие решения. Для сплочения группы можно рассмотреть процесс, в условиях которого возможна совместная деятельность, занятия физического воспитания. Именно в процессе спортивной деятельности возможно эффективное командообразование студентов, одним из примеров является квест-игра «Белорусские узоры». В состав команд входили студенты из разных групп и национальностей, что способствовало их знакомству, сплочению, взаимодействию. Следующий вид тимбилдинга – творческий тимбилдинг. Он направлен на эмоциональную активность участников. При его проведении студенты были разбиты на команды. Это объединяет студентов и во время игры они забывают о межличностных конфликтах. Примером такого тимбилдинга является проведение самими студентами кураторского часа в рамках курсового проекта, что способствовало сплочению учебной группы.

Тренинги по командообразованию отличаются не только видом тимбилдинга, но и способом проведения. К примеру квест-игра и кураторский час были проведены на улице и в помещении

соответственно. Сейчас во время пандемии для сплочения студентов можно использовать Web-квесты. При реализации Web-квеста используются различные Интернет-ресурсы. Таким образом мы превращаем Интернет в территорию творчества. Разрабатываются web-квесты для максимальной интеграции Интернета в различные учебные предметы на разных уровнях обучения в учебном процессе. Они охватывают отдельную проблему, учебный предмет, тему, могут быть и межпредметными. В курсовой работе по педагогике я использовала Интернет-ресурс Learningapps. С помощью которого можно составлять различные квесты с заданиями. Но самое главное преимущество – это создание квеста для командной работы. Работа с web – квестами может быть предложена и как домашнее задание (внеаудиторная самостоятельная работа) для обучающихся, её можно провести в аудитории при наличии двойных занятий.

Таким образом, можно сделать вывод, что технология тимбилдинга – форма результативной групповой деятельности, способствующая стабилизации микроклимата, активизации поиска рациональных идей, развитию инициативы, творчества студентов, развитию личности будущего педагога-программиста в процессе группового взаимодействия.

#### **Список использованных источников:**

1. Парафиянович, Т. А. Формирование социально-личностных компетенций студентов университета / Т. А. Парафиянович // Высшее техническое образование : проблемы и пути развития = Engineering education: challenges and developments : материалы IX Международной научно-методической конференции, Минск, 1-2 ноября 2018 года / редкол. : В. А. Бозуш [и др.]. – Минск : БГУИР, 2018. – С. 351 – 354. <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/33657>
2. Парафиянович, Т.А. Командное взаимодействие как инструмент развития личности и подготовки лидеров / Т.А. Парафиянович // Актуальные проблемы в деятельности надзорных органов Министерства по чрезвычайным ситуациям: сб. материалов международной заочной научно-практической конференции – Минск : КИИ, 2016. – 87 с. – С. 12 – 14.
3. Сартан Г. Н. Тренинг командообразования / Г.Н. Сартан — СПб.: Изд-во «Речь», 2015. — 187 с.

## **ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ОПТИМИЗАЦИИ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК**

*Сенакосова Н.В., студент гр.844691*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Листопад Н.И. – д-р техн. наук, профессор*

**Аннотация.** Работа посвящена рассмотрению программного средства, позволяющего решить ключевые задачи управления перевозками – маршрутизацию грузоперевозок и распределение транспортных средств по маршрутам при условии выполнения плана перевозок в соответствии с выбранным критерием оптимизации.

**Ключевые слова.** Маршрутизация. Логистика.

Обостряющаяся конкуренция на рынке транспортно-логистических услуг требует новых подходов к развитию транспортных отношений, созданию новых технологий, повышению качества предоставляемых услуг [1]. Основным критерием оптимизации в условиях рыночных отношений становятся минимальные затраты на транспортировку грузов. Компании, так или иначе связанные с транспортной логистикой, сталкиваются со следующими проблемами:

- содержание собственного автопарка обходится дорого, часто бывает трудно выбрать оптимальный наемный транспорт;
- нерациональная загрузка транспорта – машины отправляются в рейс наполовину пустыми;
- в каждом маршруте есть масса деталей и проконтролировать их точное соблюдение достаточно сложно, поэтому составленный вручную маршрут часто является нелогичным и потому малоэффективным.

Учет всех факторов усложняет организацию и управление транспортной логистикой. На помощь приходят современные IT-решения, которые создаются с целью оптимизации логистических издержек. Одно из таких решений будет рассмотрено далее.

Разработанное программное средство позволяет решить ключевые задачи управления перевозками – оптимизировать план маршрутизации грузоперевозок и распределить транспортные средства по маршрутам перевозок по критерию минимума суммарных затрат на перевозку с учетом технико-эксплуатационных параметров транспортных средств. Основными функциями, предоставляемые программным средством, являются:

- загрузка исходных данных о заказах (номер, дата оформления, дата доставки, вес, объем, сумма, контрагент), контрагентах (тип контрагента: контрагент, перевозчик; контактные данные), точках доставки (географические координаты: широта, долгота; область, район, город, улица, дом, время нахождения на точке, время работы, время обеда), транспортных средствах (вид и тип

транспортного средства, наименование, государственный номер, грузоподъемность, объем кузова) и водителях (ФИО, контактные данные);

- ведение базы данных, поиск и фильтрация в базе данных, которая подразумевает добавление, редактирование, удаление, поиск и отбор информации о заказах, контрагентах, точках доставки, регионах, транспортных средствах, видах транспортных средств, водителях;

- предоставление трех режимов (ручной, полуавтоматический и автоматический) и настроек построения маршрута (учет ограничений по количеству точек доставки, весу, объему, времени, учет обратного пути, время начала маршрута), настроек для автоматического подбора транспортного средства (приоритетный вид и тип транспорта);

- построение оптимального маршрута и редактирование построенных маршрутов;

- отображение точек доставки и всего маршрута на карте;

- формирование путевого листа и разбиение маршрута путевого листа на рейсы;

- оптимизацию распределения транспортных средств по маршрутам;

- назначение водителя для выполнения путевого листа;

- построение отчетов на основании информации о грузоперевозках и сохранение сформированных отчетов.

В программном средстве предусмотрено два типа пользователей – «Администратор» и «Логист». Пользователь с правами доступа «Администратор» отвечает за загрузку исходных данных о заказах, точках доставки, контрагентах, автомобилях и водителях, которые впоследствии обрабатываются логистом, а также загрузку статусов путевых листов. В свою очередь, пользователю с правами доступа «Логист» предоставляется возможность работать в АРМ Логиста, где доступны функции по формированию маршрутов, путевых листов, подбора автотранспорта и назначения водителя на путевой лист, выгрузке данных по сформированным путевым листам, а также формирование отчета о грузоперевозках за период.

Алгоритм планирования грузоперевозок включает следующие шаги:

- 1) ввод данных о заказах;
- 2) задание настроек для построения маршрутов;
- 3) генерация возможных путей между точками доставки;
- 4) выбор кратчайшего пути между точками доставки;
- 5) формирование матрицы километровых выигрышей;
- 6) формирование оптимальных маршрутов с учетом заданных настроек;
- 7) подбор транспортных средств;
- 8) оформление путевых листов.

Готовый маршрут может быть представлен в табличном виде, так и отображен на карте. Табличное представление маршрута приведено на рисунке 1.

Удален	Возврат	Дата доставки	Контрагент	Вес (кг)	Время на точке (ч)	Время прибытия в точку	Время работы с
Изменен		Номер заказа	Сумма		Время в пути (ч)	Время убытия с точки	Время работы по
					Расстояние (км)		
1. г. Минск, ул. Тимирязева, 66а							
		07.02.2018	2_00000089		363,72	0,75	0:22:48
		1011316865		616,5		0,38	1:07:48
							19,05
2. Минская обл., Минский р-н, г. Заславье, ул. Великая, 53							
		07.02.2018	112_001067		197,00	0,75	1:30:36
		1011316839		295,8		0,38	2:15:36
							18,90
	6			3 407,31	1 220,42	4,5	
						8,12	
						263,57	

Рисунок 1 – Представление маршрута в табличном виде

В программном средстве предусмотрена возможность отображения на карте как отдельных точек, так и всего маршрута. Представление маршрута на карте приведено на рисунке 2.

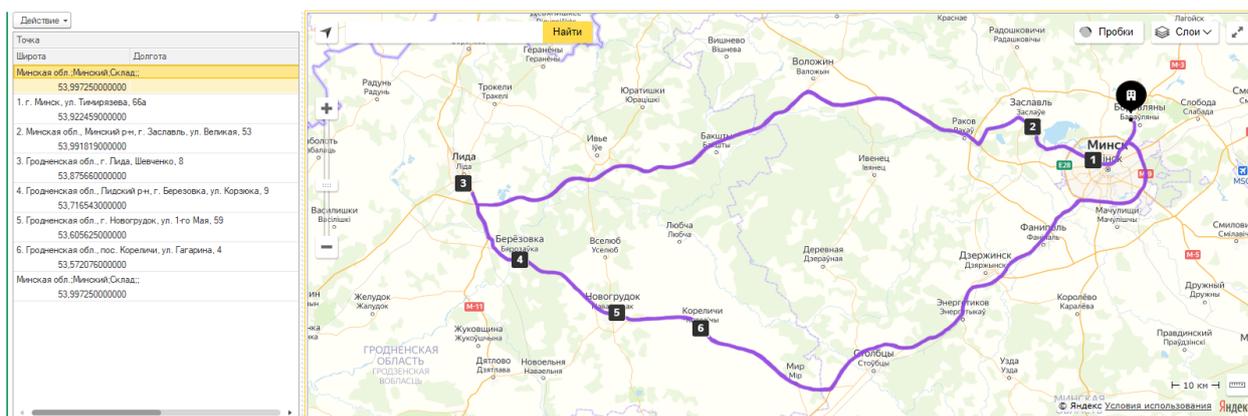


Рисунок 2 – Представление маршрута на карте

Программное средство разработано на технологической платформе 1С:Предприятие с использованием встроенного языка программирования. Такой выбор обусловлен тем, что большинство компаний ведут учет с использованием программных продуктов 1С, что облегчает интеграцию и позволяет расширить функционал имеющейся системы, предоставляя дополнительные возможности для автоматизации задач логистики и управления перевозками. Кроме того, пользователи получают знакомый и привычный им интерфейс, что облегчает внедрение программного продукта. Программное средство, разработанное на платформе 1С может работать под управлением любой из операционных систем: Microsoft Windows, Linux, Mac.

Основным преимуществом разработанного программного средства перед имеющимися аналогами является возможность использования программного средства как отдельного модуля, так и возможность интеграции с другими программными продуктами, используемыми компанией. Данная возможность обеспечивается веб-сервисом, который предоставляет функционал по загрузке исходных данных и выгрузке результатов. Таким образом, программное средство может стать одним из звеньев программных продуктов, используемых компанией.

Использование программного средства оптимизации грузоперевозок позволяет сократить время на обработку заказов, снизить затраты, а также уменьшить требования к квалификации персонала. Результат использования транспортной логистической системы – высокая вероятность выполнения «шести правил логистики»: нужный груз, в нужном месте, в нужное время, в необходимом количестве, необходимого качества, с минимальными затратами [2].

**Список использованных источников:**

1. Ковалев, М. *Транспортная логистика в Беларуси: состояние, перспективы* : моногр. / М. М. Ковалев, А.А. Королева, А.А. Дутина. – Минск : Изд. центр БГУ, 2017. – 327 с.
2. Савенкова, Т. И. *Логистика : учеб. пособие* / Т. И. Савенкова. – М. : Омега-Л, 2010. – 256 с.
3. Кристофер, М. *Логистика и управление цепочками поставок: учеб. пособие* / М. Кристофер – СПб.: Питер, 2004. – 320 с.
4. Чистов, Д.В. *Разработка в 1С:Предприятие 8: учеб. пособие* / Д.В. Чистов - М. : 1С-Паблишинг, 2017. – 436 с.

## ЦИФРОВОЙ ПРИЁМНИК СТАНЦИИ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

Сенюк В.О., аспирант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Матюшков А.Л. – кандидат техн. наук

**Аннотация.** Для осуществления защищённого канала радиосвязи широко используют радиостанции с применением псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ). Поэтому, для проведения эффективной радиотехнической разведки (РТР), актуальной задачей является разработка и применение новейших цифровых многоканальных радиоприёмников ультракоротковолнового (УКВ) диапазона, которые позволяют оперативно сканировать заданный частотный диапазон тактических радиостанций. В настоящей работе была осуществлена оптимизация параметров, требуемые расчёты и синтез функциональной схемы на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС).

**Ключевые слова.** Приёмник разведки, многоканальный, ППРЧ, УКВ диапазон, БПФ, ПЛИС, мегавыборок в секунду.

Был произведён анализ технических данных AD6676, а также оценка быстродействия ПЛИС Virtex-7. Анализ показал, что выбранный ПЛИС позволяет выполнить быстрое преобразование Фурье (БПФ) с количеством выборок более 16384 точки в реальном масштабе времени на частоте 250 МГц [1]. Данная длина выборки, при цифровом спектральном анализе, обеспечивает увеличение разрешения по частоте более чем 12,5 кГц. Функциональная схема многоканального приёмного устройства на базе ПЛИС рисунок 1.

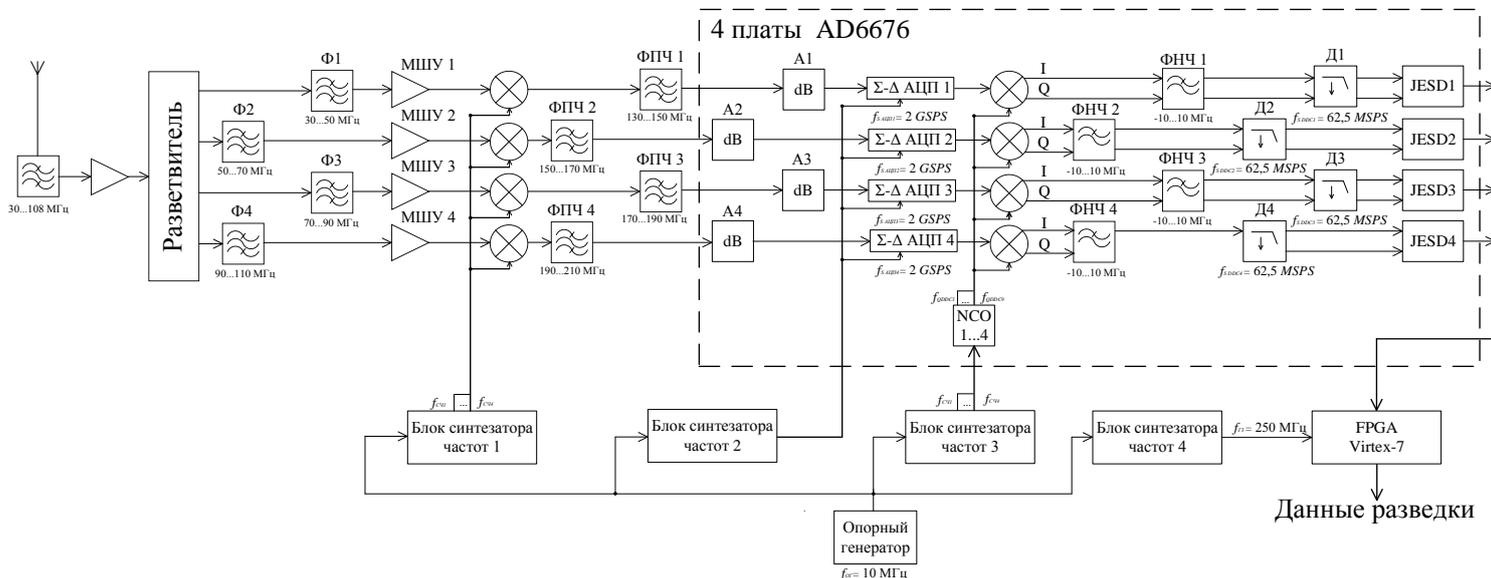


Рисунок 1 – Функциональная схема многоканального приёмника радиотехнической разведки на базе ПЛИС

Оптимальным, для данного многоканального приёмника, количеством каналов является 4. При диапазоне рабочих частот от 30 до 108 МГц, ширина одного канала составит  $\Delta f=20$  МГц.

Расчёты для каждого из 4 каналов производятся аналогичным образом.

Центральная частота сигнала для первого канала определяется по формуле:

$$f_{c1} = \sqrt{f_{c1H} \cdot f_{c1B}} = 38,73 \text{ МГц}, \quad (1)$$

где  $f_{c1H} = 30$  МГц;  $f_{c1B} = 50$  МГц.

Промежуточная частота:

$$f_{пч1} = f_{c1} + f_r = 138,73 \text{ МГц}, \quad (2)$$

где  $f_r = 100$  МГц – частота гетеродина.

Частота гетеродина выбрана с учётом технических характеристик  $\Sigma$ - $\Delta$  АЦП модуля AD6676. Центральная частота ПЧ должна находиться в пределах от 70 до 450 МГц. Ширина полосы сигнала от 20 МГц до 160 МГц. Частота дискретизации АЦП также определена из технических данных производителя и составляет  $f_{S_{АЦП1}} = 2 \text{ GSPS}$ .

$\Sigma$ - $\Delta$  АЦП обеспечивает 5-битный цифровой выход с высокой частотой дискретизации, представляющий желаемую полосу пропускания сигнала ПЧ.  $\Sigma$ - $\Delta$  АЦП работает в режиме избыточной дискретизации.

Согласно теореме Котельникова требуется выбрать частоту дискретизации  $f_{S_{DDC}}$ , на выходе децимирующего фильтра, в два раза больше ширины полосы частот обрабатываемого сигнала, то есть  $f_{S_{DDC}} > 2\Delta f$ . Частоты дискретизации  $f_{S_{DDC}} = 62,5 \text{ MSPS}$  будет более чем достаточно для выполнения теоремы Котельникова. Коэффициент прореживания будет равен 32 [2].

Комплексные выходные данные с разрядностью 16 бит передаются в хост-процессор через интерфейс JESD204B, поддерживающий конфигурацию с одной или двумя линиями данных и обеспечивающий быстродействие до 5.333 Гбит/с [3].

Разрешения по частоте, при спектральном анализе, можно рассчитать, используя формулу:

$$f_p > \Delta F_0 \cdot \frac{f_s}{N}, \quad (3)$$

приняв при этом  $\Delta F_0 = 1$  (прямоугольное окно):

$$f_p > \frac{f_{s\ DDC}}{N},$$

$$f_p > \frac{62,5\ MSPS}{16384}, \quad (4)$$

$$f_p > 3814\ \text{Гц}.$$

Таблица 1. – Зависимость разрешения по частоте  $f$  от количества точек БПФ  $N$  при постоянной частоте дискретизации  $f_{s\ DDC}$

Количество точек выполнения БПФ, $N$	$< f_p$ , кГц
16384	3,814
8192	7,629
4096	15,259
2048	30,518
1024	61,035

Полученные результаты говорят о том, что разрешающей способности по частоте цифрового многоканального приёмника, начиная от  $N = 8192$  и выше, вполне хватит, чтобы детально разделить гармоники сигнала в исследуемом диапазоне частот, и тем самым определить алгоритм перестройки частоты тактической радиостанции псевдослучайной перестройки рабочей частоты противника.

**Список использованных источников:**

1. *FPGA Virtex-7 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.xilinx.com>.*
2. *Кестер, У. Аналого-цифровое преобразование / У. Кестер — М.: Техносфера, 2007. — 1016 с.*
3. *Подсистема широкополосного приемника ПЧ AD6676 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://analog.com/>.*

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СОСТАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЯ УЧЕБНЫХ ЗАНЯТИЙ ДЛЯ УЧРЕЖДЕНИЯ СРЕДНЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Стригельская Я.С., студентка гр.844691

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Русаков Д.В. – магистр техники и технологии, ассистент каф. ИРТ

**Аннотация.** Составление расписания учебных занятий — это сложный и трудоемкий процесс, который даже в современном мире зачастую подразумевает под собой ручное выполнение. Для автоматизации данного процесса существует ряд автоматизированных систем, которые в свою очередь обладают определенными недостатками, исключающих их повсеместное использование. В данной статье описывается автоматизированная система, разработанная в рамках дипломного проекта, ее функционал и основные преимущества.

**Ключевые слова.** Автоматизация, расписание, среднее образование, оптимизация, учебные занятия.

Учебный режим учреждения общего среднего образования должен соответствовать функциональным возможностям учащихся. Объем, содержание и организация учебного процесса

должны обеспечивать такое состояние организма, при котором утомление полностью исчезало бы за период отдыха.

При составлении расписания уроков должны учитываться следующие факторы:

– работоспособность (характеристика труда, качество и количество усвоенных знаний или действий в определенное время) зависит от возраста человека, его индивидуального биоритма, времени суток, дня недели, времени года и так далее;

– степень утомляемости зависит от социальных, психологических, биологических причин [1].

Чтобы снизить утомляемость учащихся и учителей в течение одного дня, необходимо правильное распределение уроков в продуктивные и непродуктивные часы и дни. Для этого Санитарные нормы и правила «Требования для учреждений общего среднего образования» [2] и ранговая шкала трудности учебных предметов [3].

Основными функциями системы являются:

- генерация расписания;
- просмотр расписания;
- ввод общих данных для составления расписания;
- ввод учителями пожеланий в расписании, которые могут учитываться при его генерации;
- оповещение учителей о составлении нового расписания с отправкой копии на почтовый ящик;
- вывод расписания на печать.

При разработке системы были использованы следующие средства разработки:

- интегрированная среда разработки программного обеспечения — VS Code;
- интегрированная среда разработки для СУБД PostgreSQL — PgAdmin 4;
- языки программирования JavaScript, SQL;
- СУБД PostgreSQL 13.2.

Входными данными являются информация об учителях, информация о классах, информация об уроках, информация о расписании звонков, информация о предметах.

Выходными данными являются сгенерированное расписание в различных форматах, письма с информацией о расписании, информация об ошибках системы во время ее работы.

Достоинства разработанной автоматизированной системы:

- система использует генетические алгоритмы машинного обучения, что позволяет ускорить работу генерации по сравнению с аналогичными системами, использующими алгоритмы полного перебора;
- система имеет открытое API, что позволяет интегрировать ее в уже созданные продукты;
- клиентская часть системы представляет собой веб-приложение тем самым позволяя использовать ее не только на компьютерах с любыми ОС, но и на мобильных телефонах
- система авторизации и аутентификации позволяет защитить данные от изменений третьими лицами.

**Список использованных источников:**

1. Веб-ресурс государственного обеспечения // *blanker* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blanker.ru/doc/raspisanie-urokov> – Дата доступа : 03.04.2021
2. Санитарные нормы и правила «Требования для учреждений общего среднего образования» от 27.12.2012 №206 // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь – СанПиН 2.4.2.2821-10.
3. Ранговая шкала трудности учебных предметов от 27.12.2012 №206 // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь – СанПиН 2.4.2.2821-10.

## **ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ ДОКУМЕНТОВ ОТ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО БАНКОВСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РАБОТЫ С НИМИ**

*Третьяков Д.В., студент гр.844691*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Русаков Д.В. – магистр техники и технологии, ассистент каф. ИРТ*

**Аннотация.** С развитием информационных технологий наблюдается переход услуг на дистанционное обслуживание, не исключением являются и банковские услуги, это обусловлено удобностью и простотой использования со стороны клиентов банков, позволяя им без физического присутствия в банке осуществлять большинство предоставляемых банками услуг. Данная

статья описывает разработанный мной программный модуль для принятия документов от системы дистанционного банковского обслуживания и работы с ними.

Дистанционное банковское обслуживание (ДБО) — общее название способа предоставления банковских услуг клиенту (как юридическому, так и физическому лицу) с использованием средств телекоммуникаций (чаще всего телефон, интернет) без его непосредственного визита в банк [1].

В последнее время существует тенденция замены наличных электронными деньгами и повышение популярности систем ДБО (СДБО) и это не удивительно ведь СДБО обладает рядом существенных преимуществ при ее использовании, таких как:

– Оперативность и экономичность. Использование СДБО позволяет осуществлять управление финансовыми потоками предприятия прямо из офиса и существенно сокращает затраты рабочего времени персонала, связанные с посещением банка.

– Простота и удобство. Автоматизация процесса подготовки расчетных и иных документов, а также наличие программного контроля по заполнению обязательных реквизитов в документах значительно упрощает процесс формирования документов и позволяет минимизировать операционные ошибки.

– Безопасность и эффективность. СДБО позволяет увеличить безопасность и конфиденциальность документооборота с банком; в любой момент получить выписку, содержащую информацию обо всех входящих и исходящих документах и иную информацию о состоянии счета без посещения банка.

Разработанный программный модуль является одной из частей СДБО позволяющий, автоматизировать прием документов в формате .xml, выполнять их обработку и производить печать документа в форматах .txt или .rtf.

Программный модуль разрабатывался для операционных Windows 7/8/10.

При разработке программного модуля были использованы следующие средства разработки:

- интегрированная среда разработки программного обеспечения — Borland Delphi 5;
- интегрированная среда разработки для СУБД Oracle — PL/SQL Developer 14.0;
- языки программирования Delphi, PL/SQL, SQL;
- СУБД Oracle 12c.

Входными данными является документ в формате .xml.

Выходными данными является документ в формате .txt, .rtf.

Основными функциями модуля являются:

- просмотр электронных документов;
- обработка электронных документов;
- зачисление принятых документов;
- аннулирование принятых документов;
- формирование протокола обработки документов и сообщений для клиента;
- печать документов.

Основным преимуществом данного программного модуля является значительная экономия рабочего времени посредством автоматизированного приема клиентских документов и сохранения их в базе данных, так же немаловажным фактором является удобство и простота использования данного модуля при осуществлении работы с уже принятыми клиентскими документами.

**Список использованных источников:**

1. Системы дистанционного банковского обслуживания (рынок ДБО России) / tadviser [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:ДБО\\_-\\_Системы\\_дистанционного\\_банковского\\_обслуживания\\_\(рынок\\_России\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:ДБО_-_Системы_дистанционного_банковского_обслуживания_(рынок_России)). Дата доступа: 29.03.2021

2. Осипов, Д. Базы данных и Delphi. Теория и практика / Д. Осипов – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 752 с.

3. Осипов, Д. Delphi. Программирование для Windows, OS X, iOS и Android / Д. Осипов – СПб. : БХВ-Петербург, 2014. – 464 с.

## ОБУЧАЮЩЕЕ ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ПО ПЛАТФОРМЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРИЛОЖЕНИЙ FLUTTER

*Трубин Е.А., студент гр.844691*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Малинина Т.А. – магистр техники и технологии, ассистент каф. ИПуЭ*

**Аннотация.** В работе описана актуальность обучающих программных средств на мобильные устройства, трудности разработки на разные мобильные операционные системы и обучающее программное средство по набору средств разработки для создания кроссплатформенных приложений Flutter.

**Ключевые слова.** Обучающее программное средство, мобильное приложение, операционная система, кроссплатформенность, производительность, браузер, набор средств разработки, Dart, Flutter.

Вопрос эффективности обучения всегда будет актуален. В эпоху информации, когда уровень развития характеризуется преобладающей ролью информативных продуктов, использование информационно-коммуникационных технологий в образовании является важным условием привлекательности процесса обучения.

Особый интерес вызывают обучающие программные средства на мобильных устройствах, в том числе для изучения различных языков программирования у студентов IT-специальностей, так как эти средства обучения всегда находятся под рукой. Такие приложения в общем случае содержат структурированные теоретические материалы и изредка сопровождаются дополнительными заданиями.

Для создания мобильных приложений на сегодняшний день существует множество различных средств разработки. При существовании нескольких популярных мобильных операционных систем одной из основных проблем становится переносимость создаваемых мобильных приложений (кроссплатформенность) на все популярные системы. На сегодняшний день самые известные кроссплатформенные средства разработки используют технологии веб-обозревателей (браузеров), трансформируя сайт в приложение для обеспечения совместимости со многими ОС, так как браузер является стандартным средством отображения страниц сети Интернет для пользователей. Однако такой подход к переносимости идет в ущерб производительности. Браузер, помимо обработки декларативных описаний страниц, интерпретирует сценарии в реальном времени, что требует больших ресурсов на обработку, чем программа, скомпилированная в машинный код.

Проблемами кроссплатформенности и производительности мобильных приложений всерьез занялась компания Google. Результатом их деятельности является SDK с открытым исходным кодом Flutter, который представляет собой набор средств разработки для создания мобильных приложений под Android и iOS на языке программирования Dart. Проблема производительности в нем решается использованием переносной графической библиотеки с открытым исходным кодом, которая имеет высокую производительность на всех поддерживаемых платформах. Адаптация интерфейсов программ под конкретную операционную систему осуществляется с помощью различных коллекций виджетов, которые отличаются только графически.

Так как Flutter является еще довольно молодым и активно развивающимся проектом, по нему не так много обучающих материалов и изданий, особенно на русском языке. А те, что существуют, быстро теряют свою актуальность в связи с активной разработкой самого SDK. В официальном магазине приложений Google очень мало обучающих приложений даже на английском языке по Flutter.

Целью обучающего программного средства по платформе для создания приложений Flutter является предоставление актуальных теоретических материалов по языку программирования Dart и набору средств разработки мобильных приложений Flutter, а также практических заданий для закрепления полученных знаний.

Практические задания делятся на несколько уровней:

- уровень представления: позволяет сформировать представления об общих понятиях разработки;
- уровень понимания: позволяет сформировать знания об основных концепциях разработки;
- уровень применения: позволяет сформировать умения построения архитектуры кода.

Данное обучающее средство рассчитано не только на студентов IT-специальностей, но и любых других людей, заинтересованных в программировании, так как Flutter имеет относительно низкий порог вхождения.

Варианты использования обучающего средства схематически изображены на рисунке 1.

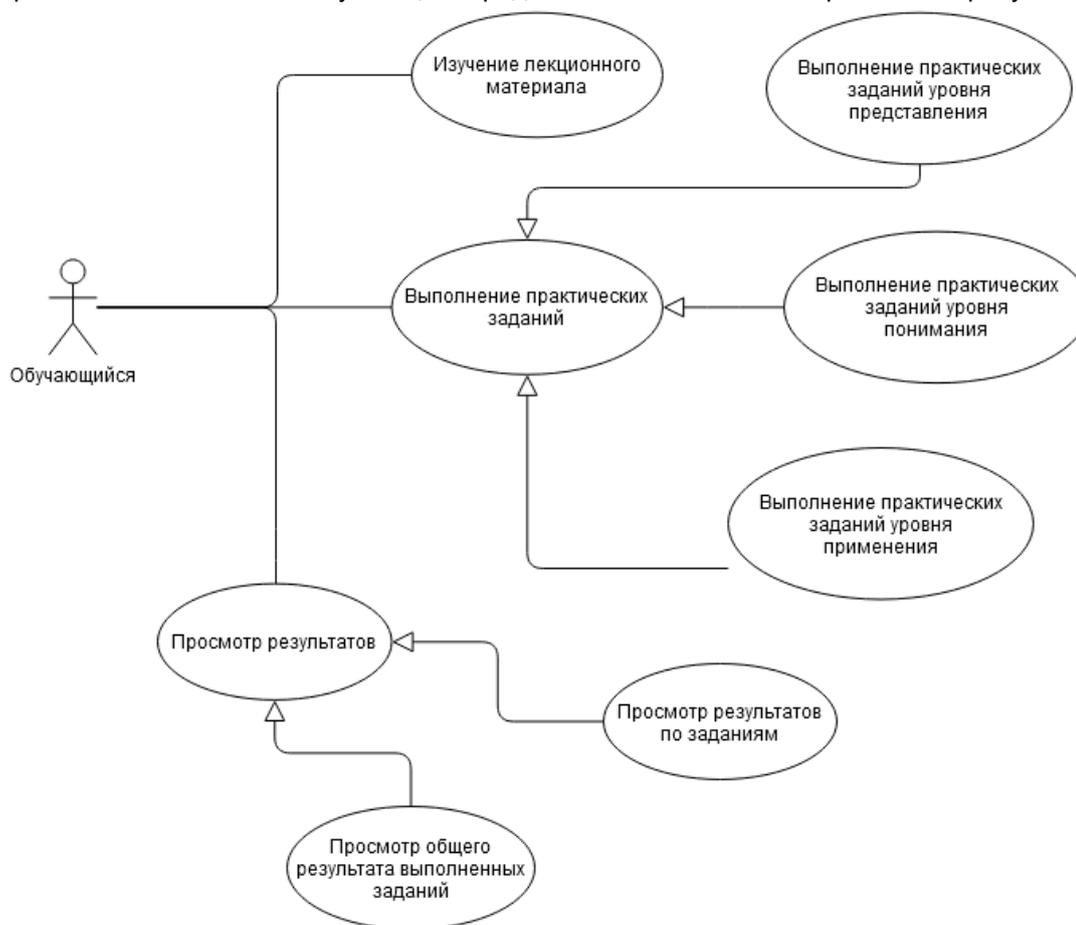


Рисунок 1 – Диаграмма вариантов использования обучающего программного средства по платформе для создания приложений Flutter

Таким образом, данное обучающее средство займет почти свободную на данный момент нишу обучающих программных средств по перспективному кроссплатформенному набору средств разработки Flutter и позволит обучающимся закрепить лекционный материал практическими заданиями.

**Список использованных источников:**

1. Ижунин, М. А. Перспективы использования мобильных приложений в образовании / М. А. Ижунин. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2020. — № 28 (318). — С. 18-19.
2. Кроссплатформенная разработка мобильных приложений в 2020 году // Habr [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://habr.com/ru/post/491926/>
3. Заметки Ф. Flutter на практике: Прокачиваем навыки мобильной разработки с помощью открытого фреймворка от Google / пер. с англ. А. С. Тищенко. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 328 с.: ил.
4. Славинская, О.В., Молчан, Л.В. Методика преподавания общетехнических и специальных дисциплин: электронный ресурс по учебной дисциплине направления специальности 1-08 01 01-07 «Профессиональное обучение (информатика)» / Л.В. Молчан, О.В. Славинская. – [Электронный ресурс, регистрационный номер № УД-4-834/уч. от 19.03.2018 г.] – Минск: БГУИР, 2018.

# МЕТОД ПРЕКОДИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ СОСТОЯНИИ КАНАЛА СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ СИСТЕМЫ MIMO

Фам Хю Ань , магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Саломатин С.Б. – канд. тех. наук, доцент

**Аннотация:** В статье рассматриваются метод использования информации о состоянии канала на передающей стороне системы MIMO, схема канала обратной связи системы MIMO и её математическая модель.

**Ключевые слова:** система MIMO, Информация о состоянии канала – CSI, система дуплексной связи с временным разделением – TDD, система дуплексной связи с частотным разделением – FDD.

Ключевая технология четвертого поколения (4G) – системы связи LTE, технология с множеством входов и множеством выходов (MIMO) имеет множество преимуществ, таких как высокая эффективность использования спектра, большая емкость системы, высокая надежность системы. Таким образом, MIMO привлекает все больше и больше внимания со стороны промышленности и научных кругов. Однако значительные преимущества технологии MIMO могут в значительной степени определяться тем фактом, что передатчик может получать информацию о состоянии канала (Channel State Information – CSI) нисходящей линии связи.

Информация о состоянии канала, доступная на передающей стороне, используется для предварительной обработки передаваемой полезной информации – её предварительного кодирования.

Как правило, передатчик не имеет прямого доступа к информации о состоянии своего собственного канала. Следовательно, для передатчика требуются некоторые косвенные средства. В системе дуплексной связи с временным разделением каналов (TDD) мы можем использовать взаимность каналов между противоположными линиями связи (нисходящей и восходящей). На основе сигнала, полученного с противоположного направления, это позволяет получить косвенную оценку канала. В системе дуплексной связи с частотным разделением (FDD), которая обычно не имеет взаимности между противоположными направлениями, передатчик полагается на информацию обратной связи канала от приемника. Другими словами, информация о состоянии канала должна быть оценена на стороне приемника, а затем возвращена на сторону передатчика.

В настоящее время известны два основных способа получения передатчиком информации о состоянии канала связи:

- основанный на свойстве взаимности линейного канала связи;
- основанный на использовании обратной связи от приемника к передатчику.

Рассматривается система беспроводной связи MIMO в режиме FDD с  $N_T$  передающими антеннами и  $N_R$  приемными антеннами ( $N_T \geq 1, N_R \geq 1$ ), канал является каналом с рэлеевскими плоскими замираниями.

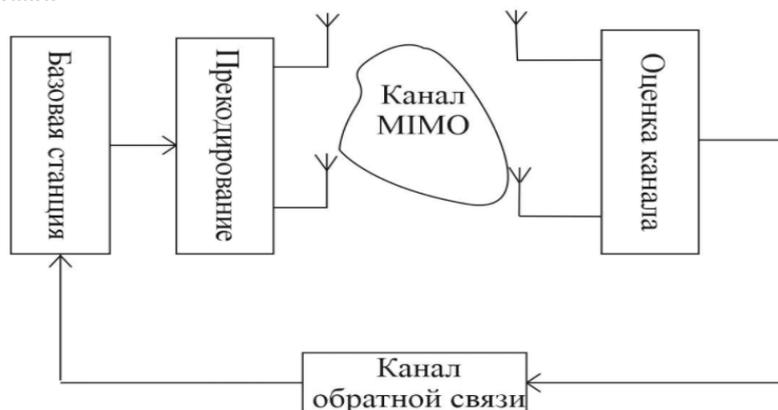


Рисунок 1 – Структурная схема системы MIMO с прекодированием

На стороне базовой станции прекодирует поток данных и затем передает сигнал. После приема сигнала пользовательская сторона сначала получает информацию о состоянии канала с помощью алгоритма оценки канала, затем обрабатывает её и, наконец, возвращает на базовую станцию через канал восходящей линии связи. На стороне базовой станции восстанавливает

информацию о состоянии канала, и выполняет прекодирование и тому подобное с использованием полученной информации о состоянии канала.

Векторно-матричная модель определяет:

– передаваемый вектор:  $s = s[k] = [s_1[k], s_2[k], \dots, s_{N_T}[k]]^T$ ;

– вектор шума:  $\eta = \eta[k] = [\eta_1[k], \eta_2[k], \dots, \eta_{N_R}[k]]^T$ ;

– принимаемый вектор:  $y = y[k] = [y_1[k], y_2[k], \dots, y_{N_R}[k]]^T$ .

Модель принимаемого сигнала в системе связи MIMO может быть записана в следующей форме:

$$y = HU + \eta; \quad (1)$$

где  $H$  – матрица канала,  $U$  – прекодирующая матрица.

**Результат моделирования.** График зависимости вероятности появления ошибки от отношения сигнал/шум представлен на рисунке 2.

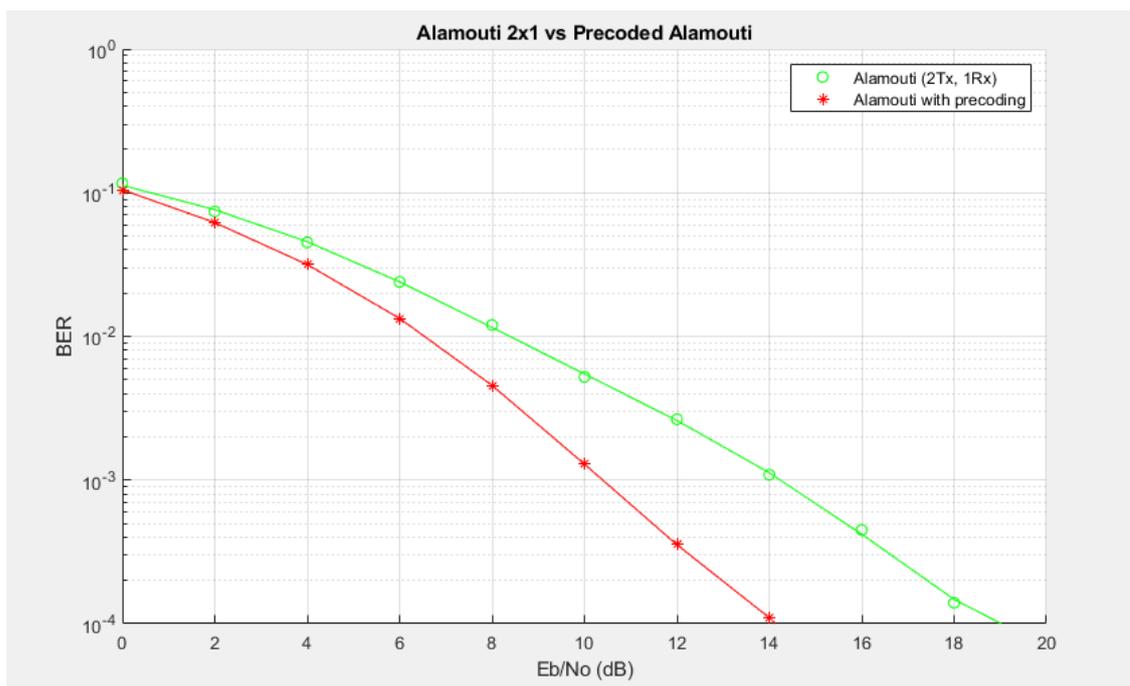


Рисунок 2 – Зависимость вероятности появления ошибки от отношения сигнал/шум в системах MIMO на основе кода Аламоути без прекодирования и с прекодированием

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- Для вероятности ошибки равной  $10^{-4}$  энергетический выигрыш кода Аламоути с прекодированием над кодом Аламоути без прекодирования составляет 5 дБ.

**Заключение.** Прекодирование позволяет согласовать передаваемый сигнал с характеристиками канала связи системы MIMO, что и приводит к улучшению её характеристик по сравнению с системой связи MIMO без такого согласования.

**Список использованных источников:**

1. Бакулин М. Г., Варукина Л. А., Крейнделин В. Б. *Технология MIMO: принципы и алгоритмы.* – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 244 с., ил.
2. Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang - *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*, IEEE 2010.
3. Erik G. Larsson, Petre Stoica - *Space-Time Block Coding for Wireless Communications*
4. Mulkavilli, K. K., Sabharwal, A., and Aazhang, B. (2001). *Design of multiple antenna coding schemes with channel feedback.* In Proc. of Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, pages 1009 – 1013, Pacific Grove, CA.

## ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛИ «БУКЕТ В МОМЕНТ» ДЛЯ КОМПАНИИ ООО «ГОЛДЕН ФЛОВЕРС»

Язвинский К.А., студент гр.844691

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Славинская О.В. – канд. пед. наук, доцент

**Аннотация.** Современные технологии шагнули далеко вперед, и если раньше покупка товаров в сети казалась чем-то заоблачным и нереальным, то сегодня создание интернет-магазина является одним из наиболее прибыльных и стабильных источников дохода. Благодаря развитию технологий сегодня можно не только купить одежду или технику, но и каждый может заказать в интернете еду с доставкой или вызвать врача на дом. Представленное в статье программное средство позволяет упростить процесс продажи/покупки цветов через интернет и оптимизировать расходы.

Актуальность разработки программного средства розничной торговли «Букет в момент» обусловлена необходимостью оптимизации расходов и упрощения процесса продажи/покупки букетов. Программное средство разрабатывается для компании ООО «Голден Фловерс» и получило название «Букет в момент». Такое название было выбрано в связи с тем, что для осуществления заказа, пользователю необходимо не более 5 минут. После того, как заказ оформлен, он будет доставлен в ближайшее время или как звучит в названии «в момент».

С первого взгляда кажется, что продажа цветов не требует слишком больших познаний в бизнесе или экономике, но есть ряд факторов, которые показывают, что это очень непростое дело.

1 Влияние сезонности. Не всегда цветы преподносят по знаменательным поводам, чаще их дарят именно в честь праздников. Активная торговля идет на День святого Валентина, Международный женский день, в государственные и профессиональные праздники.

2 Непродолжительный срок хранения. Цветы – товар, быстро приходящий в негодность. Частая смена воды, добавление в нее специальных веществ – действенные способы продлить жизнь срезанного растения, но рассчитывать на сохранение его дольше одной недели не следует.

3 Высокий уровень чистой прибыли, которая может достигать 200-300 процентов. Высокий доход приносят авторские букеты под заказ, композиции из экзотических цветов.

4 Высокая конкуренция. Перенасыщение рынка тормозит развитие бизнеса, но только в офлайн-сегменте. Большинство продавцов считает онлайн-торговлю цветами занятием невыгодным и сложным, но они заблуждаются. Покупатели готовы заказывать цветы онлайн, если у вас есть курьерская доставка на домашний или другой адрес к нужному времени. [1]

За счет разработки программного средства планируется сократить затраты на:

– аренду торговой точки – так, как для покупки букета пользователю достаточно зайти на сайт, следовательно, необходимость в торговой точке отпадает;

– персонал – так, как торговые точки больше не нужны, то и персонал работающий в них, то же не нужен, так как все обязанности будет выполнять один специалист — администратор интернет-магазина.

Цветы могут доставляться со склада напрямую по адресу, указанному покупателем — по цене, более низкой, чем у конкурентов в офлайн-магазинах. Также программное средство позволит упростить процесс покупки букета, покупатель может осуществить выбор и покупку букета не выходя из дома. Существенную роль, в принятии решения по разработке программного средства сыграла пандемия, которая изменила жизнь людей навсегда и привела к снижению социальных контактов людей. Мы полагаем, что в период постпандемии алгоритмы поступков людей уже не будут прежними. Покупатели, которые перешли в онлайн-формат, оценили выгоду этого и останутся с продавцом.

Требования заказчика к программному средству:

- предоставление информации о букетах;
- удобный и современный дизайн;
- доступность;
- мультязычность;
- мультивалютность.

Задачи, поставленные при разработке программного средства:

- предоставление информации о букетах;
- предоставление информации о новинках, скидках и акциях;
- возможность размещения отзывов покупателей;
- уменьшение затрат времени на приобретение букета;

– возможность добавления к заказу сопутствующих товаров (открыток, тортов, игрушек, конфет);

– предоставление онлайн-консультаций в реальном времени.

Разработанное программное средство розничной торговли «Букет в момент» включает в себя следующие элементы: «Регистрацию», «Личный кабинет», «Историю заказов», «Добавление отзыва», «Мультиязычность», «Мультивалютность», «Новостной блок». На рисунке 1 представлена главная страница программного средства «Букет в момент».

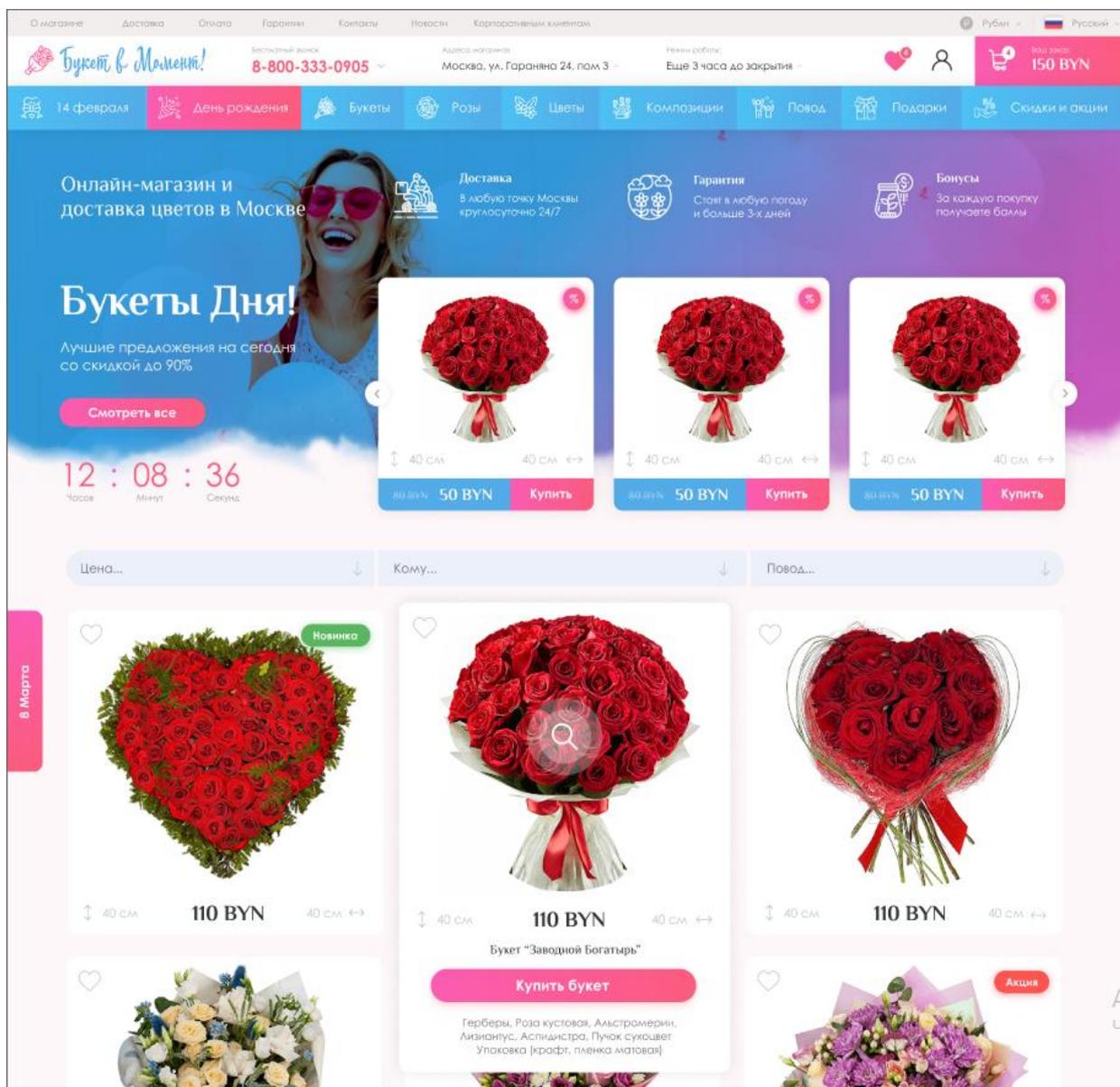


Рисунок 1 – Главная страница программного средства «Букет в момент»

При создании программного средства были использованы следующие средства разработки: интегрированная среда разработки JetBrains PhpStorm, система управления содержимым OpenCart, языки программирования PHP и JavaScript, язык управления реляционными базами данных SQL, реляционная система управления базами данных MySQL, язык разметки документов HTML, язык стилей CSS, технология AJAX.

Благодаря разработанному программному средству розничной торговли «Букет в момент» — пользователи получают удобное, простое в использовании средство, позволяющее не выходя из дома не только приобрести букет, но и дополнить заказ сопутствующими товарами. С точки зрения заказчика программное средство позволяет оптимизировать расходы за счет сокращения затрат на аренду точек, персонал, привлечь новых клиентов и освоить новые рынки сбыта.

**Список использованных источников:**

1. Как открыть цветочный интернет-магазин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://recommerce.by/blog/pomosh/kak-otkryt-cvetochnyi-internet-magazin>. – Дата доступа: 29.03.2021.

# ОБЗОР СТАНДАРТОВ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Олехнович Е.В., магистрант гр. 945341

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Козел В.М. – канд. техн. наук, доцент

**Аннотация.** Данная статья носит обзорный характер беспроводных технологий, используемых в интеллектуальных транспортных системах. Таким образом, цели этой статьи заключаются в классификации беспроводных технологий на основе их диапазона передачи и дальности действия

Ключевые слова. Интеллектуальная транспортная система, автономное транспортное средство, беспроводные системы, Bluetooth, ZigBee, UWB, Wi-Fi, DSRC, C-V2X, 5G-NR.

Технологии облегчают работу человека, повышают производительность и ведут к улучшению качества жизни. Технологические разработки и автоматизация транспортных систем приведут к повышению безопасности движения, где традиционная транспортная система становится все более неорганизованной и неэффективной. Поэтому ранее была предложена концепция развития интеллектуальных транспортных систем (ИТС).

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) - это системная интеграция современных информационных и коммуникационных технологий и средств автоматизации с транспортной инфраструктурой, транспортными средствами и пользователями, ориентированная на повышение безопасности и эффективности транспортного процесса, комфортности для водителей и пользователей транспорта. [1]

На рисунке 1 показаны три основные области применения системы ИТС.

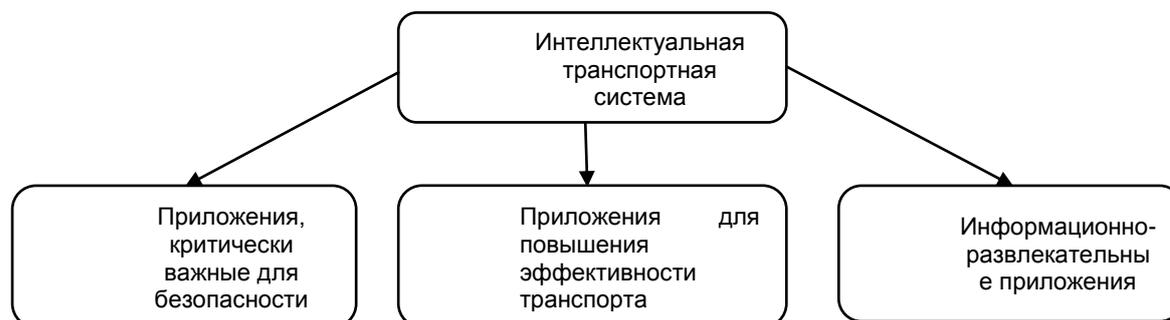


Рисунок 1 – Основные области применения ИТС

Основная задача приложения для повышения транспортной эффективности включает в себя расчёт оптимальной скорости и маршрута для перемещения транспортного средства к месту назначения с учётом информации о дорожном движении [2]. Приложения, критически важные для безопасности, используются для передачи управляющих сигналов по изменению скорости, эффективности, безопасности и надёжности. Информационно-развлекательные приложения связаны с совместным предоставлением локальных услуг, таких как определение местоположения заправочных станций, гостиниц и т.д.

Основная цель разработки беспилотных/автономных транспортных средств заключается в том, чтобы сделать вождение более безопасным и надёжным, а также уменьшить заторы. Для этого необходимо, чтобы эти транспортные средства поддерживали надёжную связь с другими транспортными средствами и окружающей инфраструктурой. Автономное транспортное средство может взаимодействовать с другими транспортными средствами и сетевой инфраструктурой с помощью различных беспроводных технологий. Беспроводные технологии, используемые в ИТС, могут быть дифференцированы с точки зрения дальности связи.

Технологии дальнего радиуса действия позволяют передавать данные, находясь на расстоянии нескольких километров друг от друга; примерами являются коммуникации C-V2X и 5G-NR. Коммуникации средней дальности, использующие беспроводную локальную сеть (WLAN) или DSRC, могут обеспечить покрытие в радиусе десятков или сотен метров. Технологии связи малого радиуса действия включают Bluetooth, UWB и ZigBee.

Технология Bluetooth, основанная на протоколе IEEE 802.15.1, может быть использована в качестве технологии связи малого радиуса действия в автомобильной сети [3]. Она работает в диапазоне 2,4 ГГц и может обеспечивать скорость передачи данных до 1-4 Мбит/с с переменным радиусом действия. Дальность действия Bluetooth варьируется в зависимости от условий распространения, чувствительности и коэффициента усиления передающей и приёмной антенн [4]. Wi-Fi и Bluetooth используют одну и ту же полосу частот, поэтому, чтобы избежать интерференции, в Bluetooth используется частотно-скачкообразный спектр (FHSS).

Технология ZigBee была разработана для удовлетворения потребности в недорогих и маломощных беспроводных сетях Интернета вещей (IoT). Поддерживаемый диапазон связи составляет до 100 м при скорости передачи данных около 250 кбит/с [5]. Он также признан IEEE 802.15.4 для низкоскоростных беспроводных персональных сетей (LRWPAN) и использует различные частотные диапазоны (868 МГц, 902-968 МГц и 2,4 ГГц). В ZigBee для модуляции BPSK или OQPSK.

UWB рассматривается как технология беспроводной связи малой дальности, использующая короткие импульсы в полосе частот 3,1-10,6 ГГц [6]. Используя UWB, устройства могут работать при очень низкой мощности, а также поддерживать множество пользователей со скоростью передачи данных более 480 Мбит/с.

Сравнение технологий связи малого радиуса действия приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение технологий связи малого радиуса действия

Параметр	Bluetooth	BLE	ZigBee	UWB
Стандарт	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.3
Частотный диапазон	2.402–2.481 ГГц	2.402–2.481 ГГц	868/902–968 МГц, 2.4 ГГц	3.1–10.6 ГГц
Ширина полосы	1	2	0.3/0.6 МГц, 2 МГц	500 МГц – 7.5 МГц
Скорость	1–3 Мбит/с	1 Мбит/с	20–250 кбит/с	480 Мбит/с
Дальность (м)	10	50	75–100	75
Задержка (мс)	100	6	30	0.1
Модуляция	GFSK	GFSK	BPSK, O-QPSK	BPSK-QPSK
Степень помехоустойчивости	16-bit CRC	24-bit CRC	16-bit CRC	32-bit CRC

DSRC - это стандарт, специально предложенный для надёжной связи между транспортными средствами и сетевой инфраструктурой. WAVE/DSRC является модифицированной версией технологии Wi-Fi (IEEE 802.11), и набор стандартов, таких как IEEE 802.11p и IEEE 1609.x. Помех между DSRC и Wi-Fi можно избежать, установив частотный спектр в DSRC намного выше, чем спектр Wi-Fi. Разница между Wi-Fi и DSRC приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение технологий связи средней дальности

Параметр	Wi-Fi	DSRC
Стандарт	IEEE 802.11a	IEEE 802.11p
Ширина канала	20	10
Модуляция	OFDM	OFDM
Пропускная способность	до 54	до 27
Тип модуляция	до 64QAM	до 64QAM
Длительность символа (мкс)	4	8
Защитный интервал (мкс)	0.8	1.6
Размер БПФ	64	64
БПФ период (мкс.)	3.2	6.4
Длительность заголовка (мкс)	16	32
Частотный разнос поднесущих (МГц)	0.3125	0.15625
Частотный диапазон	5	5.9
Задержка (мс)	50	100
Дальность (м)	100	300

Транспортные средства обмениваются данными с окружающей средой через сотовую сеть [7]. Технология C-V2X была представлена в релизе 14 3GPP, а в релизе 15 3GPP она получила дальнейшее развитие, чтобы соответствовать критериям связи 5G.

Целью стандарта 5G-NR, разработанного 3GPP, является обеспечение более высокой скорости передачи данных, снижение задержек и обеспечение связи между множеством устройств.

Сравнение двух технологий приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение технологий связи дальнего радиуса действия

Параметр	C-V2X	5G-NR V2X
Разнос поднесущих (кГц)	15	до 240
Объединение несущих	до 32	до 16
Ширина канала (МГц)	20	400
Задержка (мс)	<10	<1
Надёжность	95–99%	99.9–99.999%
Канальное кодирование	Turbo	LDPC, Polar
Логическое расслоение сети	да	нет
Метод доступа	SC-FDMA	OFDM
Способ уплотнения канала	FDM	TDM
Тип модуляции	16 или 64QAM	256 QAM
Тип связи	Широковещательный	Широковещательный, многоадресный и одноадресный
Безопасность и конфиденциальность	Базовая	Улучшенная
Точность позиционирования (м)	>1	0.1
Частотный диапазон	800/1800 МГц	700 МГц /3.6 и 26 МГц МГц
Дальность	100 м до >5 км	50 м до >5 км

### Заключение

Таким образом, автономное транспортное средство может взаимодействовать с другими транспортными средствами и сетевой инфраструктурой с помощью различных беспроводных технологий. В статье эти технологии дифференцируются в зависимости от дальности действия. В результате Bluetooth, BLE, ZigBee и UWB сгруппированы как технологии ближнего действия, в то время как DSRC и Wi-Fi считаются технологиями среднего радиуса действия. Аналогичным образом, C-V2X и 5G-NR определены как технологии дальнего действия

#### Список использованных источников:

1. Интеллектуальные транспортные системы Справочник по системам сухопутной подвижной связи (включая беспроводной доступ) Том 4 Международный союз электросвязи. Бюро радиосвязи, 2006.
2. D'Orey, P.M.; Ferreira, M. ITS for Sustainable Mobility: A Survey on Applications and Impact Assessment Tools. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2014, 15, 477–493.
3. Lin, J.; Talty, T.; Tonguz, O.K. On the potential of bluetooth low energy technology for vehicular applications. *IEEE Commun. Mag.* 2015, 53, 267–275.
4. De Cerio, D.P.-D.; Valenzuela, J.L. Provisioning Vehicular Services and Communications Based on a Bluetooth Sensor Network Deployment. *Sensors* 2015, 15, 12765–12781.
5. Wheeler, A. Commercial Applications of Wireless Sensor Networks Using ZigBee. *IEEE Commun. Mag.* 2007, 45, 70–77.
6. Ahmed, Q.Z.; Park, K.; Alouini, M.S. Ultrawide Bandwidth Receiver Based on a Multivariate Generalized Gaussian Distribution. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2015, 14, 1800–1810.
7. Molina-Masegosa, R.; Gozalvez, J. LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications. *IEEE Veh. Technol. Mag.* 2017, 12, 30–39.

## СЕКЦИЯ «МИКРО-И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 539.23 + 533.343.2

### ФОРМИРОВАНИЕ, СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК CaSi НА Si(111)

Кропачев О.В.<sup>1</sup>, Чернев И.М.<sup>1</sup>, Галкин К.Н.<sup>1</sup>, Алексеев А. Ю.<sup>2</sup>

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН<sup>1</sup>*

*г. Владивосток, Российская Федерация*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>2</sup>*

*г. Минск, Республика Беларусь*

*Галкин Н.Г.<sup>1</sup> – док. физ.-мат. наук, профессор*

*Миас Д.Б.<sup>2</sup> – док. физ.-мат. наук, доцент*

**Аннотация.** В работе исследован рост, структура и оптические свойства однофазных пленок CaSi на кремниевой подложке с ориентацией Si(111). Рентгеноструктурный анализ показал, что фазовый состав и кристаллическая структура пленок представляют собой поликристаллические пленки CaSi с преобладающей ориентацией CaSi(220) при росте методом молекулярно-лучевой эпитаксии и CaSi(010) – при росте методом реактивной эпитаксии. По данным оптической спектроскопии рассчитаны основные оптические функции пленки в диапазоне энергий фотонов 0.05 – 1.2 эВ. Проведено сравнение экспериментальных оптических данных с данными первопринципных расчетов оптических свойств CaSi. Показано хорошее совпадение основных межзонных переходов в спектрах оптических функций.

**Ключевые слова.** Моносилицид кальция, кремний, затравочный слой, молекулярно-лучевая эпитаксия, реактивная эпитаксия, структура, первопринципные расчеты, электронная структура, оптические функции, сравнение эксперимента и теории.

Силициды кальция являются экологически чистыми материалы и занимают особое место среди силицидов щелочноземельных металлов. Это связано в первую очередь с широким набором свойств силицидов кальция от полупроводниковых [1] до полуметаллических [2]. Это может привести к их широкому использованию в различных областях техники и электроники. Однако рост однофазных пленок моносилицида кальция на кремнии и исследование его оптических свойств осложнены из-за наличия не менее 6 силицидов разного состава в системе Ca-Si [3] и отсутствия методов выделения преимущественной ориентации при росте силицидов на кремнии.

Данная работа посвящена апробации двух методов роста моносилицида кальция на кремнии с ориентацией (111) методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) с использованием затравочного (жертвенного слоя) Mg<sub>2</sub>Si и методом реактивной эпитаксии (РЭ). Для выращенных пленок исследованы структура и оптические свойства, а также проведено их сравнение с данными первопринципных расчетов оптических функций из электронной структуры CaSi.

Рост пленок моносилицида кальция (CaSi) проводился в сверхвысоковакуумных (СВВ) камерах установок OMICRON Compact и VARIAN с базовым вакуумом  $1 \cdot 10^{-10}$  Торр, оснащенных анализатором ДМЭ и ЭОС/ХПЭЭ, блоком молекулярно-лучевых источников кремния (Si) и кальция (Ca) для проведения осаждения Ca, Mg и Si на кремниевые подложки. Рост пленки CaSi на подложке Si(111) (образец А) осуществлялся в СВВ-камере OMICRON Compact методом МЛЭ на предварительно сформированный затравочный (жертвенный) слой Mg<sub>2</sub>Si, который трансформировался в затравочный слой CaSi при осаждении Ca при T=250 °С. Для увеличения толщины слоя моносилицида кальция далее соосаждали атомы кальция и кремния в соотношении 4:1 при температуре 400 °С. В СВВ-камере VARIAN рост CaSi проводили методом РЭ (образец В) при температуре 500 °С и осаждении кальция на Si(111)7x7 с высокой скоростью (8.5 нм/мин). В СВВ-камерах скорости осаждения Ca, Mg и Si, откалиброванные по кварцевым датчикам толщины, составляли (2,0 и 8,5) нм/мин, 0.4 нм/мин и 0,5 нм/мин, соответственно, в разных экспериментах.

Спектры отражения (R-спектры) и спектры пропускания (Т-спектры) выращенных образцов регистрировали в течение одного дня после выгрузки при комнатной температуре в диапазоне энергий фотонов 0,05-6,20 эВ на спектрофотометре Hitachi U-3010 и Фурье-спектрометре Bruker Vertex 80v. Расчеты оптических функций проводили в области прозрачности из спектров пропускания и отражения. Структура пленок моносилицида Ca изучалась на дифрактометре RIGAKU SmartLab (вращающийся анод мощностью 9 кВт, CuK $\alpha$ -излучение, параллельный пучок (СВО-оптика), режим 2 $\theta$ / $\omega$ , размер падающего пучка 0,1 мм), с использованием кремниевого держателя образца с нулевым фоном и NuPix-3000 детектора (режим измерения 1D). Дифракционная картина записывалась в диапазоне углов 2 $\theta$  от 5° до 80°, с шагом 2 $\theta$  0,01°. Расчеты электронной зонной структуры и оптических функций также были выполнены с помощью метода самосогласованных

полнопотенциальных линейризованных дополненных плоских волн (FLAPW) в его скалярно-релятивистской версии с использованием пакета WIEN2k [4].

После выгрузки образцов из ростовых камер были проведена регистрация спектров пропускания и отражения в диапазоне энергий фотонов от 0.05 эВ до 6.5 эВ. Основными особенностями для обоих образцов явились частичная прозрачность пленок CaSi в диапазоне энергий фотонов 0.2 – 1.1 эВ и плазменный минимум в отражении (Рис. 1 а), что ранее наблюдалось для пленок CaSi<sub>2</sub> [5] с полуметаллическими свойствами. Сравнение с данными теоретических

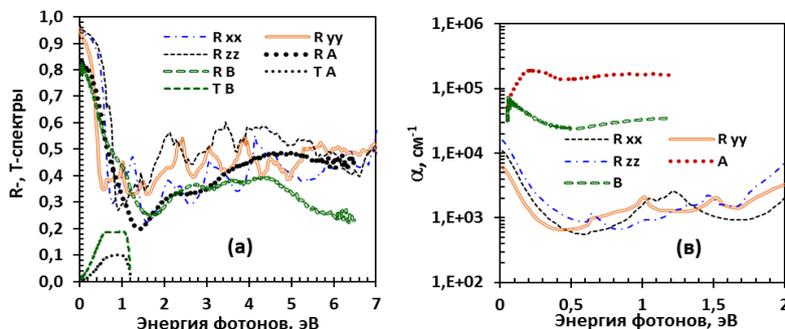


Рисунок 1 – (а) Спектры отражения (R) и пропускания (T) пленок CaSi в образцах А и В и результаты расчета спектров отражения монокристалла CaSi для различных плоскостей: xx, yy, zz. (б) спектры коэффициента поглощения для пленок CaSi в образцах А и В и для монокристалла CaSi (плоскости: xx, yy, zz)

спектров отражения для трех плоскостей монокристалла CaSi (рисунок 1а) показывает хорошее совпадение по положению плазменного минимума, который связан с вкладом двух типов носителей, согласно данным расчетов, проведенных в данной работе. Спектры отражения также согласуются по величине и положению основных пиков в диапазоне энергий фотонов 1.5 – 6.5 эВ, что соответствует основным межзонным переходам в монокристалле CaSi. Расчеты из R- и T- спектров коэффициентов поглощения ( $\alpha$ ) для выращенных пленок CaSi показали существенные значения ( $3 \times 10^4 - 2 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$ ) в области менее 1.2 эВ (рисунок 1в), что можно связать с вкладом дефектов в пленках CaSi, на которых происходит дополнительное поглощение фотонов. Это подтверждается сравнением с данными для монокристалла CaSi (рисунок 1в), для которого коэффициент поглощения при энергиях фотонов 0.5 - 1.2 эВ меньше на полтора – два порядка по величине.

Сравнение данных действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости для монокристалла CaSi и текстурированных пленок CaSi (рисунок 2) показывает близкий характер зависимостей в диапазоне энергий 0.4 -1.2 эВ. Основные отличия наблюдаются при энергиях фотонов менее 0.2 эВ, что может быть связано с определенными ошибками при регистрации спектров отражения и пропускания от пленок, обладающих определенной шероховатостью, а значит и дополнительными потерями на отражение.

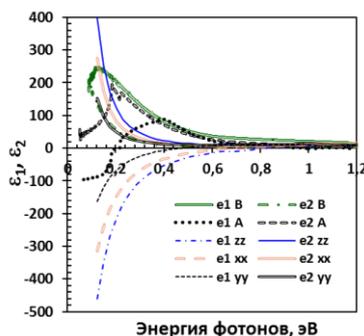


Рисунок 2 – Спектры действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости для пленок CaSi в образцах А и В для монокристалла CaSi для различных плоскостей: xx, yy, zz

В работе апробированы два метода роста однофазных пленок CaSi на кремнии с ориентацией (111) и определена текстура, которая зависит от температуры подложки при росте и скорости осаждения кальция. Проведены расчеты оптических функций выращенных пленок и сравнение с данными оптических функций, полученных из результатов первопринципных расчетов зонной структуры монокристалла CaSi.

Эти исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ-БРФФИ № 20-52-00001\_Бел\_а.

#### Список использованных источников:

1. Calculated quasiparticle and optical properties of orthorhombic and cubic Ca<sub>2</sub>Si / S. Lebegue // Phys. Rev. B, – 2005. - V. 72. – P. 085103(1-9).

2. *Chemical bond and electronic states in calcium silicides: Theory and comparison with synchrotron-radiation photoemission* / O. Bisi [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 1989. – V. 40. – P. 10194-1202.
3. *The phase diagram of the Ca-Si system* / P. Manfrinetti [et al.] // *Intermetallics*, 2000. – V. 8. – P. 223-228.
4. P. Blaha, [et al.], *WIEN2k, An Augmented Plane Wave + Local Orbitals Program for Calculating Crystal Properties* (Karlheinz Schwarz, Tech. Universität Wien, Vienna, 2001).
5. *Conducting CaSi<sub>2</sub> transparent in infra-red* / N.G. Galkin [et al.] // *J. Alloys and Compounds*, -2019. – V. 770. – P. 710-720.

УДК 539.23 + 533.343.2

## СТРУКТУРА, ОПТИЧЕСКИЕ И ФОНОННЫЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК Ca<sub>2</sub>Si И CaSi<sub>2</sub> НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

Кропачев О.В.<sup>1</sup>, Чернев И.М.<sup>1</sup>, Галкин К.Н.<sup>1</sup>, Алексеев А. Ю.<sup>2</sup>

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН<sup>1</sup>  
г. Владивосток, Российская Федерация*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>2</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Галкин К.Н.<sup>1</sup> – док. физ.-мат. наук, профессор*

*Миас Д.Б.<sup>2</sup> – док. физ.-мат. наук, доцент*

**Аннотация.** В работе исследован рост, структура и оптические свойства эпитаксиальных пленок Ca<sub>2</sub>Si и CaSi<sub>2</sub> на кремниевых подложках с ориентациями Si(111), Si(100) и Si(110). Проведено сравнение экспериментальных и теоретических данных оптической спектроскопии и получено соответствие в области межзонных переходов, а также - в области фононов.

**Ключевые слова.** Полусилицид и дисилицид кальция, пленки, кремний, затравочный слой, молекулярно-лучевая эпитаксия, реактивная эпитаксия, структура, первопринципные расчеты, оптические функции, сравнение эксперимента и теории.

В системе кальций – кремний формируется не менее шести силицидов [1], которые обладают, как металлическими и полуметаллическими [2], так и полупроводниковыми свойствами [3]. Поскольку силициды кальция сформированы из экологически чистых и широко распространенных в земной коре элементов, они представляют заметный интерес для кремниевой электроники и оптоэлектроники. Наиболее известный и получаемый в виде пленок полупроводниковый полусилицид кальция (Ca<sub>2</sub>Si) в основном исследован на кремнии с ориентацией (111) [4], а исследования его структуры и оптических свойств на других поверхностях еще не проводились. Дисилицид кальция (CaSi<sub>2</sub>) является полуметаллом с не полностью определенными свойствами в виде эпитаксиальных пленок [5].

Данная работа посвящена апробации двух методов роста Ca<sub>2</sub>Si и CaSi<sub>2</sub> на кремнии с ориентациями (111), (100) и (110) методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) с использованием затравочного (жертвенного слоя) Mg<sub>2</sub>Si и методом реактивной эпитаксии (РЭ). Для выращенных пленок исследованы структура и оптические свойства, а также проведено их сравнение с данными первопринципных расчетов оптических функций из электронной структуры, как Ca<sub>2</sub>Si, так и CaSi<sub>2</sub>.

Рост пленок моносилицида кальция (CaSi) проводился в сверхвысоковакуумных (СВВ) камерах установок OMICRON Compact и VARIAN с базовым вакуумом 1·10<sup>-10</sup> Торр, оснащенных анализатором ДМЭ и ЭОС/ХПЭЭ, блоком молекулярно-лучевых источников кремния (Si) и кальция (Ca) для проведения осаждения Ca, Mg и Si на кремниевые подложки. Рост пленок Ca<sub>2</sub>Si всех подложек осуществлялся при соосаждении Si и Ca при температуре 250 °С на предварительно сформированный затравочный слой Mg<sub>2</sub>Si, который преобразовывался в Ca<sub>2</sub>Si при осаждении атомов Ca на подложку при 250 °С. В СВВ-камере VARIAN рост пленок CaSi<sub>2</sub> на всех типах подложек проводили методом РЭ при T=475-650 °С и осаждении Ca на Si(111)7x7 с различными скоростями (0.5 - 8.5 нм/мин). Скорости осаждения (Ca, Mg и Si) калибровались по кварцевому датчику толщины. Всего было выращено 14 образцов, но анализ оптических свойств проводился только для однофазных образцов или образцов с преобладающей одной фазой силицида: Ca<sub>2</sub>Si или CaSi<sub>2</sub>.

Спектры отражения (R-спектры) и спектры пропускания (Т-спектры) выращенных образцов регистрировали в течение одного дня после выгрузки при комнатной температуре в диапазоне энергий фотонов 0,05-6,20 эВ на спектрофотометре Hitachi U-3010 и Фурье-спектрометре Bruker Vertex 80v. Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) с длиной волны возбуждающего излучения 488 нм регистрировали при комнатной температуре на спектрофотометре LabRam HR 800 после хранения образца не более 2 суток. Расчеты электронной зонной структуры и оптических функций также были выполнены с помощью метода FLAPW в его скалярно-релятивистской версии с использованием пакета WIEN2k [6].

После выгрузки образцов из ростовых камер были проведена регистрация спектров пропускания и отражения в диапазоне энергий фотонов от 0.05 эВ до 6.5 эВ. Основными особенностями для выбранных образцов с пленками  $\text{Ca}_2\text{Si}$  явилась прозрачность в диапазоне энергий фотонов 0.05 – 1.2 эВ (рисунок 1а), а для всех образцов с пленками  $\text{CaSi}_2$  наблюдалась частичная прозрачность в диапазоне энергий фотонов 0.4 – 1.1 эВ и плазменный минимум в отражении (рисунок 1б), что ранее наблюдалось для пленок  $\text{CaSi}_2$  [5] на подложке  $\text{Si}(111)$  с полуметаллическими свойствами. Сравнение с данными теоретических спектров отражения для трех

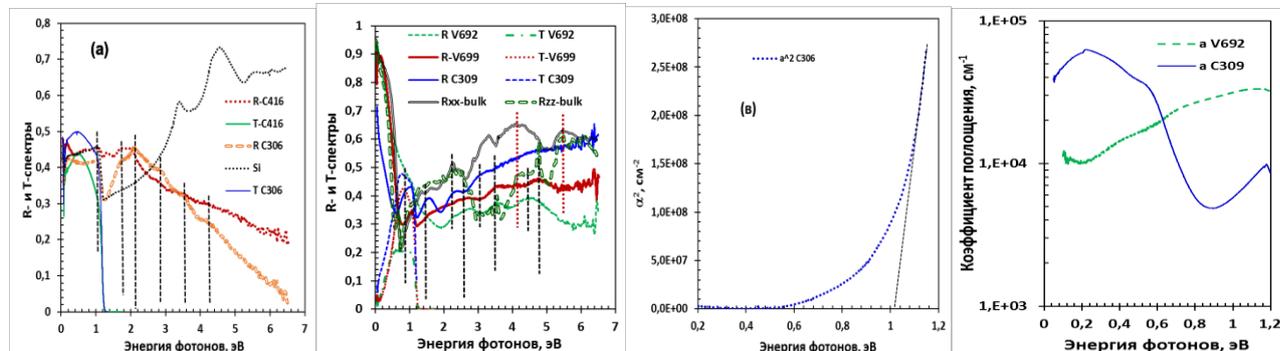


Рисунок 1 – (а) Спектры отражения (R) и пропускания (T) пленок  $\text{Ca}_2\text{Si}$  в образцах А, В и С; (б) спектры отражения (R) и пропускания (T) пленок  $\text{CaSi}_2$  в образцах D, E и F и результаты расчета спектров отражения монокристалла  $\text{CaSi}_2$  для различных плоскостей: xx и zz; (в) спектры квадрата коэффициента поглощения для пленок  $\text{Ca}_2\text{Si}$  в образцах А и В и монокристалла  $\text{Ca}_2\text{Si}$  для различных плоскостей: xx, yy, zz; (г) спектры коэффициента поглощения для пленок  $\text{CaSi}_2$  в образцах D и E и для монокристалла  $\text{CaSi}_2$  (плоскости: xx, yy, zz) плоскостей монокристаллов  $\text{Ca}_2\text{Si}$  (рисунок 1а) и  $\text{CaSi}_2$  (рисунок 1б) показывает хорошее совпадение по пикам в  $\text{Ca}_2\text{Si}$  и  $\text{CaSi}_2$ , что соответствует основным межзонным переходам в монокристаллах. Также следует отметить близкие положения плазменного минимума по данным эксперимента и расчетов в  $\text{CaSi}_2$  (рисунок 1 б), который связан с вкладом двух типов носителей, согласно данным расчетов, проведенных в этой работе и работе [5]. Расчеты из R- и T- спектров коэффициентов поглощения ( $\alpha$ ) для выращенных пленок показали для  $\text{Ca}_2\text{Si}$  существование прямого межзонного перехода 1.05 эВ (рисунок 1 в), а для  $\text{CaSi}$  - существенные значения ( $3 \times 10^4 - 2 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ) в области менее 1.2 эВ (рисунок 1г), что можно связать с вкладом дефектов в пленках  $\text{CaSi}$ . Это подтверждается сравнением с данными первопринципных расчетов для монокристаллов  $\text{Ca}_2\text{Si}$  (рисунок 1 в) и  $\text{CaSi}$  (рисунок 1г), для которых значения  $\alpha$  при 0.5 - 1.2 эВ несколько меньше.

Спектры поглощения в дальней ИК области для пленок  $\text{Ca}_2\text{Si}$  (рисунок 1б) близки к теоретическим значениям положения фононов [7]. Интенсивность пиков фононов максимальна для пленки на  $\text{Si}(111)$ , что соответствует ее лучшему кристаллическому качеству по сравнению с подложками  $\text{Si}(100)$  и  $\text{Si}(110)$ . Кристаллическое качество пленок  $\text{Ca}_2\text{Si}$  также подтверждается данными КРС спектров (рисунок 2б) и совпадает с данными расчетов [7]. Пики в спектрах КРС для однофазных пленок  $\text{CaSi}_2$  (рисунок 2в) зарегистрированы впервые (201,3; 330,0; 381,9; 412,2 и 439,5  $\text{cm}^{-1}$ ), а их величина и полуширина соответствуют высокому кристаллическому качеству пленок  $\text{CaSi}_2$ .

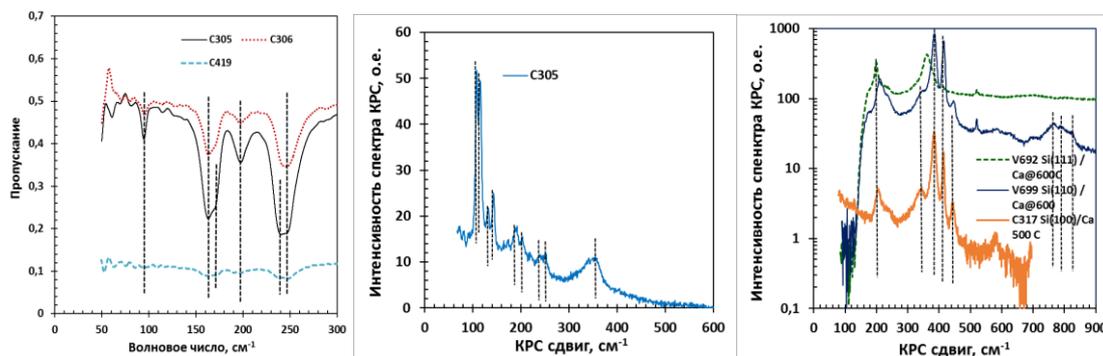


Рисунок 2 – (а) Колебательные спектры в диапазоне частот 0 – 300  $\text{cm}^{-1}$  для пленок  $\text{Ca}_2\text{Si}$  в образцах А, Б и В; спектры комбинационного рассеяния света - для пленок  $\text{Ca}_2\text{Si}$  в образцах А и В (б) и пленок  $\text{CaSi}_2$  в образцах D и E (в).

Эти исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ-БРФФИ № 20-52-00001\_Бел\_а.

**Список использованных источников:**

1. The phase diagram of the Ca-Si system / P. Manfrinetti [et al.] // *Intermetallics*, 2000. – V. 8. – P. 223-228.

2. *Chemical bond and electronic states in calcium silicides: Theory and comparison with synchrotron-radiation photoemission* / O. Bisi [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 1989. – V. 40. – P. 10194-1202.
3. *Calculated quasiparticle and optical properties of orthorhombic and cubic Ca<sub>2</sub>Si* / S. Lebegue [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2005. - V. 72. – P. 085103(1-9).
4. *Ca<sub>2</sub>Si(100) epitaxial films on the Si(111) substrate: template growth, structural and optical properties* / N.G. Galkin [et al.] // *Materials Science in Semiconductor Processing*, - 2020, - V. 113, - P. 105036(1-12).
5. *Conducting CaSi<sub>2</sub> transparent in infra-red* / N.G. Galkin [et al.] // *J. Alloys and Compounds*, - 2019. – V. 770. – P. 710-720.
6. P. Blaha, [et al.], *WIEN2k, An Augmented Plane Wave + Local Orbitals Program for Calculating Crystal Properties* (Karlheinz Schwarz, Tech. Universität Wien, Vienna, 2001).
7. *Investigation of structural, elastic, and lattice-dynamical properties of Ca<sub>2</sub>Si, Ca<sub>2</sub>Ge, and Ca<sub>2</sub>Sn based on first-principles density functional theory* / J.-I Tani, H. Kido // *Comput. Mat. Sci.*, - 2015, - V. 97, - P. 36-41.

УДК 539.23 + 537.31

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МАГНЕТОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОЙ ПЛЕНКИ CaSi НА Si(100)

Субботин Е.Ю.<sup>1</sup>, Шевлягин А.В.<sup>1</sup>, Балаган С.А.<sup>1</sup>, Галкин К.Н.<sup>1</sup>, Алексеев А.Ю.<sup>2</sup>

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН<sup>1</sup>*

*г. Владивосток, Российская Федерация*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>2</sup>*

*г. Минск, Республика Беларусь*

*Галкин К.Н.<sup>1</sup> – док. физ.-мат. наук, профессор*

*Мигас Д.Б.<sup>2</sup> – док. физ.-мат. наук, доцент*

**Аннотация.** В работе исследован механизм транспорта в тонкой (130 нм) поликристаллической пленке CaSi на кремниевой подложке с ориентацией Si(100) в диапазоне температур 2-300 К. Низкотемпературные холловские и магнетотранспортные измерения показали, что пленка CaSi демонстрирует транспортные свойства, характерные для плохих металлов. В ней обнаружен гигантский магнеторезистивный эффект (ГМРЭ) до 4000% при температуре около 50 К и магнитном поле 8 Тл. Продемонстрирована линейная зависимость ГМРЭ от магнитного поля и аномалия удельного сопротивления, связанная с переходом Лифшица или образованием волны зарядовой плотности, а также обнаружены осцилляции продольного магнетосопротивления при температурах 2-15 К, что указывает на нетривиальные квантовые транспортные свойства пленки.

**Ключевые слова.** Моносилицид кальция, поликристаллическая пленка, кремний, холловские и магнетотранспортные измерения, зонная структура, гигантский магнеторезистивный эффект, волна зарядовой плотности, квантовый транспорт.

Силициды кальция являются экологически чистыми материалы и занимают особое место среди силицидов щелочноземельных металлов. Это связано в первую очередь с широким набором свойств силицидов кальция от полупроводниковых [1] до полуметаллических [2,3]. Это может привести к их широкому использованию в различных областях техники и электроники. Однако транспортные свойства полуметаллических силицидов исследованы недостаточно [4,5], а магнетотранспортные свойства при низких температурах и сильных магнитных полях не исследовались.

Рост пленки моносилицида кальция (CaSi) на подложке Si(100) проводился в сверхвысоковакуумной (СВВ) камере установки OMICRON Compact с базовым вакуумом  $1 \cdot 10^{-10}$  Торр, оснащенной анализаторами ДМЭ и ЭОС/ХПЭЭ, блоком молекулярно-лучевых источников кремния (Si) и кальция (Ca) для проведения осаждения Ca и Si на кремниевую подложку. Рост пленки CaSi осуществлялся при осаждении Si и Ca при температуре 330 °С с последующим отжигом при  $T=330$  °С в течение 20 минут. Скорости осаждения Ca и Si, откалиброванные по кварцевым датчикам толщины, составляли 2,5 нм/мин и 0,8 нм/мин, соответственно. Толщина выращенной пленки составила 130 нм. Морфология образца исследовалась методом атомной силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47 сразу после выгрузки образца из СВВ-камеры. Для электрических измерений на пленку осаждались и вжигались при  $T=330$  °С алюминиевые контакты в геометрии Ван дер Пау. Методики транспортных и магнетотранспортных измерений в системе Teslatron с системой охлаждения замкнутого цикла до температуры 2 К и в магнитных полях до 8 Тл описаны в работе [5]. Расчеты электронной зонной структуры и вклада спин-орбитальной связи выполнены с помощью метода самосогласованных полнопотенциальных линейаризованных дополненных плоских волн (FLAPW) в его скалярно-релятивистской версии с использованием пакета WIEN2k [6].

По данным АСМ выращенная при 330 °С пленка имела упорядоченную структуру с шероховатостью  $\sigma_{rms}=3.12$  нм, состоящую из взаимно перпендикулярных ограниченных зерен. Рентгеноструктурный анализ показал, что фазовый состав и кристаллическая структура выращенной

пленки [7] представляют собой поликристаллическую фазу CaSi с преобладающей ориентацией (220) и некоторой долей нанокристаллических включений Ca<sub>2</sub>Si.

Транспортные измерения при нулевом магнитном поле показали сложное поведение удельного сопротивления выращенной пленки CaSi в зависимости от температуры (рисунок 1а). Обнаружены три области с различным поведением: (1) полуметаллический характер зависимости в диапазоне температур 50 - 300 К с пиковой аномалией удельного сопротивления около 150 К; (2) полупроводниковый тип зависимости при T= 25 - 50 К с соответствующим раскрытием запрещенной зоны около 36 мэВ (рисунок 1б); (3) металлический характер проводимости от 25 К до 2 К с плато удельного сопротивления. Приложение перпендикулярного магнитного поля приводит к дальнейшему расширению запрещенной зоны на втором участке, которая достигает 47 мэВ при 8 Тл (рисунок 1б). Оно также сопровождается появлением осцилляций магнитосопротивления (МС) в диапазоне (2 - 15) К (плато) (рисунок 1а). Анализ зависимости относительного магнитосопротивления (рисунок 1в) показал его умеренный рост от единиц до пяти сотен процентов в магнитных полях 1 – 8 Тл в диапазоне температур 180-70 К, соответствующем широкому максимуму продольного сопротивления (рисунок 1а). При температурах 33 – 60 К наблюдался резкий рост относительного магнитосопротивления от 1000% до 4000% в магнитном поле 8 Тл, что соответствует гигантскому магнитосопротивлению в пленке CaSi состоящей из немагнитных материалов.

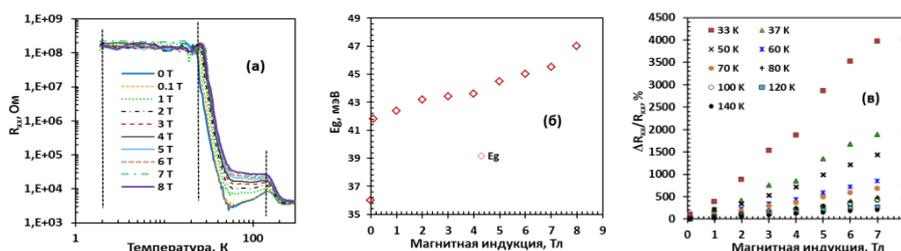


Рисунок 1 – (а) Температурные зависимости продольного сопротивления  $R_{xx}$  в геометрии Ван дер Пау при различных магнитных полях от 0 Тл до 8 Тл; (б) Зависимость ширины запрещенной зоны в диапазоне температур 25-50 К от магнитной индукции; (в) зависимость относительного магнитосопротивления от магнитной индукции при температурах от 33 К до 140 К

Холловские измерения в диапазоне температур 2-300 К при магнитном поле 0.5 Тл позволили в рамках стандартной модели рассчитать эффективные концентрацию (рисунок 2а) и подвижность (рисунок 2б) носителей. Однако из-за того, что в пленке наблюдался гигантский магнеторезистивный эффект, измерения на структуре Ван дер Пау не могли компенсировать различные градиентные явления. Ситуация также осложняется тем, что CaSi является по данным наших теоретических расчетов полуметаллом с вкладом от двух типов носителей в карманах около уровня Ферми. А учет

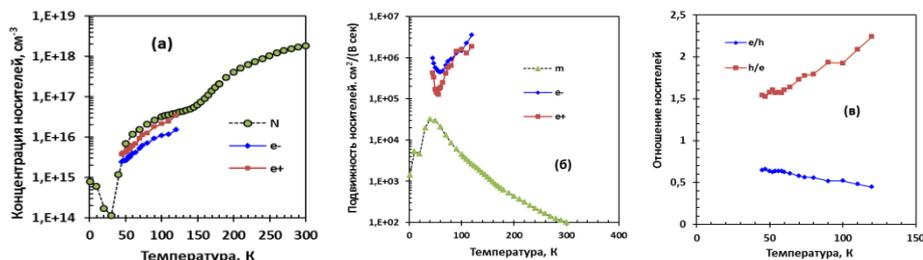


Рисунок 2 – Температурные зависимости (а) эффективной концентрации носителей и (б) эффективной подвижности носителей, рассчитанные из данных холловских измерений при магнитной индукции 0.5 Тл. На рисунках 1(а,б,в) представлены данные для концентраций электронов и дырок, их подвижностей и отношения концентрации дырок к электронам и электронов к дыркам при различных температурах, рассчитанные в рамках двухзонной модели из данных магнитосопротивления от магнитного поля и температуры

спин-орбитального взаимодействия показал наличие тривиальной топологии псевдометалла или металла с зазором и довольно низкой плотностью состояний на уровне Ферми. Поэтому из данных по магнитосопротивлению в рамках двухзонной модели были разделены вклады дырок и электронов в диапазоне 45-120 К, оценены их концентрации (рисунок 2а), подвижности (рисунок 2б) и отношения их концентраций (рисунок 2 в). Установлено, что во всем оцененном диапазоне температур дырки имеют большую концентрацию и меньшую подвижность, чем электроны в пленке CaSi. При этом оба типа носителей имеют высокую подвижность (до  $3 \times 10^6$  см<sup>2</sup>/(В·сек)). Сопоставление с холловскими данными (рисунок 2а) показывает хорошее совпадение в выделенном диапазоне температур.

Таким образом, пленка CaSi демонстрирует свойства транспорта плохих металлов. Однако гигантский MR до 4000% при 50 К и 8Т, его линейная зависимость от поля, аномалия удельного сопротивления, связанная с переходом Лифшица или образованием волн зарядовой плотности, а

также плато удельного сопротивления указывают на нетривиальные квантовые транспортные свойства, которые не наблюдаются для объемного монокристалла CaSi.

Эти исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-02-00123\_а и гранта РФФИ-БРФФИ № 20-52-00001\_Бел\_а.

**Список использованных источников:**

1. *Calculated quasiparticle and optical properties of orthorhombic and cubic Ca<sub>2</sub>Si / S. Lebegue // Phys. Rev. B, – 2005. - V. 72. – P. 085103(1-9).*
2. *Chemical bond and electronic states in calcium silicides: Theory and comparison with synchrotron-radiation photoemission / O. Bisi [et al.] // Phys. Rev. B, – 1989. – V. 40. – P. 10194-1202.*
3. *Electronic and structural properties of CaSi<sub>2</sub> / S. Fahy [et al.] // Phys. Rev. B, – 1990. – V. 41. – P. 7587-7593.*
4. *Low temperature properties of calcium mono- and disilicides / M. Affronte [et al.] // J. Alloys and Compounds, – 1998. – V. 274. – P. 68-75.*
5. *Conducting CaSi<sub>2</sub> transparent in infra-red / N.G. Galkin [et al.] // J. Alloys and Compounds, - 2019. – V. 770. – P. 710-720.*
6. *P. Blaha, [et al.], WIEN2k, An Augmented Plane Wave + Local Orbitals Program for Calculating Crystal Properties (Karlheinz Schwarz, Tech. Universität Wien, Vienna, 2001).*
7. *A low temperature growth of Ca silicides on Si(100) and Si(111) substrates: formation, structure, optical properties and energy band structure parameters / N.G. Galkin [et al.] // J. Alloys and Compounds, - 2020, - V. 813, - P. 152101(1-12).*

УДК 538.911 + 538.975 + 536.21

## **Низкотемпературный термоэлектрический материал на основе кремния со встроенными нанокристаллами антимонида галлия**

*Субботин Е.Ю.<sup>1</sup>, Чусовитин Е.А.<sup>1</sup>, Чусовитина С.В.<sup>1</sup>, Ховайло В.В.<sup>2</sup>,  
Гутаковский А.К.<sup>3</sup>, Накамура Й.<sup>4</sup>*

*Институт Автоматики и Процессов Управления ДВО РАН<sup>1</sup>  
г. Владивосток, Российская Федерация*

*Национальный исследовательский университет «Московский институт стали и сплавов»<sup>2</sup>  
г. Москва, Российская Федерация*

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова<sup>3</sup> СО ДВО РАН  
г. Новосибирск, Российская Федерация*

*Высшая школа инженерных наук<sup>4</sup>  
г. Осака, Япония*

*Горошко Д.Л.<sup>1</sup> - док. физ.-мат. наук*

**Аннотация.** В работе изучены термоэлектрические свойства кремниевых гетероструктур со встроенными нанокристаллами антимонида галлия. Методом твердофазной эпитаксии удалось сформировать массив нанокристаллов антимонида галлия с высокой концентрацией ( $2.2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ) из тонкой стехиометрической плёнки на Si(111). Образцы сохраняют высокую электропроводность сильнолегированного кремния. В n-плече удалось расширить диапазон максимально значения коэффициента Зеебека и сдвинуть его в область меньших температур. Коэффициент поперечной решёточной теплопроводности при комнатной температуре был существенно снижен: со 150 Вт/(м·К) до 7.8 Вт/(м·К).

**Ключевые слова.** Кремний, антимонид галлия, гетероструктура, твердофазная эпитаксия, молекулярно-лучевая эпитаксия, термо-ЭДС, теплопроводность, низкотемпературные микро-ТЭГ.

В последнее время большие усилия со стороны исследовательских и технических групп были направлены на разработку и внедрение микро-термоэлектрических преобразователей, которые находят применение в качестве источников питания портативных устройств, медицинских стимуляторов [1], микро-ТЭГ, интегрированных с процессором [2]. Материалы, подходящие для таких преобразователей, имеют высокую эффективность, но они токсичны, дороги и несовместимы с кремниевой технологией. Объёмный монокристаллический кремний имеет  $ZT \sim 0.01$  в силу высокой теплопроводности  $\sim 150 \text{ Вт/(м·К)}$  [3]. Существенного снижения теплопроводности при сохранении фактора мощности возможно достичь увеличением фононного рассеяния за счёт структурирования кремния. [4,5]

Гетероструктура Si/ нанокристаллы (НК) GaSb/Si была сформирована на монокристаллической подложке Si(111) в сверхвысоковакуумной камере с базовым вакуумом  $2 \cdot 10^{-11}$  Торр. Формирование массива НК GaSb происходило методом ТФЭ. При комнатной температуре осадил смесь Ga-Sb в соотношении 1:1 со скоростями осаждения  $V_{\text{Sb}} = 3.08 \text{ \AA/мин}$  и  $V_{\text{Ga}} = 2 \text{ \AA/мин}$  толщиной 5Å. Полученную тонкую плёнку подвергли отжигу при

температурах 200 °C/2 мин и 380 °C/2 мин. Полученный массив НК имеет концентрацию  $2.2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , средний латеральный размер 15 нм и высоту 1.7 нм (Рис. 1а).

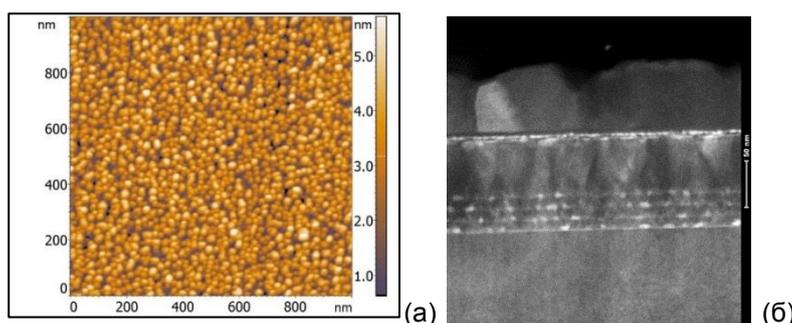


Рис.1. (а) АСМ изображение массива нанокристаллов GaSb на Si(111). Концентрация НК  $2.2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , средний латеральный размер 15 нм, высота 1.7 нм. (б) Снимок ПЭМ гетероструктуры Si/НК GaSb/Si.

Встраивание массива НК в матрицу кремния осуществляли методом МЛЭ при температурах 450 С (до полного закрытия НК) и 610 С (после полного закрытия НК). Последовательным повторением ТФЭ и МЛЭ стадий были сформированы многослойные гетероструктуры (Рис. 1б). Встроенные НК имеют бимодальное распределение по размерам:  $2.2 \times 3.6 \text{ нм}$  и  $6.2 \times 10.4 \text{ нм}$ . Поверхность многослойной гетероструктуры поликристаллическая с размером зёрен 25 – 45 нм, среднеквадратичная шероховатость 1.1 – 1.7 нм.

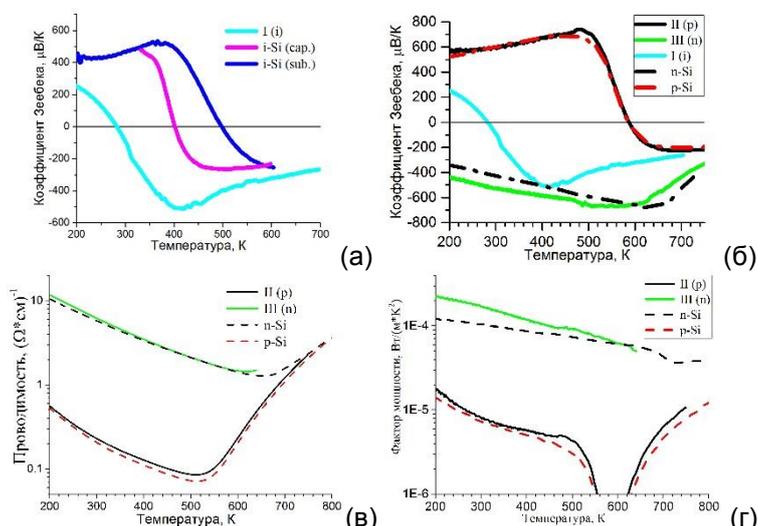


Рис. 2. Температурные зависимости термоэлектрических свойств кремниевых гетероструктур в сравнении с объёмным монокристаллическим кремнием различной проводимости: (а) и (б) коэффициент Зеебека, (в) проводимость, (г) фактор мощности. Кривые I, II и III – гетероструктуры на основе собственного (i) и легированного кремния (n, p), i, n, p-Si – монокристаллический кремний, (cap./sub.) – нелегированный кремний, используемый в качестве покрывающих слоёв/подложки образца I(i).

Для оценки влияния структурирования на термоэлектрические свойства кремния НК GaSb были встроены в матрицу нелегированного кремния (Рис. 2а). Гетероструктура имеет меньшую температуру инверсии носителей при температуре ~280К, что обусловлено инжекцией носителей из объёма НК в матрицу кремния. Для создания p- и n-плеч ТЭГ (Рис. 2б) НК были встроены в матрицу сильнолегированного кремния. В образце n-типа удалось увеличить область максимального значения термо-ЭДС и сместить её в область меньших температур, для p-образца существенных изменений не наблюдается. Встраивание НК не привело к заметному ухудшению электропроводности (Рис. 2в). Гетероструктуры имеют несколько большее значение фактора мощности относительно объёмного кремния в области низких температур (Рис. 2г), что актуально для современных микро-ТЭГ. Методом  $2\omega$  была определена поперечная теплопроводность при комнатной температуре. Для оценки влияния НК на теплоперенос был сформирован образец с имитацией роста НК, представляющий из себя последовательно нанесённые слои кремния, но без формирования НК; сами образцы были отмасштабированы с 4х до 8ми слоёв. Теплопроводность объёмного кремния при комнатной температуре  $150 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , послойно нанесённого кремния  $37 \pm 5.2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , гетероструктуры  $7.8 \pm 1.3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Комбинацией методов ТФЭ и МЛЭ удалось сформировать гетероструктуру на основе кремния со встроенными НК GaSb. Вышеописанное структурирование удовлетворяет двум основным целям, преследуемым при разработке новых термоэлектрических материалов на основе кремния: были сохранены кремниевые электрические параметры и существенно снижена решётчатая теплопроводность. Таким образом, полученные структуры имеют перспективы при разработке микро-ТЭГ, совместимых с кремниевой технологией.

**Список использованных источников:**

1. Nozariasbmarz A. et al. Review of wearable thermoelectric energy harvesting: From body temperature to electronic systems // *Applied Energy*. – 2020. – Т. 258. – С. 114069.
2. Chowdhury I. et al. On-chip cooling by superlattice-based thin-film thermoelectrics // *Nature nanotechnology*. – 2009. – Т. 4. – №. 4. – С. 235-238.
3. Stranz A. et al. Thermoelectric properties of high-doped silicon from room temperature to 900 K // *Journal of electronic materials*. – 2013. – Т. 42. – №. 7. – С. 2381-2387.
4. Nakamura Y. Nanostructure design for drastic reduction of thermal conductivity while preserving high electrical conductivity // *Science and Technology of advanced materials*. – 2018. – Т. 19. – №. 1. – С. 31-43.
5. Elyamny S. et al. High power thermoelectric generator based on vertical silicon nanowires // *Nano Letters*. – 2020. – Т. 20. – №. 7. – С. 4748-4753.

## СТАБИЛЬНОСТЬ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК $Mg_2Si$

Алексеев А. Ю.<sup>1</sup>, Кропачев О.В.<sup>2</sup>, Чернев И.М.<sup>2</sup>, Галкин К.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН  
г. Владивосток, Российская Федерация

Мигас Д.Б. – д.ф.-м.н., профессор

В результате моделирования из первых принципов были предсказаны наиболее стабильные структуры тонких пленок силицида магния, состоящего из одного, двух и трёх 2D  $Mg_2Si$ -слоёв. Двумерная структура из одного 2D  $Mg_2Si$ -слоя стабильна в Td фазе и является прямозонным полупроводником с шириной запрещённой зоны 0,45 эВ. Обнаружено, что построение тонких пленок из большего количества 2D слоёв в Td фазе воспроизводит орторомбическую фазу, типичную для  $Ca_2Si$ . Установлено, что многослойные тонкие пленки в Td фазе оказались менее стабильными, чем структуры в фазе T, которые воспроизводят объёмную кубическую фазу  $Mg_2Si$ , и имеют ширину запрещённой зоны 0,74 и 0,56 эВ для двух и трёх 2D  $Mg_2Si$ -слоёв, соответственно.

Исследование наноструктур различных силицидов, которые не токсичны и их формирование совместимо с хорошо развитой кремниевой технологией, представляет интерес для создания приборов микро- и наноэлектроники [1]. Среди них выделяются силициды металлов второй группы [2], включающие Mg, Ca и Ba. Силицид магния ( $Mg_2Si$ ) имеет кубическую гранецентрированную структуру с пространственной группой  $Fm\bar{3}m$  (№ 225, структуру типа анти- $CaF_2$ ) [2]. Ранее методами моделирования из первых принципов была предсказана динамическая стабильность Td фазы двумерного (2D)  $Mg_2Si$ , известной по дихалькогенидам тугоплавких металлов (пространственная группа  $P2_1/m$ , № 11), которая является искажением гексагональной T фазы [3,4]. В данной работе расширенно исследование структуры и электронных свойств тонких пленок  $Mg_2Si$ , когда их толщина составляет два и три 2D  $Mg_2Si$ -слоя.

Полная оптимизация исследуемых структур с последующим расчётом их фононного спектра и электронных зонных структур были выполнены методами из первых принципов в рамках теории функционала плотности. Для обменно-корреляционного функционала применялось приближение обобщённых градиентов Пердю-Бурке-Эрнцерахофа. Использовался метод сверхячейки с толщиной вакуума 12 Å.

2D  $Mg_2Si$  в T фазе с гексагональной структурой представляет собой «строительный блок», воспроизводящий тонкие пленки кубического  $Mg_2Si$  с ориентацией (111). Как было предсказано ранее [3,4], структура из одного 2D  $Mg_2Si$ -слоя в T фазе не стабильна и трансформируется в Td фазу (T distorted) в результате колебаний решётки. Хотя эти две фазы имеют близкие структуры, оказывается, что полная энергия 2D  $Mg_2Si$  в Td фазе меньше на 23 мэВ (здесь и далее, под полной энергией структур подразумевается их полная энергия в расчете на одну формульную единицу). В связи с этим была исследована возможность увеличения количества 2D  $Mg_2Si$ -слоёв в Td фазе (или толщины) в тонких пленках  $Mg_2Si$ . Это можно осуществить несколькими способами в результате различных смещений и/или отражений последующего 2D  $Mg_2Si$ -слоя относительно первого. В результате

оптимизации установлено, что наиболее стабильной по полной энергии является структура на основе Т фазы. За ней следует структура, которая может быть получена, если второй  $Mg_2Si$ -слоем был отражён в плоскости (110) и смещён на половину оси [010] по отношению к первому слою. Продолжая таким образом строить структуру из большего количества 2D  $Mg_2Si$ -слоёв, можно получить орторомбическую фазу  $Ca_2Si$  (пространственная группа  $Pnma$ , № 62, структура типа анти- $PbCl_2$ ), которая не характерна для  $Mg_2Si$ . Расчет показал, что такая структура из двух 2D  $Mg_2Si$ -слоёв в Тd фазе оказалась на 163 мэВ менее энергетически стабильнее структуры из двух 2D  $Mg_2Si$ -слоёв в Т фазе, тогда как гипотетический объёмный орторомбический  $Mg_2Si$  на 171 мэВ выше по полной энергии, чем объёмный кубический  $Mg_2Si$ . Таким образом, все 2D структуры и тонкие плёнки  $Mg_2Si$  с более чем одним 2D  $Mg_2Si$ -слоем имеют Т фазу в качестве стабильной структуры.

Кроме того, был посчитан фононный спектр структуры из двух 2D  $Mg_2Si$ -слоёв в Т фазе для выявления его динамической стабильности, который представлен на рисунке 1. Отсутствие в фононном спектре мод с мнимыми частотами свидетельствует о динамической стабильности такой структуры при абсолютном нуле температур в отличие от структуры из одного 2D  $Mg_2Si$ -слоя в Т фазе.

На рисунке 2 представлены электронные зонные структуры тонких пленок, состоящих из одного, двух и трёх 2D  $Mg_2Si$ -слоёв в случае наиболее стабильных структур. Тонкие пленки из двух и трех 2D  $Mg_2Si$ -слоев являются непрямозонными полупроводниками с переходом из центра зоны Бриллюэна (точка  $\Gamma$ ) на её край в точку высокой симметрии М. Их ширины запрещённой зоны равны 0,74 эВ и 0,56 эВ, соответственно, причём возможная причина изменения энергетического зазора при изменении толщины пленки может быть связана как с эффектом квантового ограничения (изменение толщины потенциального колодца для электронного газа внутри 2D структуры), так и с изменением расстояний между атомами и появлением атомов Mg с другим координационным числом (атомы  $Mg_2Si$  в промежуточном  $Mg_2Si$ -слое в структуре из трёх 2D  $Mg_2Si$ -слоёв отличаются от атомов Mg в структуре из двух 2D  $Mg_2Si$ -слоёв). Для структуры из одного 2D  $Mg_2Si$ -слоя происходит фазовый переход, в результате которого материал оказывается прямозонным полупроводником с шириной запрещённой зоны 0,45 эВ. Наличие прямого перехода может быть использовано в оптоэлектронике и подлежит дальнейшему изучению.

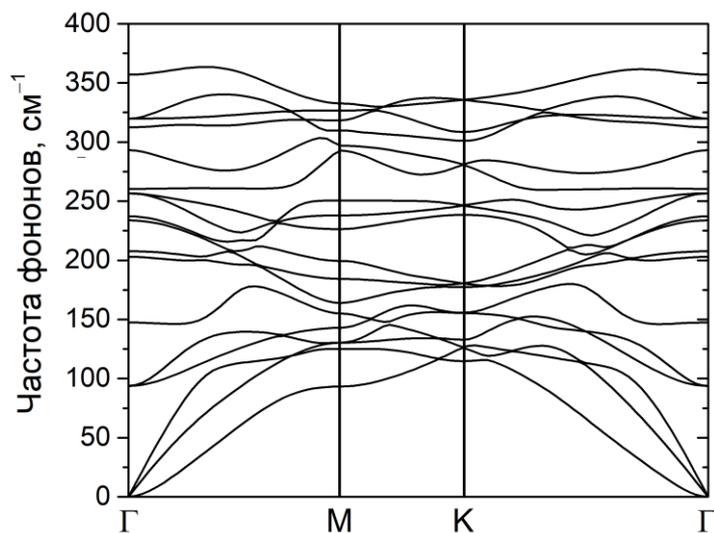


Рисунок 1 – Фононный спектр структуры из двух 2D  $Mg_2Si$ -слоёв в Т фазе

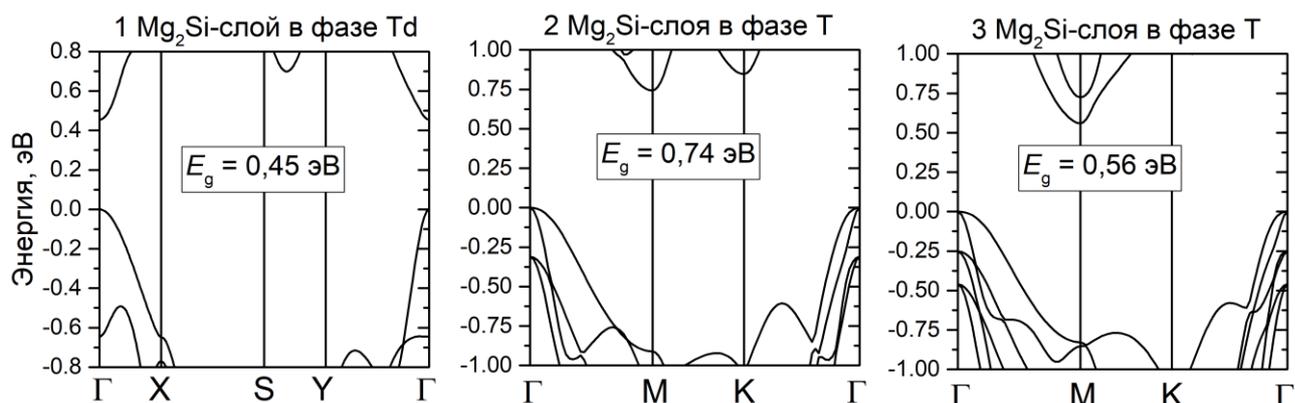


Рисунок 2 – Зонные структуры стабильных тонких пленок  $Mg_2Si$  из одного, двух и трёх 2D  $Mg_2Si$ -слоёв. За нуль энергии приняты максимумы валентных зон. Ширины запрещённых зон ( $E_g$ ) так же приведены

Таким образом, были проанализированы и смоделированы потенциальные структуры тонких пленок  $Mg_2Si$ , состоящих из нескольких 2D  $Mg_2Si$ -слоёв. Установлено, что тонкие пленки  $Mg_2Si$ , имеющие более одного 2D  $Mg_2Si$ -слоя, стабилизируются в структуру, воспроизводящую объёмную кубическую фазу  $Mg_2Si$  (т.е. Т фазу). Получены зонные структуры тонких пленок  $Mg_2Si$  из одного, двух и трёх 2D  $Mg_2Si$ -слоёв и оценена ширина их запрещенной зоны. Для оценки перспектив исследуемых материалов необходимы их дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования, в том числе, исследование путей их модификации (влияние внешних условий, подложек, адатомов, варьирование стехиометрии и пр.).

**Список использованных источников:**

1. *Properties of Metal Silicides* / ed.: K. Maex, M. van Rossum. – London : Inspec, 1995.
2. *Semiconducting Silicides* / ed.: V. E. Borisenko. – Berlin : Springer, 2000.
3. *Stability of 2D Alkaline-Earth Metal Silicides, Germanides and Stannides* / A. Yu. Alekseev [et al.] // *International Journal of Nanoscience*. 2019. – Vol. 18, № 03n04. – P. 1940013.
4. *Structural stability and electronic properties of 2D alkaline-earth metal silicides, germanides, and stannides* / A. Y. Alekseev [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2020. – Vol. 59. – P. SF0801.

## СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МУЛЬТИДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

А.В. Кунц<sup>1</sup>, В.А. Чеховский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>“Институт ядерных проблем” Белорусского государственного университета

О.В. Дворников – д.т.н., доцент

**Аннотация** – Рассмотрен мультидифференциальный операционный усилитель (МОУ), предназначенный для работы при температуре до минус 197 °С и разработанный на биполярных (bipolar transistors, BiT) и полевых транзисторах, управляемых р-п-переходом (junction field-effect transistors, JFET) базового матричного кристалла (БМК) МН2ХА030.

При разработке электрической схемы МОУ решались две проблемы: учет изменения статических параметров BiT и JFET при низкой температуре и необходимость одновременного обеспечения работоспособности МОУ в нормальных условиях (25 °С) для отбраковки микросхем и при рабочих температурах (ориентировочно, менее минус 100 °С).

Так, при схемотехническом синтезе на транзисторах БМК МН2ХА030 учитывались следующие факторы:

- напряжение отсечки ( $V_{TH}$ ) р-JFET значительно уменьшается при температуре (Т) около минус 197 °С. Если в нормальных условиях минимально допустимое напряжение отсечки соответствует значению  $V_{TH}=1,35$  В, то при  $T= -197$  °С оно уменьшается до  $V_{TH}=0,9$  В;

- абсолютное значение напряжения на прямосмещенном эмиттерном переходе ( $|V_{BE}|$ ) при

$T = -197\text{ }^{\circ}\text{C}$  возрастает и может превысить величину  $V_{TH}$ , а коэффициент усиления базового тока  $\beta$  существенно падает. Например, при эмиттерном токе ( $I_E$ ), равном 50 мкА, для n-p-n-транзистора  $|V_{BE}|$  возрастает от 0,688 В в нормальных условиях до 1,057 В при  $T = -197\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а  $\beta$  падает от 110 до 2,39. Для p-n-p-транзистора  $|V_{BE}|$  возрастает от 0,704 В в нормальных условиях до 1,066 В при  $T = -197\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а  $\beta$  падает от 54 до 2,83.

Следовательно для обеспечения работоспособности МОУ не следует применять включение эмиттерных переходов между истоком и затвором p-JFET, а частично компенсировать резкое падение  $\beta$  возможно за счет применения схем составных транзисторов.

Схемотехнический синтез и моделирование выполнялись в САПР LTSpice с применением моделей, настроенных по результатам криогенных измерений транзисторов БМК МН2ХА030 [1].

Электрическая схема разработанного МОУ, названного OАmp3, показана на рисунке 1. OАmp3 представляет собой модернизацию низкотемпературного ОУ [2] и включает три усилительных каскада. Два классических входных дифференциальных каскада (ДК) на полевых транзисторах J8, J9 и J12, J13 включены параллельно, их выходные токи (токи стока J8, J9 и J12, J13) суммируются на эмиттерных резисторах R14, R15 транзисторов с общей базой Q1, Q2. Таким образом, входной ДК и транзисторы Q1, Q2 с активной нагрузкой на p-JFET J3, J5 образуют первый усилительный каскад, выполненный по схеме «перегнутого» каскада.

Вторым усилительным каскадом является ДК на p-JFET J10, J11 с нагрузкой в виде «токового зеркала» Q3, Q4, а третий усилительный каскад включает транзистор Q5 с общим эмиттером и активной нагрузкой на p-JFET J6. Истоковый повторитель J14, прямосмещенные диоды Q6, Q7, источник тока J7, эмиттерные повторители на составных транзисторах Q8, Q9, Q11 и Q10, Q12, Q13 образуют двухтактный выходной каскад.

Рабочие режимы транзисторов в нормальных условиях выбраны из условия минимизации тока потребления ( $I_{R3}=I_{R5}=I_{R6}=13,6\text{ мкА}$ ,  $I_{R4}=27,4\text{ мкА}$ ,  $I_{R7}=152\text{ мкА}$ ), а источники тока J1, R1 и J2, R2 ( $I_{R1}=I_{R2}=137\text{ мкА}$ ) - для максимального увеличения диапазона линейной работы входных ДК.

Наибольшие проблемы при создании низкотемпературного МОУ вызвала разработка выходного каскада, который должен иметь минимальный ток потребления и обеспечивать требуемое усиление МОУ при работе на внешнюю нагрузку, равную 2 кОм.

Уменьшить ток потребления выходного каскада возможно за счет работы составных транзисторов в режиме В. Однако при этом коллекторный ток составных транзисторов и их основные параметры зависят от сопротивления внешней нагрузки. Кроме того, появляются искажения выходного сигнала при напряжении близком к нулевому уровню. Решение указанной проблемы осуществляется за счет введения дополнительных выводов SW1, SW2 и работы транзисторов Q9, Q10 в режиме АВ.

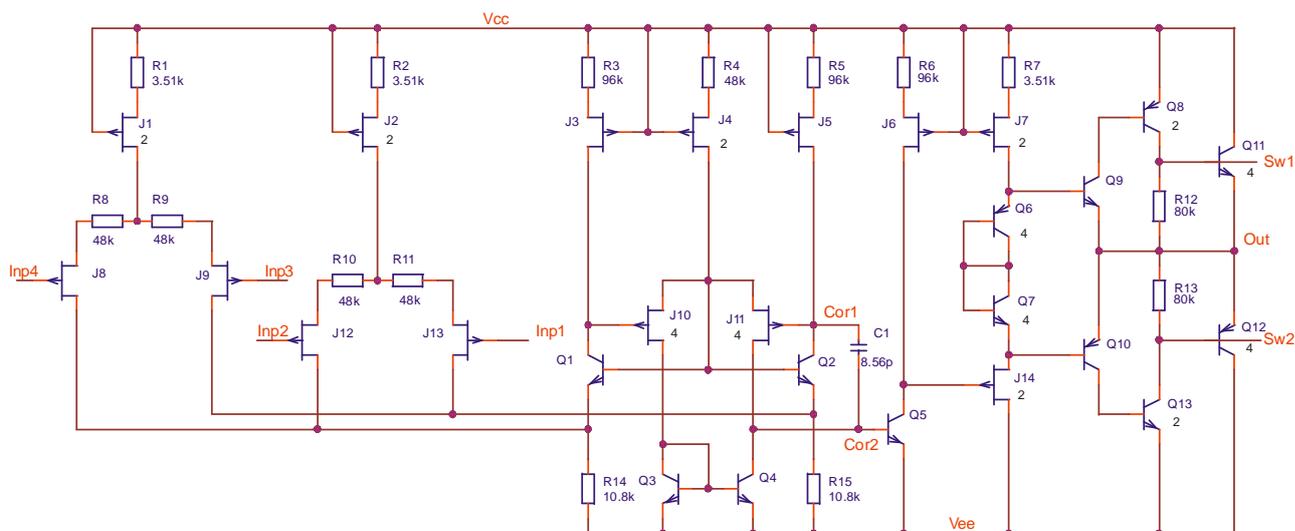


Рисунок 1 –Электрическая схема низкотемпературного МОУ OАmp3

В нормальных условиях выводы SW1, SW2 и Out соединяются. При этом выходной каскад представляет собой двухтактный эмиттерный повторитель на транзисторах Q9, Q10 и обеспечивает работу на внешнюю нагрузку с сопротивлением более 500 Ом. Мощные транзисторы Q11, Q12 отключены и не увеличивают ток потребления.

При низких температурах выводы SW1, SW2 не соединяются с Out. В этом случае даже при малой величине  $\beta$  суммарное усиление тока составным транзистором ( $\approx \beta_9 \beta_8 \beta_{11}$ ) должно быть достаточным для работы на внешнюю 2 кОм нагрузку.

На рисунке 2 показаны результаты моделирования МОУ, включенного в виде инструментального усилителя (ИУ). При  $R1=1$  кОм,  $R2=4$  кОм усиление ИУ, выполненного на МОУ, составляет 5, а подача  $V_{REF}=100$  мВ вызывает смещение выходного сигнала на 500 мВ.

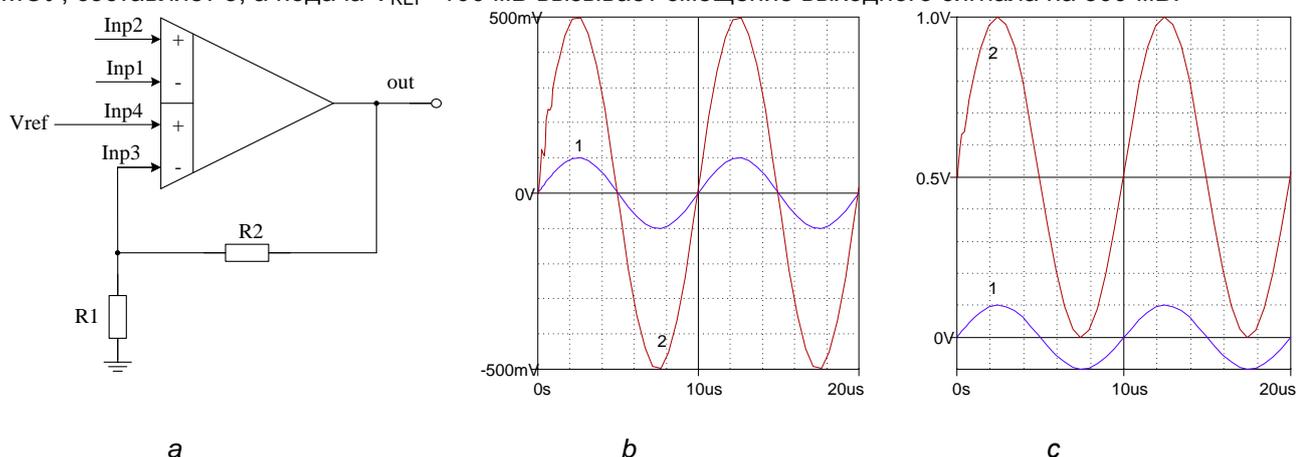


Рисунок 2 – Схема включения и результаты моделирования МОУ в виде ИУ при  $R1=1$  кОм,  $R2=4$  кОм: а – Схема включения; б – Входное (1) и выходное (2) напряжение при  $V_{REF}=0$ ; с – Входное (1) и выходное (2) напряжение при  $V_{REF}=100$  мВ

**Список использованных источников:**

- Дворников О.В., Чеховский В.А., Прокопенко Н.Н., Галкин Я.Д., Кунц А.В. Учет одновременного воздействия низких температур и проникающей радиации на характеристики биполярных и JFET транзисторов при схемотехническом моделировании. Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2020. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2020. С. 46-55. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-1-46-55.
- Гулин А.И., Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Бугакова А.В. Проектирование радиационно-стойких BiJFET операционных усилителей для работы в аналоговых интерфейсах датчиков при низких температурах. Датчики и Системы.-2017.–N12.–С.3-10.

УДК 621.89: 621.793

## ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

Леонович Н.В., аспирант, Занько А.И., аспирант, Логунов К.Т., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Котов Д.А. – канд. техн. наук

**Аннотация.** Разработана технология химического осаждения алмазоподобного углеродного покрытия в плазме высокой плотности. Описан реактор для плазмохимического осаждения. Получены покрытия алмазоподобного углерода. Представлены результаты исследования технологического процесса осаждения алмазоподобных углеродных покрытий.

**Ключевые слова.** Алмазоподобное углеродное покрытие, плазма высокой плотности, индукционный разряд, индуктивно-связанная плазма.

Алмазоподобное углеродное (АПУ) покрытие является одним из востребованных оптических покрытий, благодаря его уникальным свойствам, таким как высокое пропускание в ИК спектре и рассеивание ИК-излучения, высокая теплопроводность и электрическое сопротивление, сопротивление к стиранию и высокая стойкость к кислотам, щелочам, солям,

что важно для приборов ночного видения, мобильных транспортных средств передвижения. Применение алмазоподобных углеродных покрытий в оптике обусловлено наличием в покрытии  $sp^3$ - и  $sp^2$ -гибридизированных связей. У покрытий с высоким содержанием  $sp^3$  (алмазных) связей усиливается процент пропускания света, а в случае высокого содержания  $sp^2$  (графитовых) связей усиливается процент поглощения [1], [2].

Основные преимущества HDPCVD (high-density plasma chemical vacuum deposition – химическое осаждение и парогазовой фазы) с применением индуктивно связанной плазмы, по сравнению с физическо-химическими методами осаждения: хорошая адгезия пленок к нижележащим слоям; широкий спектр химических реакций и источников для реакций с благоприятными термодинамикой и кинетикой. Индуктивно связанная плазма высокой плотности обеспечивает создание неравновесных условий, что обеспечивает получение различных метастабильных состояний вещества с уникальными механическими и физическими свойствами, а именно управление формированием соотношения  $sp^3 / sp^2$  фазы углерода и достижением содержания  $sp^3$  фазы более 60%.

Для создания нужных условий формирования высокоплотной плазмы и равномерного осаждения пленок, необходимо обеспечить правильное газораспределение. Поэтому нами был разработан цилиндрический реактор плазмохимического осаждения алмазоподобных углеродных покрытий с внутренним диаметром 280 мм, габаритные размеры реактора выбирались таким образом, чтобы проводить осаждение покрытий на подложках диаметром до 200 мм. Реактор оснащен соосно расположенным плоским генератором плазмы высокой плотности индукционного типа, работающего на частоте 13,56 МГц, блоком питания, блоком согласования, кольцевым газораспределителем лабиринтного типа, охлаждаемым подложкодержателем с возможностью смещения потенциала плазмы и двумя соленоидами. Схема реактора представлена на рисунке 1.

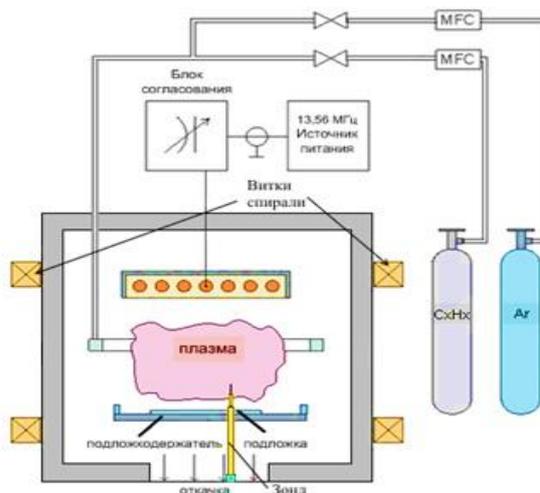
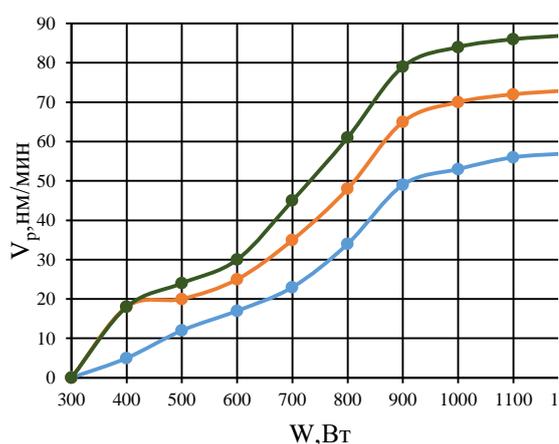


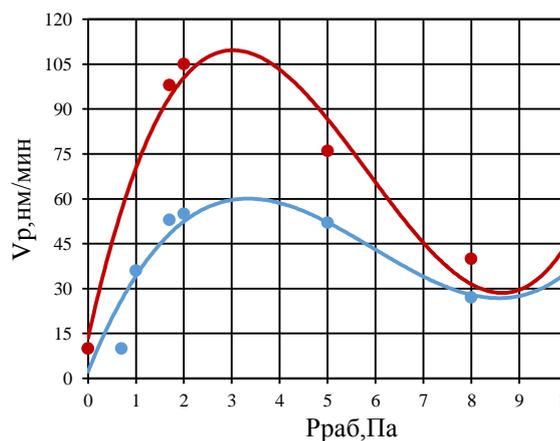
Рисунок 1 – Схема установки осаждения алмазоподобного углеродного покрытия в плазме высокой плотности

На корпус реактора установлено два соленоида, которые обеспечивают генерацию магнитного поля в камере в диапазоне от 0,3 до 10 мТл. Газораспределитель разработан с возможностью перемещения от источника плазмы на расстоянии до 150 мм, для отработки различных технологических процессов. Поток смеси рабочего газа, аргона и ацетилена, задается через регуляторы расхода газа – РРГ-12.

Мощность плазменного разряда определяет эффективность генерации активных частиц, а это в свою очередь способствует увеличению скорости плазмохимических процессов. Установлено, что при увеличении ВЧ-мощности индукционного разряда от 300 до 900 Вт скорость осаждения АПУ покрытий увеличивается, при различном рабочем расходе ацетилена, показано на рисунке 2 (а). Это свидетельствует об повышении интенсивности ионизации плазмообразующих газов и эффективности распада ацетилена. С увеличением мощности разряда свыше 900 Вт достигается режим насыщения, это показывает что практически весь поступающий газ прекурсор распадается на активные химические радикалы и, в связи с этим, скорость осаждения с увеличением ВЧ-мощности индукционного разряда практически не увеличивается.



(а)



(б)

Рисунок 2 – Зависимость скорости роста алмазоподобных углеродных покрытий на кремниевой подложке в высокоплотной плазме индукционного разряда от величины подводимой ВЧ-мощности при остаточном давлении в реакторе 2.5 Па и при различном расходе ацетилена 1 – 50 см<sup>3</sup>/мин, 2 - 80 см<sup>3</sup>/мин, 3 - 120 см<sup>3</sup>/мин (а), и от рабочего давления газовой смеси при разном соотношении объемов ацетилена к аргону 1 – 6/1, 2 – 3/1 (б)

При формировании алмазоподобных углеродных покрытий варьирование рабочего давления газовой смеси в реакционной камере проводилось от 0,08 до 10 Па. При этом соотношение объемов аргона к объему ацетилена составляло 6 и 3, при мощности ВЧ-разряда 900 Вт и температуре подложкодержателя 373 К. При увеличении рабочего давления смеси C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> + Ar в условиях постоянного соотношения объема аргона к объему ацетилена как 6/1, так 3/1 наблюдается сначала увеличение скорости осаждения АПУ покрытий, а затем уменьшение. Первоначальное повышение скорости роста связано с увеличением плотности активных радикалов у поверхности подложки и, как следствие, с увеличением скорости поставки их к ее поверхности. Высокая скорость роста при рабочем давлении 1,5-6,0 Па в реакционной камере свидетельствует в пользу того, что происходит стабильная поставка химически активных радикалов на поверхность кремниевой подложки. Так же вероятность трансформации химически активных ионизированных радикалов ацетилена до углерода на поверхности подложки в этом случае увеличивается. Повышение же общего давления газовой смеси в реакционной камере выше 6,0 Па в результате увеличения скорости потока химически активных частиц к поверхности подложки увеличивает вероятность их отражения от нее. Это усиливает их рассеяние и, в результате, приводит к снижению скорости роста алмазоподобных углеродных покрытий.

С увеличением скорости роста алмазоподобных углеродных покрытий процент содержания sp<sup>3</sup> (алмазной) связей падает и растет процент содержания графит подобной фазы, что приводит к низкой твердости и легкому истиранию покрытий. В результате выполнения экспериментального осаждения алмазоподобные углеродные покрытия были получены с наилучшими оптическими и физическими характеристиками при низком расходе ацетилена и не высокой мощности, а именно при следующих технологических параметрах процесса: ВЧ-мощность 600 Вт, расход газа прекурсора 20 см<sup>3</sup>/мин при остаточном давлении в рабочей камере 2.5 Па

#### Список использованных источников:

1 *Diamon-like carbon coating made by RF plasma enhanced chemical vapour deposition for protective antireflective coatings on germanium / Ashish Varade, Ankit Krishna, K. Niranjana Reddy, M. Chellamalai, P.V. Shashikumar // Procedia Materials Science 5 (2014) 1015– 1019.*

2. *Mironov Y., Stepanov R., Osipkov A., Belyaeva A., Makeev M.. Strengthening diamond like carbon coatings for optic materials // Russian – Israeli Bi-National Workshop – 2014. – Vol. 2. – P. 52 – 59.*

## ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ И МОРФОЛОГИИ НА РЕШЕТОЧНУЮ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ Si/Ge НАНОШНУРОВ СЕГМЕНТНОГО ТИПА

Холяво И.И.<sup>1</sup>, Хомец А.Л.<sup>1</sup>, Сафронов И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет  
г. Минск, Республика Беларусь

Мигас Д.Б. – д.ф.-м.н., профессор

В работе проведено исследование влияния ориентации и морфологии нанощнуров Si и Ge с диаметром  $\sim 5$  нм на решеточную теплопроводность. Обнаружено, что для нанощнуров Si/Ge со структурой сегментного типа возможно достичь коэффициента теплопроводности менее 2 Вт/(м·К), в то время как значения теплопроводности для нанощнуров из чистого Si и Ge составляют 19,1 и 11,4 Вт/(м·К).

Тепло непрерывно теряется в окружающую среду в виде тепловой энергии из-за ограниченной эффективности (30% -40%) тепловых двигателей. Термоэлектрический эффект обеспечивает способ преобразования этой потерянной тепловой энергии в полезную электрическую энергию. Термоэлектрические генераторы являются компактными, прочными, бесшумными и надежными, поскольку не содержат движущихся частей. Современные применения ограничены, потому что эффективность термоэлектрических материалов все еще довольно низка. Теоретические работы и лабораторные образцы в последнее десятилетие показали потенциал для значительного улучшения термоэлектрических характеристик при использовании наноструктурированных материалов, таких как нанощнуры. Использование нанощнуров может позволить создать термоэлектрические материалы нового поколения с более высокой эффективностью. [1]

В данной работе рассматривались нанощнуры из Si и Ge в виде структур сегментного типа с резкими (когерентными) границами раздела и направлением роста  $\langle 011 \rangle$ ,  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle 112 \rangle$ . Модели нанощнуров вырезались из объемного кристалла вдоль направления роста с формированием внешних граней в виде шестигранника и диаметром  $\sim 5,2$  нм (рисунок 1).

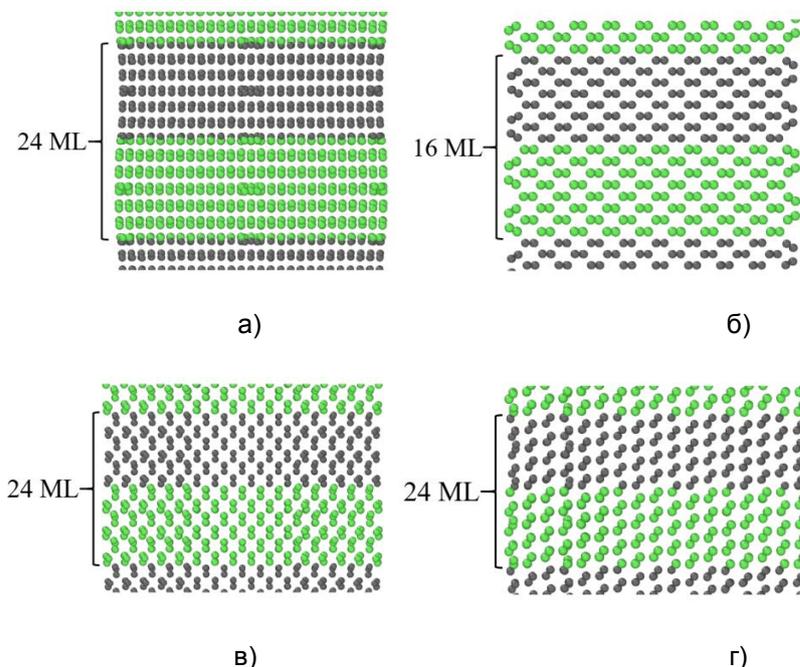


Рисунок 1 – Si/Ge нанощнуры со структурой сегментного типа с направлениями роста:  $\langle 111 \rangle$  (а),  $\langle 110 \rangle$  (б),  $\langle 100 \rangle$  (в),  $\langle 112 \rangle$  (г)

Моделирование решеточной теплопроводности для рассматриваемых нанопроводов вдоль их оси проводилось с помощью пакета LAMMPS, применяя метод неравновесной молекулярной динамики. Коэффициент теплопроводности определялся из закона Фурье:

$$\kappa_{\langle mnp \rangle} = -\frac{E}{2St(dT/dz)}, \quad (1)$$

где  $E$  – перенесенная тепловая энергия;  $2$  – коэффициент, связанный с распространением теплового потока в двух направлениях, вследствие периодических граничных условий;  $t$  – время моделирования;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $dT/dz$  – градиент температуры в продольном направлении;  $\langle mnp \rangle$  – направления  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle 112 \rangle$ ,  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$ , вдоль которых моделировалась теплопроводность. Межатомное взаимодействие для атомов кремния и германия описывалось с помощью потенциала Терсоффа.

Выявлено, что наиболее оптимальной структурой для применения в твердотельных термоэлектрических преобразователях для нанопроводов из кремния и германия оказалась структура с направлением роста  $\langle 112 \rangle$  с одинаковыми  $\{111\}$  и  $\{011\}$  гранями на поверхности (рисунок 2). Наиболее низкое значение коэффициента теплопроводности достигается для Si/Ge нанопроводов с направлением роста  $\langle 112 \rangle$  и длиной периода 2,71 нм или 24 монослоя (12 монослоев Si и 12 монослоев Ge) и равно 1,25 Вт/(м·К), в то время как значения теплопроводности для нанопроводов из чистого Si и Ge составляют 19,1 и 11,4 Вт/(м·К). Снижение теплопроводности в Si/Ge сегментных нанопроводах с уменьшением периода модуляции обусловлено увеличением скорости фонон-интерфейсного рассеяния [2].

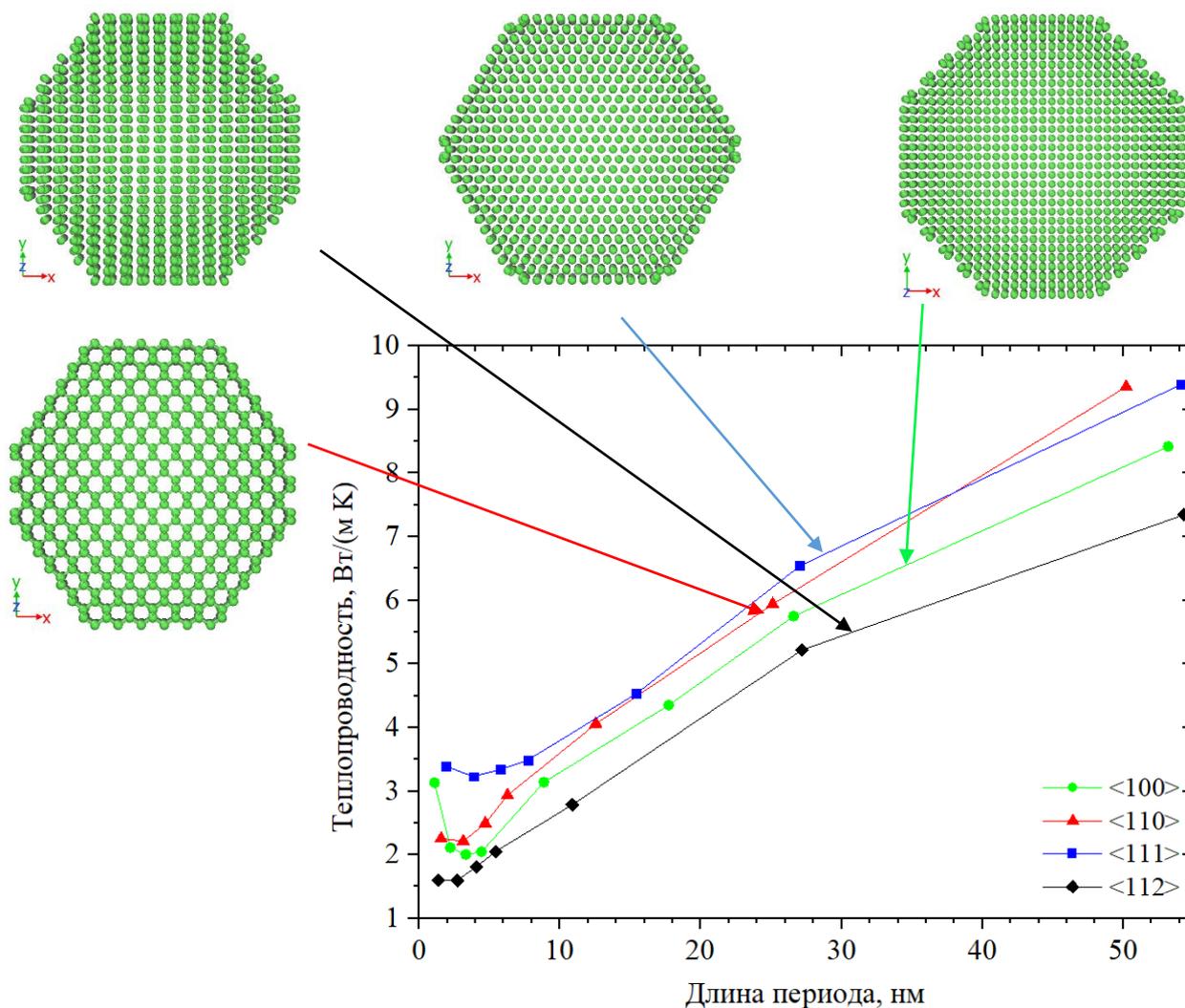


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента теплопроводности Si/Ge сверхрешетчатых НШ ( $L \sim 100$  нм,  $d \sim 5$  нм) с различными ориентациями от длины периода модуляции

Полученные результаты смогут стать отправной точкой для дальнейшего исследования SiGe нанопроводов с чередующимися слоями. Не исключено, что SiGe нанопроводы сегментного типа с перемешанными слоями могут обладать меньшим коэффициентом теплопроводности. Так же следует рассмотреть SiGe нанопроводы типа ядро/оболочка для экспериментально наблюдаемых направлений роста, а именно  $\langle 011 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle 112 \rangle$  и  $\langle 001 \rangle$ .

**Список использованных источников:**

1. High performance thermoelectric materials: Progress and their applications / Lei Yang, Zhi-Gang Chen, Matthew S. Dargusch, Jin Zou // *Advanced Energy Materials*, 2017. — V. 8, № 6.
2. Si/Ge Superlattice Nanowires with Ultralow Thermal Conductivity / M. Hu, D. Poulikakos // *Nano Lett*, 2012. — V. 12, № 11. — P. 5487—5495.

## ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ И МОРФОЛОГИИ НА РЕШЕТОЧНУЮ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ SI/GE НАНОПРОВОДОВ СЕГМЕНТНОГО ТИПА

Холяво И.И.<sup>1</sup>, Хомец А.Л.<sup>1</sup>, Сафронов И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет  
г. Минск, Республика Беларусь

Мигас Д.Б. – д.ф.-м.н., профессор

В работе проведено исследование влияния ориентации и морфологии нанопроводов Si и Ge с диаметром  $\sim 5$  нм на решеточную теплопроводность. Обнаружено, что для нанопроводов Si/Ge со структурой сегментного типа возможно достичь коэффициента теплопроводности менее 2 Вт/(м·К), в то время как значения теплопроводности для нанопроводов из чистого Si и Ge составляют 19,1 и 11,4 Вт/(м·К).

Тепло непрерывно теряется в окружающую среду в виде тепловой энергии из-за ограниченной эффективности (30% -40%) тепловых двигателей. Термоэлектрический эффект обеспечивает способ преобразования этой потерянной тепловой энергии в полезную электрическую энергию. Термоэлектрические генераторы являются компактными, прочными, бесшумными и надежными, поскольку не содержат движущихся частей. Современные применения ограничены, потому что эффективность термоэлектрических материалов все еще довольно низка. Теоретические работы и лабораторные образцы в последнее десятилетие показали потенциал для значительного улучшения термоэлектрических характеристик при использовании наноструктурированных материалов, таких как нанопроводы. Использование нанопроводов может позволить создать термоэлектрические материалы нового поколения с более высокой эффективностью. [1]

В данной работе рассматривались нанопроводы из Si и Ge в виде структур сегментного типа с резкими (когерентными) границами раздела и направлением роста  $\langle 011 \rangle$ ,  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle 112 \rangle$ . Модели нанопроводов вырезались из объемного кристалла вдоль направления роста с формированием внешних граней в виде шестигранника и диаметром  $\sim 5,2$  нм (рисунок 1).

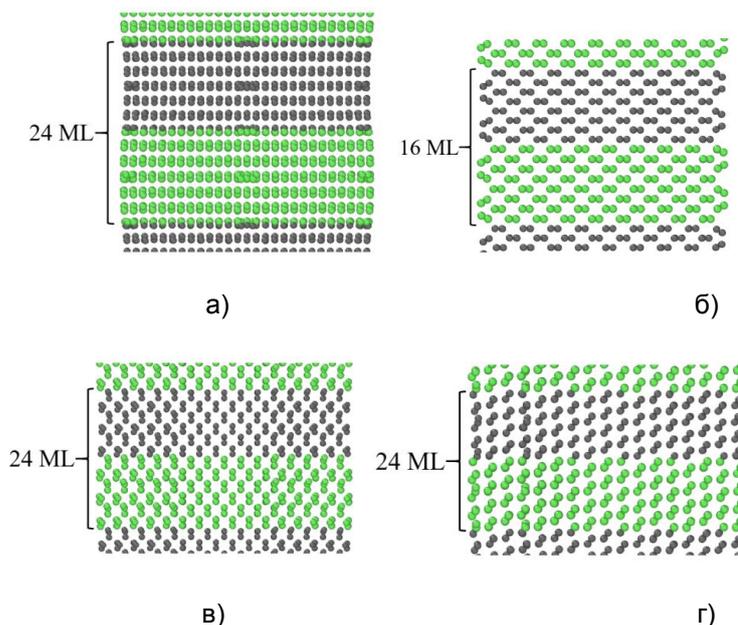


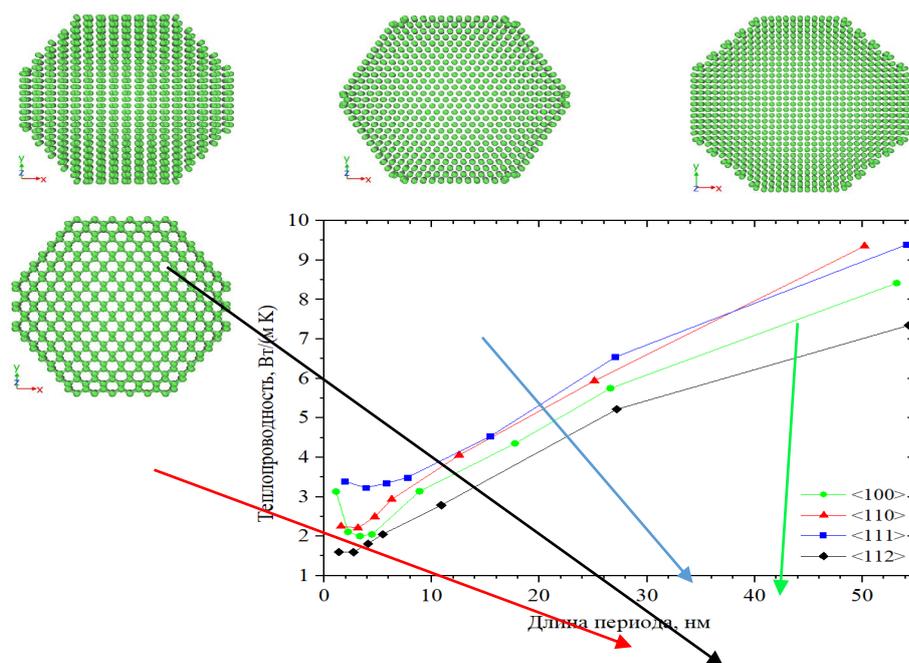
Рисунок 1 – Si/Ge нанопроводники со структурой сегментного типа с направлениями роста: &lt;111&gt; (а), &lt;110&gt; (б), &lt;100&gt; (в), &lt;112&gt; (г)

Моделирование решеточной теплопроводности для рассматриваемых нанопроводников вдоль их оси проводилось с помощью пакета LAMMPS, применяя метод неравновесной молекулярной динамики. Коэффициент теплопроводности определялся из закона Фурье:

$$\kappa_{\langle mnp \rangle} = -\frac{E}{2St(dT/dz)}, \quad (1)$$

где  $E$  – перенесенная тепловая энергия;  $2$  – коэффициент, связанный с распространением теплового потока в двух направлениях, вследствие периодических граничных условий;  $t$  – время моделирования;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $dT/dz$  – градиент температуры в продольном направлении;  $\langle mnp \rangle$  – направления <111>, <112>, <100>, <110>, вдоль которых моделировалась теплопроводность. Межатомное взаимодействие для атомов кремния и германия описывалось с помощью потенциала Терсоффа.

Выявлено, что наиболее оптимальной структурой для применения в твердотельных термоэлектрических преобразователях для нанопроводников из кремния и германия оказалась структура с направлением роста <112> с одинаковыми {111} и {011} гранями на поверхности (рисунок 2). Наиболее низкое значение коэффициента теплопроводности достигается для Si/Ge нанопроводников с направлением роста <112> и длиной периода 2,71 нм или 24 монослоя (12 монослоев Si и 12 монослоев Ge) и равно 1,25 Вт/(м·К), в то время как значения теплопроводности для нанопроводников из чистого Si и Ge составляют 19,1 и 11,4 Вт/(м·К). Снижение теплопроводности в Si/Ge сегментных нанопроводниках с уменьшением периода модуляции обусловлено увеличением скорости фоновинтерфейсного рассеяния [2].

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента теплопроводности Si/Ge сверхрешетчатых НШ ( $L \sim 100$  нм,  $d \sim 5$  нм) с различными ориентациями от длины периода модуляции

Полученные результаты смогут стать отправной точкой для дальнейшего исследования SiGe нанопроводников с чередующимися слоями. Не исключено, что SiGe нанопроводники сегментного типа с перемешанными слоями могут обладать меньшим коэффициентом теплопроводности. Так же следует рассмотреть SiGe нанопроводники типа ядро/оболочка для экспериментально наблюдаемых направлений роста, а именно <011>, <111>, <112> и <001>.

#### Список использованных источников:

1. High performance thermoelectric materials: Progress and their applications / Lei Yang, Zhi-Gang Chen, Matthew S. Dargusch, Jin Zou // *Advanced Energy Materials*, 2017. — V. 8, № 6.
2. Si/Ge Superlattice Nanowires with Ultralow Thermal Conductivity / M. Hu, D. Poulikakos // *Nano Lett*, 2012. — V. 12, № 11. — P. 5487—5495.

# ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В СЛОИСТЫХ Si/Ge ПЛЕНКАХ НА ПОПЕРЕЧНУЮ РЕШЕТОЧНУЮ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Хомец А.Л.<sup>1</sup>, Холяво И.И.<sup>1</sup>, Сафронов И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет  
г. Минск, Республика Беларусь

Мигас Д.Б. – д.ф.-м.н., профессор

В данной работе представлены результаты исследования теплопроводности для тонких слоистых пленок Si/Ge с (110), (100) и (111) кристаллографическими ориентациями. Установлены морфологии слоистых тонких пленок с минимальными значениями теплопроводности, а также выявлено влияние количества и толщины индивидуальных слоев на решеточную теплопроводность.

Одной из основных проблем в современном мире является получение возобновляемой энергии. Около 70% энергии, вырабатываемой с помощью полезных ископаемых на электростанциях или в автомобилях, рассеивается в виде тепла. В последние десятилетия большое внимание обращено на термоэлектрические материалы, поскольку они могут часть этого потерянного тепла преобразовать обратно в электричество. На основе термоэлектрических материалов создаются термоэлектрические генераторы и холодильные установки, работающие на эффекте Зеебека и Пельтье соответственно. Важнейшим недостатком термоэлектрических материалов является их низкая эффективность и как следствие низкий КПД устройств, разработанных на их основе. Эффективность термоэлектрических материалов определяется с помощью безразмерного коэффициента ZT.

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa_e + \kappa_l} \quad (1)$$

где  $S$  - коэффициент Зеебека,  $\sigma$  – электропроводность материала,  $T$  – температура,  $\kappa_e$  и  $\kappa_l$  - электронная и решеточная составляющие теплопроводности соответственно.

Ключевой подход увеличения термоэлектрической добротности термоэлектрических материалов на основе Si и Ge заключается в снижении решеточной теплопроводности. Существует технологическая возможность создания слоистых тонкопленочных структур с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. Снижение теплопроводности в тонких слоистых пленках происходит из-за рассеяния фононов в широком диапазоне частот на внутренних границах раздела между слоями Si и Ge, на точечных дефектах в кристаллической решетке, а также на свободной поверхности данных слоистых структур. Целью данной работы является теоретическое исследование решеточной теплопроводности в слоистых тонких пленках Si/Ge с помощью метода неравновесной молекулярной динамики, обусловленное влиянием свободной поверхности данных структур.

В данной работе рассматривались слоистые Si/Ge тонкие пленки с (110), (100) и (111) ориентациями с резкими границами раздела. Теплопроводность измерялась в поперечном направлении. Толщина индивидуальных слоев Si и Ge варьировалась от 8 до 64 монослоев. Тонкие пленки создавались с помощью программы для визуализации и анализа данных OVITO. Для ориентации (100) производилась димеризация атомов на поверхности путем смещения определенных атомов навстречу друг другу для образования связи между ними.

Расчет теплопроводности проводился с помощью метода неравновесной молекулярной динамики, реализованного в программном пакете LAMMPS [1]. Для описания межатомного взаимодействия между атомами Si и Ge использовался потенциал Терсоффа. Коэффициенты решеточной составляющей теплопроводности определялись из закона Фурье:

$$\kappa_{<mnt>} = - \frac{E}{S \cdot t \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right)} \quad (2)$$

где  $E$  – перенесенная тепловая энергия,  $\kappa$  – коэффициент теплопроводности,  $\frac{dT}{dx_i}$  – градиент температуры в структуре,  $t$  – время моделирования,  $S$  – площадь поперечного сечения. Площадь поперечного сечения задавалась большей  $\sim 60$  нм<sup>2</sup>. Для создания теплового потока в системе на концах структуры располагались термостаты с температурами 310K горячего слоя и 290K холодного слоя.

На рисунке 1 представлена зависимость решеточной теплопроводности для слоистых Si/Ge тонких пленок. Проанализировав зависимости можно сделать вывод, что с увеличением длины

периода и/или числа периодов имеет место увеличение поперечной решеточной теплопроводности для всех кристаллографических ориентаций. В слоистых структурах эффективная средняя длина свободного пробега может существенно превышать длину периода. Увеличение поперечной решеточной теплопроводности обусловлено возрастанием средней длины свободного пробега фононов при увеличении толщины самой структуры [2-4]. Это позволяет фононам преодолевать большие расстояния между актами рассеяния на границах раздела между Si и Ge. Как отмечают авторы работы [3] в структурах с малыми периодами меньше 10 нм основной вклад в теплоперенос вносят фононы с длиной волны от 1 до 5 нм, а спектры средней длины свободного пробега фононов смещаются к более низким значениям. Из этого следует, что при теплопереносе в поперечном направлении ярко выражены эффекты поверхностного рассеяния и фононы с длинами волн больше 5 нм эффективно рассеиваются за счет граничного и поверхностного рассеяния и не участвуют в теплопереносе.

Также было установлено, что минимальное значение теплопроводности в 0,34 Вт/(м·К) достигается в пленках с ориентацией (100) с толщиной периода в 1,08 нм. Для пленок с ориентациями (111) и (100) наименьшие значения теплопроводности равны 0,51 Вт/м·К (1,88 нм) и 0,5 Вт/м·К (1,53 нм) соответственно. Следует отметить, что отличие в толщине пленок получается вследствие различия размеров элементарных ячеек данных ориентаций.

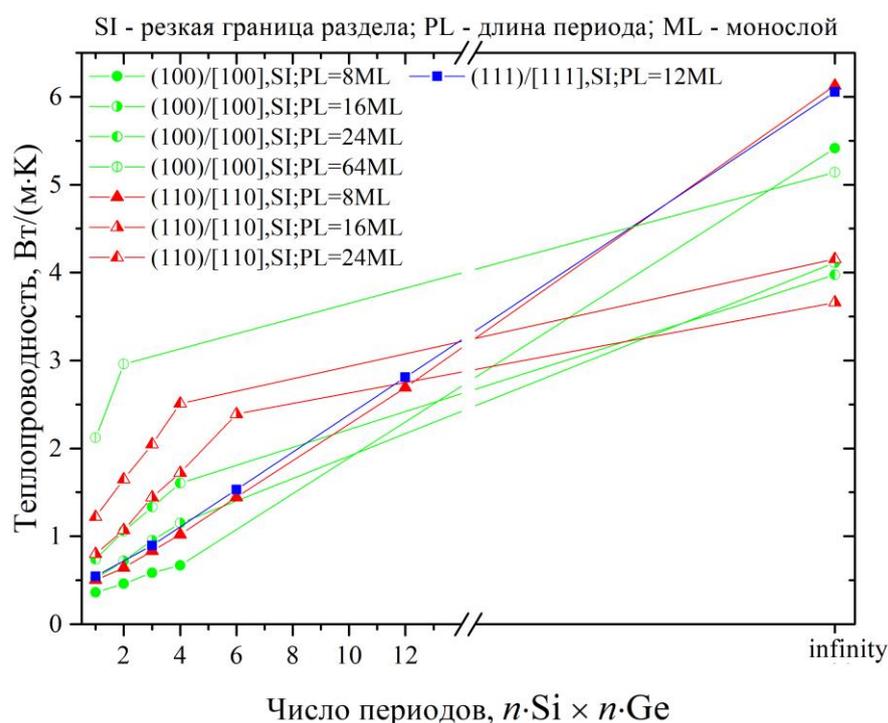


Рисунок 1 – Зависимость решеточной теплопроводности в поперечном направлении от длины и числа периодов для (100), (110) и (111) ориентаций свободной поверхности

Таким образом, проведен расчет теплопроводности слоистых Si/Ge тонких пленок с помощью метода неравновесной молекулярной динамики. Полученные зависимости показали, что снизить решеточную составляющую теплопроводности можно путем уменьшения периода слоистой структуры, а также выбором определенной кристаллографической ориентации. При небольшом числе периодов имеет место существенное влияние поверхностной ориентации на решеточную теплопроводность, однако по мере увеличения количества слоев имеет место ослабление рассеяния фононов на поверхности и усиление рассеяния на внутренних границах раздела.

**Список использованных источников:**

1. Plimpton, S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics / S. Plimpton // *Journal of Computational Physics*. – 1995. – Vol. 117, № 1. – P. 1 – 19.
2. Hylgaard, P. Phonon superlattice transport / P. Hylgaard, G. D. Mahan // *Physical Review B*. – 1997. – Vol. 56, № 17.
3. Malhotra, A. Cross-plane thermal conductivity in superlattices: Impact of multiple length scales on phonon transport / A. Malhotra, K. Kothari, M. Maldovan // *Journal of Applied Physics*. – 2019. – Vol. 125, № 4.
4. Kothari, K. Cross-plane heat conduction in III-V semiconductor superlattices / K. Kothari, A. Malhotra, M. Maldovan // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2019. – Vol. 31, № 34.

## СИНТЕЗ ГРАФЕНА МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА ТЕКСТУРИРОВАННОМ МЕДНОМ КАТАЛИЗАТОРЕ С ОРИЕНТАЦИЕЙ <001> И <011>

Дронина Е.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Комиссаров И.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент

В данной работе представлены результаты исследования структуры графена, синтезированного с помощью метода химического осаждения из газовой фазы на текстурированном медном катализаторе с ориентацией <001> и <011>. Установлено, что графен, выращенный на медном катализаторе с ориентацией <011> является менее дефектным, менее напряженным и имеет более выраженное распределение концентрации носителей заряда.

Графен, осажденный методом ХПО, является перспективным материалом при использовании его в качестве буферного слоя для эпитаксиального роста широкозонных нитридных полупроводников.

Структура медного катализатора напрямую определяет кристалличность графена, которая в свою очередь определяет кристалличность эпитаксиальных слоев GaN/AlN осажденных на него. Так, графен, осажденный на меди с ориентацией <001> состоит из кристаллитов двух типов, повернутых под углом  $30^\circ$ . С другой стороны, для ориентации <011>, согласно работе [1], должны наблюдаться только однонаправленные домены. В то же время, дефектность, а также количество слоев графена также определяют структуру и морфологию эпитаксиальных слоев GaN/AlN осажденных на нем. В этой работе, методом комбинационного рассеяния света, исследуется структура графена, синтезированного с помощью химического осаждения из газовой фазы, на текстурированном медном катализаторе (фольге) с ориентацией <001> и <011> (рисунок 1).

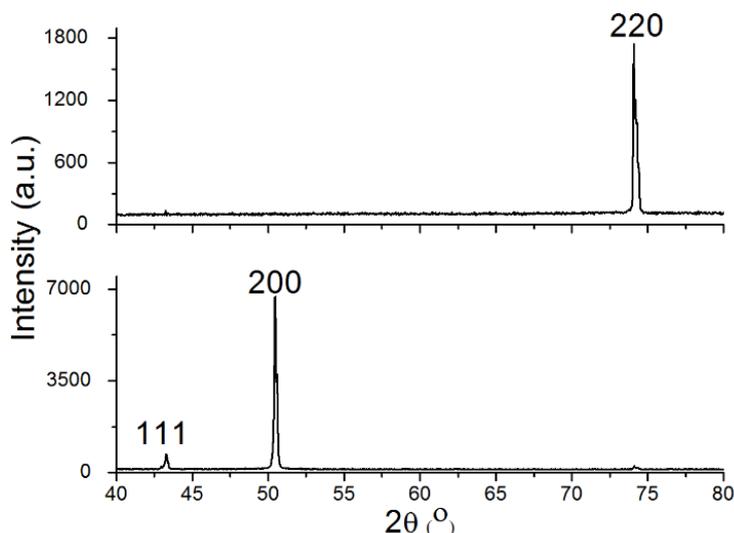


Рисунок 1 – Рентгенограммы каталитических медных подложек различной ориентации после синтеза графена

Синтез графена осуществлялся в трубчатом кварцевом реакторе с внутренним диаметром 12,5 мм на медной фольге с ориентацией <001> и <011>. Предварительно медная фольга подвергалась электрохимической полировке в 1М растворе ортофосфорной кислоты в течении 5 минут при прикладываемом напряжении 2.3В. Непосредственно перед синтезом в кварцевом реакторе медная фольга отжигалась при следующих параметрах: поток азота  $66 \text{ см}^3/\text{мин}$ , поток водорода  $150 \text{ см}^3/\text{мин}$  при температуре  $1050^\circ\text{C}$ . После отжига поток водорода уменьшался до  $6 \text{ см}^3/\text{мин}$  и осуществлялся напуск метана с расходом  $1,7 \text{ см}^3/\text{мин}$  в течении 30 минут. Затем образец охлаждался со скоростью  $50^\circ\text{C}/\text{мин}$ .

Исследования спектров комбинационного рассеяния (КР) проводились на сканирующем конфокальном микроскопе Confotec NR500. Использован лазер с энергией возбуждения 2,62 эВ (473 нм). Размер области картирования составлял  $48,214 \times 48,214 \text{ мкм}$ , количество точек на карте  $20 \times 20$ .

Синтезированный при указанных параметрах графен является малослойным ( $\sim 5$  слоев), с незначительной фракцией однослойного графена (рисунок 2). На рисунке 2 представлены типичные спектры для одно и пятислойной фракций графена. Следует отметить, что 2D полоса для

пятислойного графена является ассиметричной. Среднее значение соотношение интенсивности полос  $I_G/I_D$  составляет  $\sim 5$  и  $9$  для ориентаций  $\langle 001 \rangle$  и  $\langle 011 \rangle$ , соответственно.

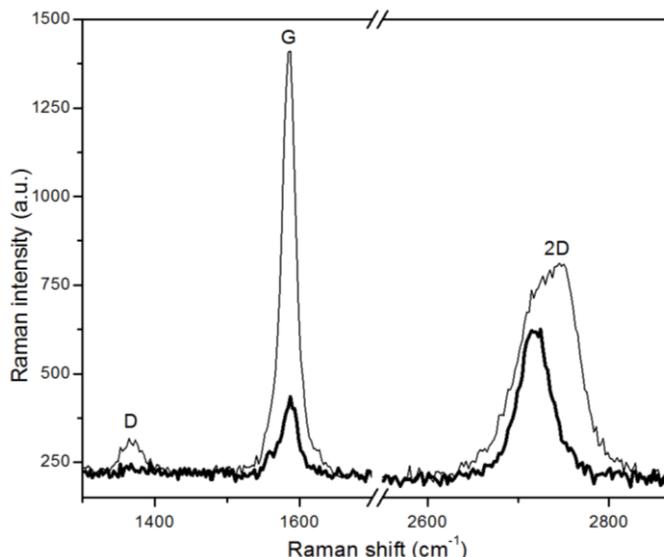


Рисунок 2 – Типичные спектры КР одно и - пятислойного графена на медном катализаторе

Кроме того, корреляционный анализ положения полос 2D и G (рисунок 3, а) позволяет заключить, что графен, выращенный на меди с ориентацией  $\langle 001 \rangle$  (рисунок 3,б), является более напряженным по сравнению с графеном, выращенном на медном катализаторе с ориентацией  $\langle 011 \rangle$  (рисунок 3,в). В свою очередь графен, выращенный с ориентацией  $\langle 011 \rangle$  имеет более выраженное распределение экспериментальных точек вдоль линии распределения концентрации носителей заряда.

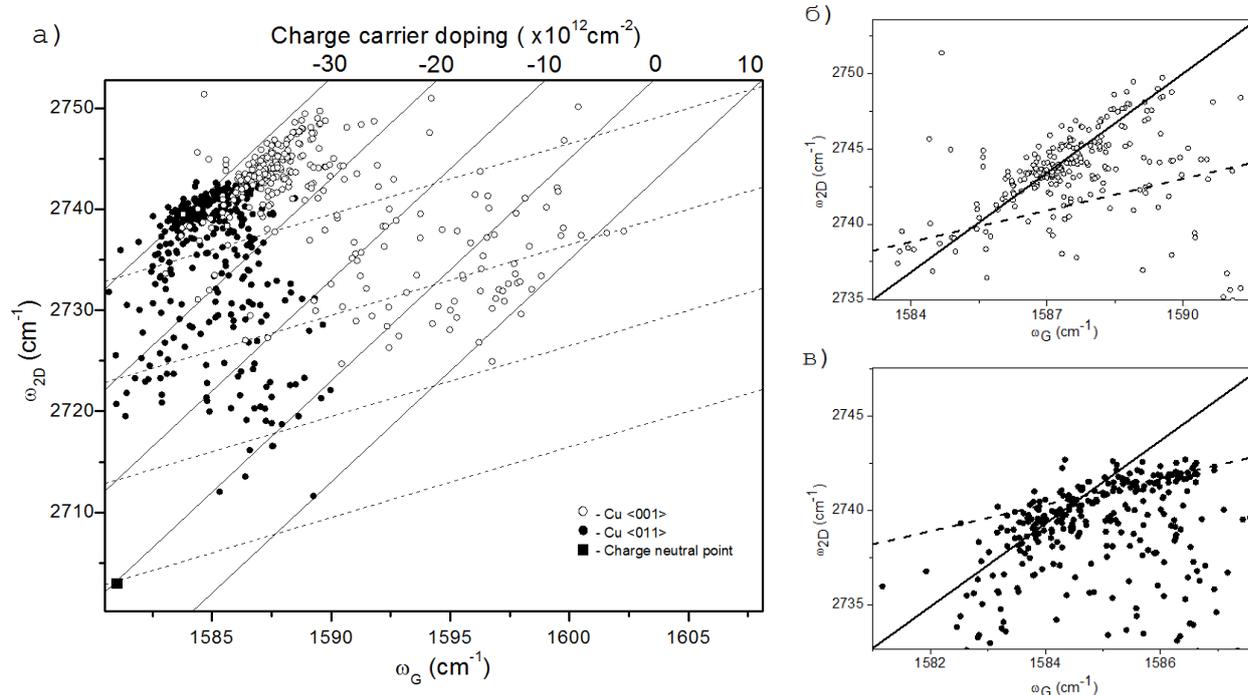


Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости положения линии 2D от положения линии G для всех исследуемых образцов (а); экспериментальные зависимости положения линии 2D от положения линии G для образцов графена, выращенных на медном катализаторе с ориентацией  $\langle 001 \rangle$  (б) и  $\langle 011 \rangle$  (в); Линии постоянного напряжения и постоянной концентрации носителей заряда проведены согласно работе [2] и [3] соответственно

**Список использованных источников:**

1. Controlling the Orientation, Edge Geometry, and Thickness of Chemical Vapor Deposition Graphene / T.M. Adrian [et al.] // ACS Nano. - 2013. – Vol. 7, № 2. – P. 1351-1359.
2. Raman Spectroscopy of Graphene and Bilayer under Biaxial Strain: Bubbles and Balloons/ J. Zabel [et al.] // Nano letters. - 2012. – Vol. 2, № 12. – P. 617-621.

УДК 543.4

## ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫМ МЕТОДОМ ГЕТЕРОСТРУКТУРОКСИД ЦИНКА/МЕТАЛЛ

*Гребнев В.П., магистрант гр. 046801*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Чубенко Е.Б. – канд. техн. наук, доцент*

**Аннотация.** В данной статье исследован процесс формирования структур оксид цинка/металл на подложках из монокристаллического кремния. Синтез оксида цинка гидротермальным методом проводился при температурах 75 – 95 °С в водных растворах нитрата цинка и гексаметилентетрамина. Полученные структуры обладают кристаллической структурой и демонстрируют экситонную и связанную с дефектами фотолюминесценцию на длине волны 380 нм и 580 нм соответственно. После нанесения металлических серебряных наночастиц на поверхность полученных структур иммерсионным методом, показана возможность их использования для качественного определения веществ методом рамановской спектроскопии на примере родамина Б.

**Ключевые слова.** Оксид цинка, гидротермальное осаждение, наноструктуры, фотолюминесценция.

Процессы синтеза оксида цинка (ZnO) активно исследовались еще в последние десятилетия XX века благодаря возможности применения этого полупроводника в акустических и оптических датчиках, преобразователях энергии и в качестве фотокатализатора. Однако в последние несколько десятилетий изучение именно одномерных структур из ZnO приобрело важное значение в сфере нанотехнологий и наноматериалов. С уменьшением размеров проявляются новые электрические, механические, химические и оптические свойства, обусловленные эффектами поверхностного и квантового ограничения. Наностержни и нанопроволоки из собственного и легированного ZnO привлекают интерес исследователей благодаря улучшенным электрическим, фотокаталитическим и поверхностным свойствам[1-3].

ZnO нанопроволоки обычно синтезируются с помощью вакуумных методов, таких как газофазные методы, послойного атомного осаждения, металлоорганическое химическое осаждение из паровой фазы и импульсное лазерное осаждение. Указанными способами могут быть получены высококачественные монокристаллические проволоки длиной несколько микрон. Однако эти методы создают множество ограничений для выбора подложки и, как правило, имеют низкий конечный выход продукта. ZnO также может быть легко получен в виде сплошных тонких пленок и массивов наноструктур такими жидкостными методами как электрохимическое и гидротермальное осаждение. Это является основным преимуществом технологии ZnO перед другими подобными широкозонными полупроводниковыми материалами – GaAs и GaN. Гидротермальным методом, может быть реализован при температурах ниже 200 °С, что дает возможность более простого получения нанопроволок высокой плотности и массивов наностержней. Возможно получение вертикально расположенных нанопроволок из ZnO на поверхности подложек с зародышевым слоем ZnO. Массив упорядоченных наноструктур из ZnO может быть использован в качестве подложки для формирования упорядоченных массивов наночастиц полупроводников и металлов, осаждаемых на его поверхность. Гетероструктуры ZnO/металл, в которых распределение металлических частиц задано расположением наноструктур ZnO на поверхности подложки, могут использоваться в качестве основы для сенсоров и подложек для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния[4].

В настоящей работе был исследован процесс формирования гетероструктур на основе упорядоченных массивов наноструктур из оксида цинка и наночастиц металлов для создания подложек для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния.

Гидротермальное осаждение нанокристаллов оксида цинка проводилось на подложках монокристаллического кремния электронного типа проводимости марки КЭС-0,01 с кристаллографической ориентацией (111). Для осаждения оксида цинка использовался водный раствор, содержащий нитрат цинка ( $Zn(NO_3)_2$ ) и гексаметилентетрамин ( $C_6H_{12}N_4$ ) в определенной концентрации. Кремниевые подложки перед проведением экспериментов обрабатывались в насыщенном растворе оксида хрома (VI) в концентрированной серной кислоте в течение 1 мин и длительно промывались в деионизованной воде. Далее они

помещались на 15 мин в 4,5 % водный раствор плавиковой кислоты при комнатной температуре. При этом происходило удаление оксида кремния с поверхности подложек, и формировался слой водородной пассивации. Наличие водородной пассивации контролировалось по углу смачивания поверхности кремния каплей деионизованной воды.

Процесс гидротермального осаждения оксида цинка проводился в стеклянном автоклаве с плотно притертой пластиковой крышкой. Внутренний объем автоклава составлял 40 мл. Для нагрева автоклава использовалась электрическая плитка, оснащенная термодатчиком, соединенным с ней обратной связью (рисунок 1). Термодатчик погружался в раствор, находящийся в автоклаве. Вырезанные из кремниевой подложки образцы квадратной формы площадью 1 см<sup>2</sup> помещались вертикально на дно автоклава в специальном фторопластовом держателе. Во всех экспериментах образцы помещались в реакционный раствор при комнатной температуре, нагревались до целевой температуры от 75 до 95 °С в течение 30 мин и выдерживались при данной температуре на протяжении 2 ч. В процессе осаждения происходило постоянное перемешивание раствора со скоростью 120 об./мин. После завершения процесса осаждения подложки извлекались из автоклава, промывались в деионизованной воде и сушились на воздухе [5]. Осаждение частиц металла на поверхность оксида цинка осуществлялось методом химического. Нанесение родамина Б на подложки осуществлялось иммерсионным методом из раствора с концентрацией красителя 10<sup>-6</sup> М.

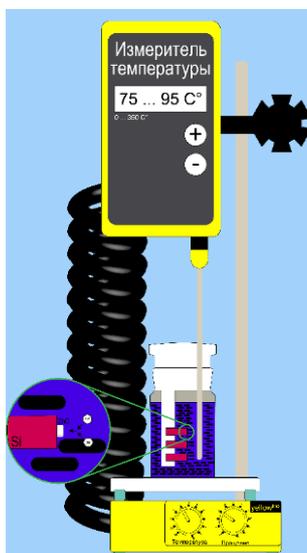


Рисунок 1 – Схематическое изображение установки для синтеза ZnO гидротермальным методом

Размер нанокристаллов оксида цинка и плотность их расположения на подложке существенно зависели от температуры реакционной среды в процессе осаждения (рисунок 2). При одинаковой продолжительности процесса осаждения, увеличение температуры приводило к уменьшению диаметра и увеличению высоты нанокристаллов, связанному с увеличением их скорости роста. При температуре 75 °С диаметр кристаллов достигал 800 нм. При температурах реакционной среды 85 °С и 95 °С средний диаметр кристаллов оксида цинка составлял приблизительно 600 и 500 нм соответственно. Плотность расположения кристаллов оксида цинка на подложке увеличивалась с ростом температуры. Это связано с увеличением количества активных центров зарождения кристаллов на поверхности кремниевой подложки при возрастании энергии системы.

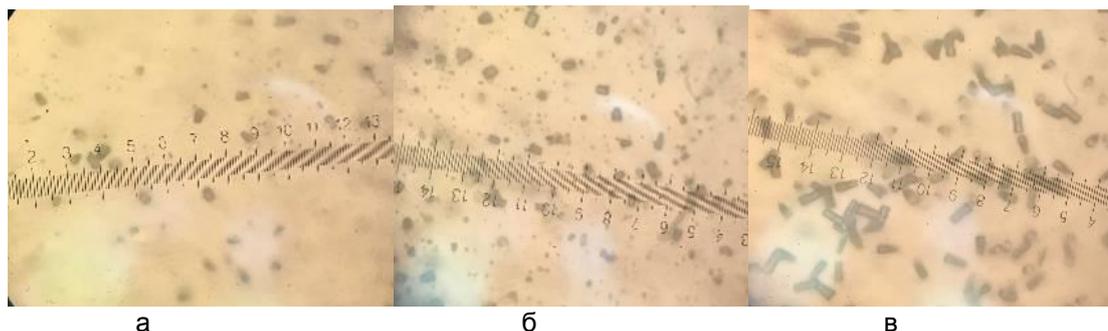


Рисунок 2 – Оптические фотографии поверхности подложек монокристаллического кремния со сформированными при температуре 75 (а), 85 (б) и 95 °С (в) нанокристаллами оксида цинка

Исследование спектров фотолюминесценции (рисунок 3) образцов показало, что кристаллы оксида цинка демонстрируют две полосы излучения. Максимум интенсивности одной из полос, связанной с дефектами кристаллической решетки – вакансиями кислорода и междоузельными атомами кислорода, расположен на длине волны – 580нм. Максимум второй полоса фотолюминесценции с меньшей интенсивностью расположен около 380 нм. Эта полоса соответствует рекомбинации свободных экситонов. Ее наличие указывает на достаточно низкую концентрацию дефектов кристаллической решетки оксида цинка.

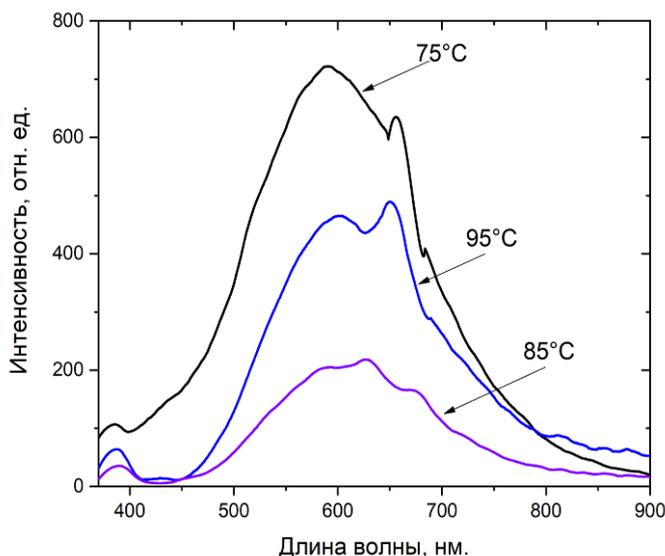


Рисунок 3 – Спектры фотолюминесценции образцов нанокристаллов оксида цинка, полученных при различных температурах

Исследование спектров рамановского рассеяния показало, наличие характерных для кристаллического оксида цинка полос (рисунок 4). В монокристаллическом ZnO с гексагональной решеткой типа вюрцита на элементарную ячейку приходится 4 атома, что приводит к возникновению 12 фононных мод: одной продольно-акустической (LA), двух поперечно-акустических (TA), трех продольно-оптических (LO) и шести поперечно-оптических ветвей (TO)[6]. Моды  $A_1$  и  $E_1$  проявляются в рамановской и ИК спектроскопии, в то время как неполярные  $E_2$  моды можно увидеть только на рамановских спектрах. На полученных спектрах рамановского рассеяния образцов оксида цинка видны линии, соответствующие колебательным модам TO ( $A_1$ )  $380\text{ см}^{-1}$ , LO ( $A_1$ )  $574\text{ см}^{-1}$  и TO ( $E_1$ )  $591\text{ см}^{-1}$ . Моде  $E_2^{\text{low}}$  отсутствует на спектрах вследствие того, что краевой оптический фильтр рамановского спектрометра обрезает данные на участке от 0 до  $273\text{ см}^{-1}$ . В то же время мода  $E_2^{\text{high}}$  расположенная около  $437\text{ см}^{-1}$  и связанная только с колебаниями атомов кислорода представлена на полученных спектрах.

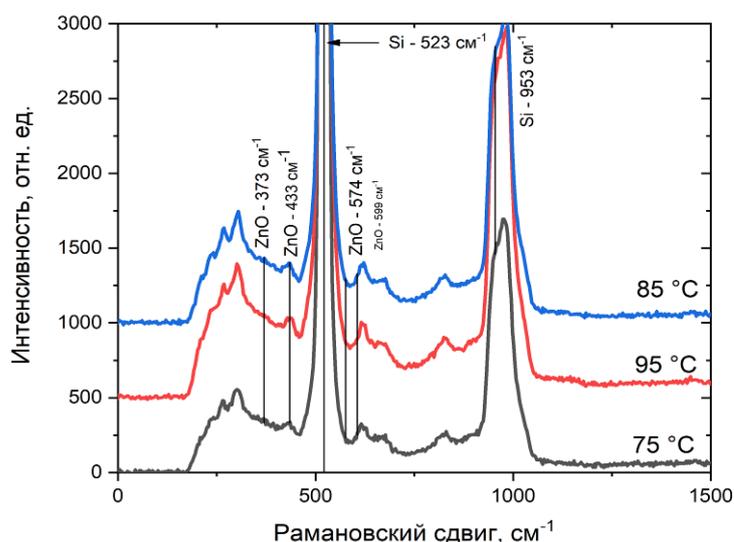


Рисунок 4 – Спектры рамановского рассеяния подложек оксида цинка с сформированным на нём оксида цинка и серебра

После нанесения частиц серебра и родамина Б также были исследованы спектры рамановского рассеяния полученных образцов (рисунок 5). После нанесения родамина Б в концентрации  $10^{-6}$  М на спектрах рамановского рассеяния отчетливо виден набор линий, соответствующих колебательным модам, характерным для этого органического красителя: сжатие ксантеновых колец –  $611 \text{ cm}^{-1}$ , растяжение связей С–С –  $1189 \text{ cm}^{-1}$ , изгиб С–Н связей –  $1278 \text{ cm}^{-1}$ , скручивание С–С связей в ароматических кольцах –  $1355, 1504, 1535 \text{ cm}^{-1}$ , скручивание С–С и растяжение С=C связей в ароматических кольцах –  $1644 \text{ cm}^{-1}$  [7].

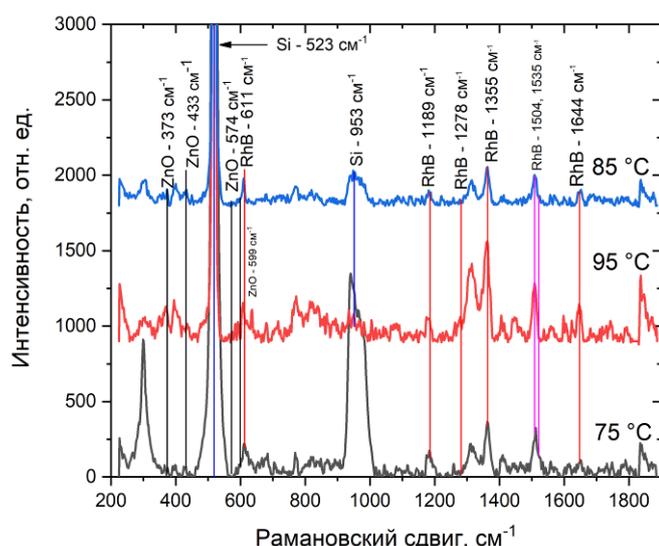


Рисунок 5 – Спектры рамановского рассеяния подложек оксида цинка с сформированным на нём оксида цинка, серебра и родамина В

Таким образом, в работе были получены массивы кристаллических наноструктур оксида цинка, обладающих гексагональной кристаллической решеткой типа вюрцита. Данные структуры проявляют фотолюминесценцию в видимом и ближней ультрафиолетовом диапазоне. Наличие экситонной фотолюминесценции указывает на достаточно высокое кристаллическое совершенство полученных структур. При нанесении на поверхность подложки частиц серебра и исследовании с их помощью раствора родамина Б с концентрацией  $10^{-6}$  М методом рамановской спектроскопии удалось обнаружить набор полос, соответствующих данному органическому красителю. Таким образом, использованный подход может быть применен в разработке подложек для спектроскопии комбинационного рассеяния.

Данная работа выполнена в рамках задания 2.19 ГПНИ Республики Беларусь «Материаловедение, новые материалы и технологии».

**Список использованных источников:**

1. Emanetoglu N W, Gorla C, Liu Y, Liang S and Lu Y. // «Epitaxial ZnO piezoelectric thin films for saw filters» // *Mater. Sci. Semicond.* – 1999
2. Baxter J B, Walker A M, van Ommering K and Aydil E S. // «Synthesis and characterization of ZnO nanowires and their integration into dye sensitized solar cells» // *Nanotechnology*, V.17 - 2006.
3. Lin Y, Zhang Z, Tang Z, Yuan F and Li J. // «Characterization of ZnO-based varistors prepared from nanometer precursor powders» // *Adv. Mater. Opt. Electron* – 1999
4. Baruah S., Dutta J. // «Hydrothermal growth of ZnO nanostructures» // *Science and technology of advanced materials.* – 2009.
5. Е. Б. Чубенко. // «Гидротермальное осаждение нанокристаллов оксида цинка на кремниевой подложке» // БГУИР, 2012.
6. V.A. Coleman, C.Jagadish // «Basic properties and application of ZnO» // *Department of Electronic Materials Engineering, Research School of Physical Sciences and Engineering, The Australian National University, Canberra, ACT 0200, Australia, Ch.1 – 2006*
7. Shuang Lin, Wu-Li-Ji Hasi, Xiang Lin, Si-qin-gao-wa Han, Xiu-Tao Lou, Fang Yang, Dian-Yang Lin and Zhi-Wei Lu. // «Rapid and sensitive SERS method for determination of Rhodamine B in chili powder with paper-based substrates» // *Analytic Methods*, Issue 12 - 2015

UDC 543.4

## FORMATION OF ZINC OXIDE HETEROSTRUCTURES BY HYDROTHERMAL METHOD/METAL

*Grebnev V.P., master's degree student group 046801*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>1</sup>, Minsk, Republic of Belarus*

*Chubenko E.B. – PhD in Technical Science*

**Annotation.** In this paper, the process of forming zinc oxide/metal structures on single-crystal silicon substrates is studied. The synthesis of zinc oxide by hydrothermal method was carried out at temperatures of 75-95 °C in aqueous solutions of zinc nitrate and hexamethylenetetramine. The resulting structures have a crystalline structure and exhibit exciton and defect-related photoluminescence at wavelengths of 380 nm and 580 nm, respectively. After deposition of metallic silver nanoparticles to the surface of the obtained structures by immersion method, the possibility of their use for the qualitative determination of substances by Raman spectroscopy is shown on the example of rhodamine B.

**Keywords.** Zinc oxide, hydrothermal deposition, nanostructures, photoluminescence.

## THE INFLUENCE OF REGION SIZES ON THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF GRAPHENE-BASED FOUR-BARRIER RESONANT TUNNELING STRUCTURES

*Polyakov I.S., master student gr.046801*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Abramov I.I. – Dr. Sci. in Physics and Mathematics, professor*

**Annotation.** This article discusses the concept, essence and application areas of graphene-based four-barrier resonant tunneling structures (RTS). The purpose of this paper is to study the influence of various technological parameters on the electrical characteristics of RTS. The current-voltage characteristics of graphene-based resonant tunneling structures on silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) and hexagonal boron nitride (h-BN) substrates are simulated for different widths of barriers and quantum wells. The calculations presented were carried out using a numerical model based on the Schrödinger equation.

**Keywords.** Resonant tunneling structures, current-voltage characteristics, graphene

When the Fermi level of the injection electrode coincides with the discrete level of a low-dimensional structure bounded by two potential barriers, there is a sharp increase in the tunnel current flowing through it, which is manifested on current-voltage characteristic by a section with a negative differential resistance, which is shown in Fig. 1. This phenomenon is called "resonant tunneling" [1].

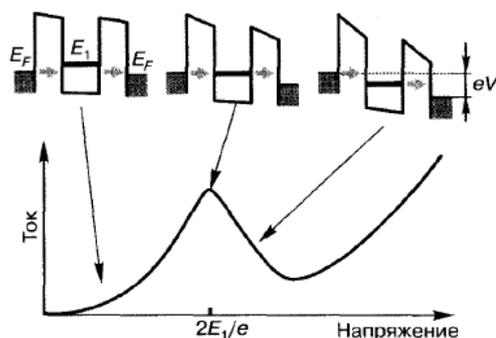


Fig. 1 - Energy diagram and current-voltage characteristic of a double-barrier RTS

If you continue to lower the energy level of  $E_1$ , then the charge carriers will no longer be able to tunnel with the conservation of energy and momentum, so they are delayed in the well. The current through the structure will begin to decrease, which will lead to the appearance of a section with a negative differential resistance on the current-voltage characteristic.

The numerical model based on the solution of the approximated one-dimensional Schrödinger equation and included in the nanoelectronic device simulation software system NANODEV [2,3] was chosen as the main model for calculating current densities. As a result of the approximation Tikhonov-Samarsky approach, the solution of the Schrödinger equation reduces to the solution of a system of linear algebraic equations. The result of calculation is the values of the wave function in the nodes of the spatial-discretization grid for a given energy of the incident particle and the applied voltage.

Figure 2 shows a four-barrier RTS based on bilayer graphene under investigation. This device includes potential barriers ( $d_{b1}, d_{b2}, d_{b3}, d_{b4}$ ) and quantum wells ( $d_{w1}, d_{w2}, d_{w3}$ ). In the simulation the barriers height ( $h$ ) for RTS on a substrate made of  $\text{SiO}_2$  and on a substrate made of h-BN are 3.58 eV and 3.137 eV respectively.

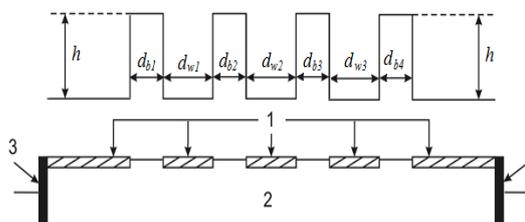


Fig. 2 - Four-barrier RTS and conduction band energy: 1 – graphene; 2 – substrate; 3 – contacts.

Table 1 shows the region sizes for which the current-voltage characteristics are simulated.

Table 1 - The region sizes of studied graphene-based RTS simulation

Substrate material	Width of barriers, nm			Width of quantum wells, nm		
	curve 1	curve 2	curve 3	curve 1	curve 2	curve 3
$\text{SiO}_2$	1,3	1,5	1,2	3,0	3,5	4,0
h-BN	1,2	1,3	1,4	3,0	3,5	4,0

Figure 3 shows the current-voltage characteristics of the four-barrier RTS when changing the width of the barriers: on a substrate made of  $\text{SiO}_2$  (Fig. 3a); on a substrate made of h-BN (Fig. 3b).

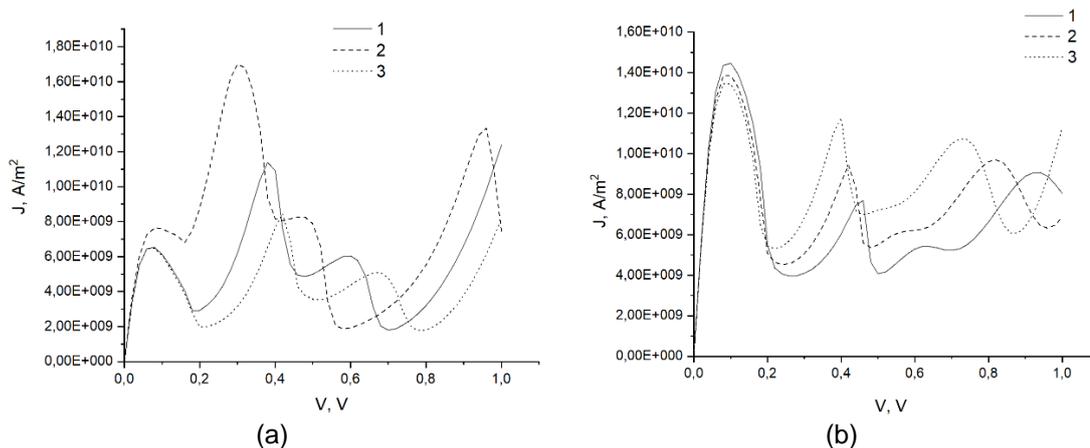


Fig.3 - Current-voltage characteristic at different values of the barriers width

Figure 4 shows the current-voltage characteristics of the four-barrier RTS when changing the width of the quantum wells: on a substrate made of SiO<sub>2</sub> (Fig. 4a); on a substrate made of h-BN (Fig. 4b).

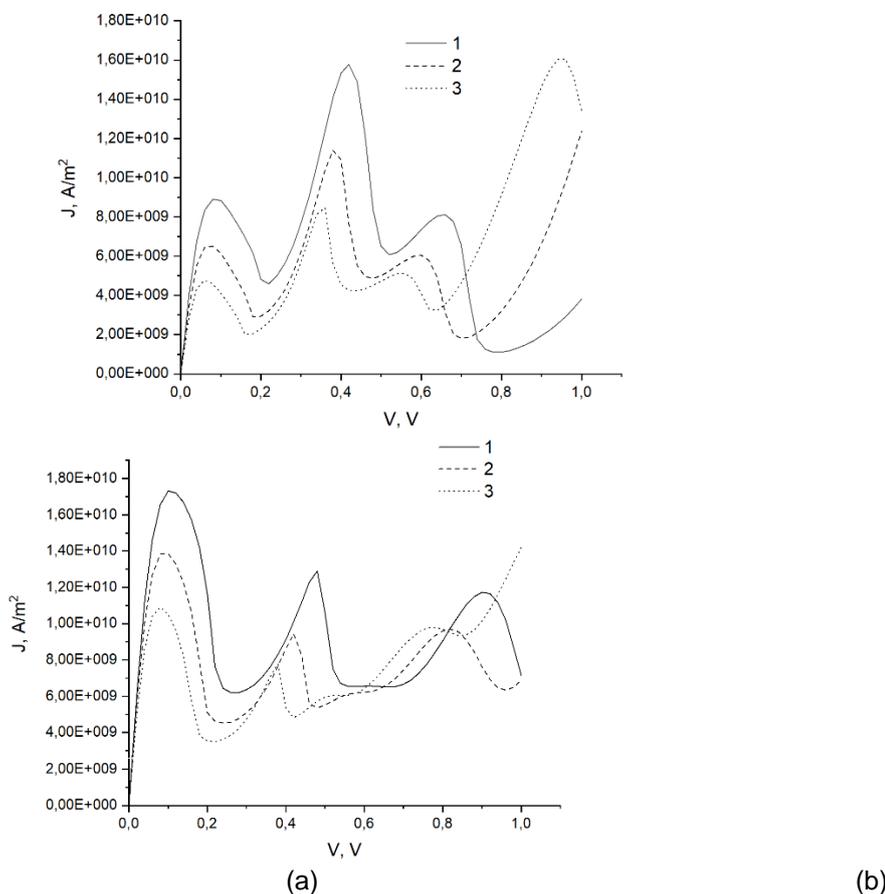


Fig. 4 - Current-voltage characteristic at different values of the width of the quantum wells

It was found that the decrease in the width of the barriers leads to the decrease in the current density, as well as the increase in the voltage values of the second and third peaks. The current density decreases and the peaks shift to lower voltage values, as the width of the quantum wells increases.

#### References

1. Nanoelectronics: theory and practice textbook / V. E. Borisenko, [et al.] - 2nd ed., reprint. and additional -M.: BINOM. Laboratory of Knowledge, 2013. - 366 p.
2. System of modeling of nanoelectronic devices-NANODEV / I. I. Abramov, [et al.]: Microelectronics. 2003. Vol. 32, no. 2. pp. 124-133.
3. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities / I. I. Abramov, [et al.]: Proc. of SPIE., 2010. Vol. 7521, pp. 75211E-1-8.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРТИН ДИФРАКЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ 2D СТРУКТУР

Богомазов Н.С.<sup>1</sup>, студент гр.740301

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Комиссаров И.В. – канд. физ.-мат. наук

В работе представлен алгоритм симуляции дифракционных картин быстрых отраженных электронов посредством языка программирования JS, а также получение данных для дальнейшей обработки и их анализа.

Одним из перспективных направлений для приложений графена является использование его в качестве буферного слоя на аморфных подложках для эпитаксиального роста пленок широкозонных нитридных полупроводников. Как было показано в работе [1], осажденные плёнки GaN/AlN характеризуются присутствием двух фракций кристаллитов со взаимным углом поворота  $30^\circ$  в плоскости пленки. В связи с этим становится актуальной проблема контроля качества кристалличности буферного слоя графена, как задающего качество эпитаксиальной пленки осажденной на нем.

Целью моей работы является разработка алгоритма симуляции дифракционных картин быстрых отраженных электронов для двумерных структур, таких как графен. Симуляция учитывает переход в обратное пространство и входные параметры, такие как:

- энергия электронов источника;
- размер кристаллита;
- чувствительность прибора;
- угол поворота подложки.

На рисунке 1 представлен пример типичной дифракционной картины (дифрактограммы) исследуемого графена. Ниже описано теоретическое обоснование такого результата.



Рисунок 1 – Типичная дифрактограмма графена полученная методом RHEED

На рисунке 2 представлена прямая решетка с трансляционными векторами  $\vec{a}_1$  и  $\vec{a}_2$  для графена в двумерном пространстве. По формулам перехода к обратному пространству можно получить трансляционные вектора  $\vec{b}_1$  и  $\vec{b}_2$ , с использованием которых была построена двумерная обратная решетка графена (см. рисунок 3).

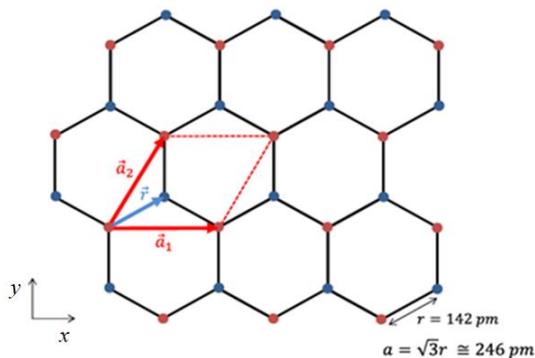


Рисунок 2 – Прямая решетка графена

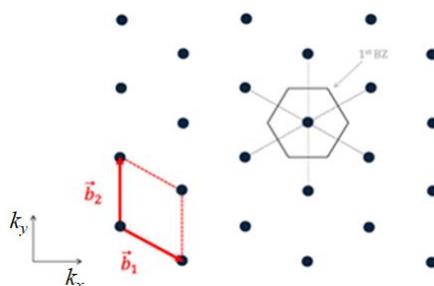


Рисунок 3 – Обратная решетка графена

В трехмерном пространстве обратная решетка представляет собой гексагональную решетку бесконечно длинных проводов (см. рисунок 4), поскольку вектор  $\vec{b}_3$ , перпендикулярный плоскости XY обратно пропорционален межплоскостному расстоянию C, которое для однослойного графена принимается стремящимся к нулю.

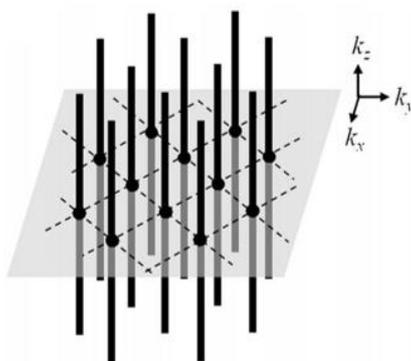


Рисунок 4 – Обратная решетка графена в трехмерном пространстве

Метод RHEED реализуется следующим образом. В установку, состоящую из электронной пушки (источника электронов с заданной энергией), держателя образца и детектора (см. рисунок 5) помещается образец на держатель. Далее под скользящим углом направляется электронный луч, в результате взаимодействия которого с образцом на детектор приходят дифрагированные лучи отраженных электронов.

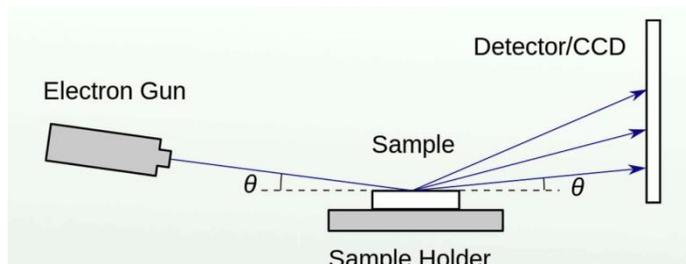


Рисунок 5 – Упрощенная схема установки RHEED

Согласно [2] условием дифракции является нахождение точек (проводов в трехмерном случае) обратного пространства на поверхности (внутри) сферы Эвальда (см. рисунок 6). При выполнении этих условий на детекторе будут наблюдаться полосы.

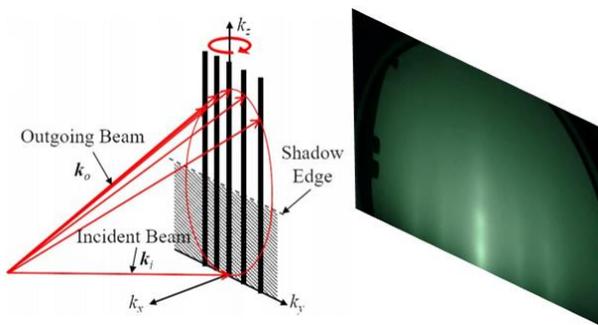


Рисунок 6 – Графическое представление условия дифракции

Дифракционная картина, представленная на рисунке 1, не является статичной и является функцией азимутального угла  $\varphi$  - угла поворота образца вокруг оси, перпендикулярной плоскости образца.

Авторами работы [3] был предложен метод анализа дифракционных данных, при котором строится зависимость интенсивности дифракции (яркости флуоресцентного экрана вдоль выделенной толстой пунктирной линии, см. рисунок 7) от азимутального угла.

Данный метод получил название азимутальной дифракции быстрых отраженных электронов (АДБОЭ, ARHEED). На рисунке 8 представлен полученный мною в результате обработки RHEED-данных ARHEED-картина для графена, представляющая собой его обратное пространство (угол соответствует азимутальному углу поворота образца).

Согласно рисунку 8 исследуемый графен состоит из двух фракций кристаллитов, повернутых друг относительно друга на  $30^\circ$ . Данное утверждение согласуется с рентгеновскими данными для кристаллической структуры GaN/AlN, осажденной на таком графене.

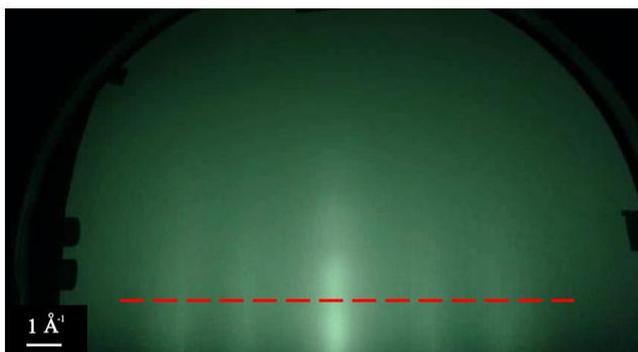


Рисунок 7 – Типичная дифрактограмма графена полученная методом RHEED с демонстрацией анализируемого профиля

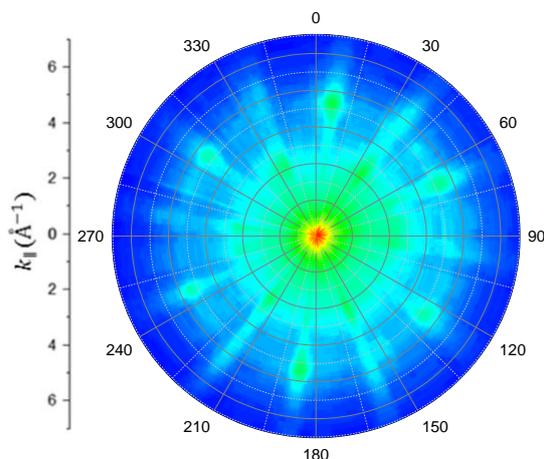


Рисунок 8 – Картина АДБОЭ буферного слоя графена

Для расчета и дальнейшего построения модели обратного пространства и моделирования дифрактограммы в разработанной мною программе вводятся исходные данные о структуре, которые изображены на рисунке 9.

Electron energy[eV * 10 <sup>3</sup> , 10-250]	<input type="text" value="60"/>
Circle radius[Å <sup>-1</sup> , 0.2-1]	<input type="text" value="0.7"/>
Lattice constant [Å, 1-4]	<input type="text" value="2.46"/>
Angle	<input type="text" value="0"/>

Рисунок 9 – Исходные данные, задаваемые для моделирования

Энергия электронов (в эВ) используется для расчета радиуса сферы Эвальда по формуле:

$$k = 0.512\sqrt{E} \text{ \AA}^{-1}, \text{ где} \quad (1)$$

$E$  – энергия электронов, выраженная в эВ

Трансляционные вектора обратной решетки ( $\vec{b}$ ) выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_1 &= \frac{2\pi}{a} \left( \frac{1}{\sqrt{3}}, -1, 0 \right) & |\mathbf{b}_1| &= \frac{2\pi}{a} \frac{2}{\sqrt{3}} \\ \mathbf{b}_2 &= \frac{2\pi}{a} \left( \frac{1}{\sqrt{3}}, 1, 0 \right) & |\mathbf{b}_2| &= \frac{2\pi}{a} \frac{2}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_1 &= a \left( \sqrt{3}/2, -1/2, 0 \right) & |\mathbf{a}_1| &= a = 2.46 \text{ \AA} \\ \mathbf{a}_2 &= a \left( \sqrt{3}/2, 1/2, 0 \right) & |\mathbf{a}_2| &= a = 2.46 \text{ \AA} \end{aligned} \quad (3)$$

Радиус “кружков” задается для учета чувствительности прибора и конечности кристалла, из-за чего точка решетка Бравэ в обратном пространстве имеет конечные размеры.

С помощью рассчитанных данных, задаваемых для анализа определенных состояний кристаллической решетки графена, комплекс программы создает обратную решетку с дальнейшим математическим расчетом параметров, необходимых для построения дифрактограммы.

Работу данного этапа программы можно разделить на несколько этапов:

1. Построение осей по  $x$  (используется как приближение сферы Эвальда ввиду ее больших размеров по сравнению с изучаемой областью) и  $y$ .
2. Построение сферы Эвальда с упрощением до модели “круга Эвальда”.
3. Построение гексагональной обратной решетки графена.
4. Расчет соприкосновения “кружков” со сферой Эвальда. Включает окрашивание их контуров в красный цвет, их “пустое” заполнение и подчеркивание точек пересечения для более точной настройки программы.
5. Передача данных, полученных при этапе 4 в код программы, создающий дифрактограмму для данной обратной решетки и угла.

Результат выполнения данной части программы изображен на рисунке 10.

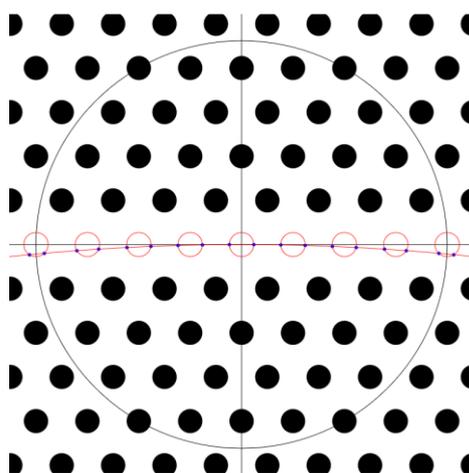


Рисунок 10 – Область обратной решетки, построенная программой

### 2.3 Получение данных моделирования для дальнейшей обработки

После получения данных пересечения “кружков” со сферой Эвальда вычисляются трансляционные вектора для построения дифрактограммы (рисунок 11), которые затем вносятся в массив, содержащий данные данной дифрактограммы для конкретного угла. Данный массив затем преобразуется в строку для внесения в массив для полного вращения решетки с индексом угла, на котором он был получен.

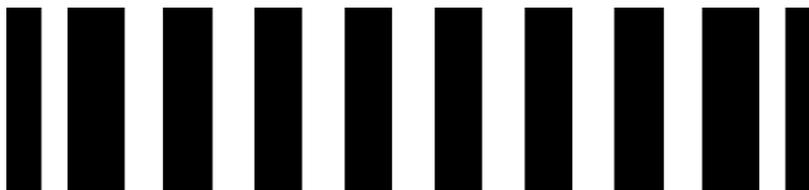


Рисунок 11 – Дифрактограмма смоделированной обратной решетки графена

Для получения данных, рассчитанных в результате моделирования, используются три функции, позволяющие записать в файл необходимые данные:

– Функция “rolling out” используется для вращения решетки и заполнения массива данных при вращении решетки на 360 градусов.

– Функция “data for single angle” используется для получения данных для одного угла, она создает файл в формате txt, содержащий вводимые данные и строку с данными дифрактограммы для определенного угла.

– Функция “data for the whole circle” используется для получения данных для полного оборота решетки после заполнения массива данных первой функцией, а также вводимых данных. Пример полученных данных изображен на рисунке 12.

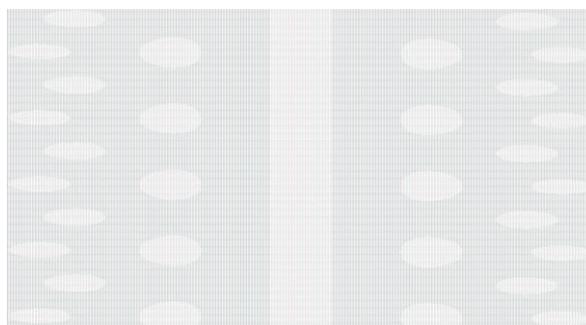


Рисунок 12 – Пример полученного массива с дифрактограммами при вращении на 360 градусов

Дальнейший анализ и обработка данных, полученных в результате данного моделирования, проводится с помощью программного комплекса Origin.

Результаты данной работы:

- разработан алгоритм симуляции дифракционных картин БОЭ на 2D-структурах Бравэ;
- построены картины БОЭ для разных размеров кристаллита и энергий электронов;

**Список использованных источников:**

1. Borisenko D. P. et al. Plasma assisted-MBE of GaN and AlN on graphene buffer layers // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2019. – Т. 58. – №. SC. – С. SC1046.
2. Xiang Y. et al. Reflection high-energy electron diffraction measurements of reciprocal space structure of 2D materials // *Nanotechnology*. – 2016. – Т. 27. – №. 48. – С. 485703.
3. Lu Z. et al. Revealing the crystalline integrity of wafer-scale graphene on SiO<sub>2</sub>/Si: an azimuthal RHEED approach // *ACS applied materials & interfaces*. – 2017. – Т. 9. – №. 27. – С. 23081-23091.
4. Murdock A. T. et al. Controlling the orientation, edge geometry, and thickness of chemical vapor deposition graphene // *ACS nano*. – 2013. – Т. 7. – №. 2. – С. 1351-1359.

## ДИСПЕРСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СИСТЕМЕ «МЕТАЛЛ – ЖИДКОСТЬ – МЕТАЛЛ»

Лещинская А.В.<sup>1</sup>, студент гр. 740301

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Петрович В.А. – канд. физ.-мат. наук

В работе представлены результаты исследования свойств деионизованной воды, спиртов и водно – спиртовых растворов, которые подвергаются воздействию электрического слоя, образующегося на границе раздела фаз «металл – жидкость». Определены особенности строения исследуемых жидкостей. Рассчитаны диэлектрические проницаемости воды и спиртов.

При производстве полупроводниковых приборов и ИМС широко используются различные технологические операции, связанные с использованием деионизованной воды, и различных промышленные жидкостей, а также растворов на основе деионизованной воды. В связи с этим, а также в связи с разработкой новых технологических операций в области микро- и нанoeлектроники, становится весьма актуальной задача изучения свойств технологических жидкостей, но и их изменение при внесении различных примесей.

Целью моей работы является изучение свойств деионизованной воды и ряда спиртов: метилового (МС), этилового (ЭС) и изопропилового (ИПС). Высокая «отмывающая» способность воды, а также высокая ее способность как растворителя, являются следствием двух аспектов:

- дипольный характер молекулярного строения воды;
- высокая ее диэлектрическая проницаемость.

Спирты можно рассматривать как производные воды ( $\text{H-O-H}$ ), в которых один атом водорода замещен на органическую функциональную группу:  $\text{R-O-H}$ .

Особенности спиртов, так же и для воды, объясняются наличием прочной межмолекулярной водородной связи; этим же объясняется хорошая растворимость низших спиртов в воде. При таком растворении образуются межмолекулярные водородные связи между молекулами спирта и воды. Пространственная структура образования водородных связей между водой и спиртами представлена на рисунке 1.

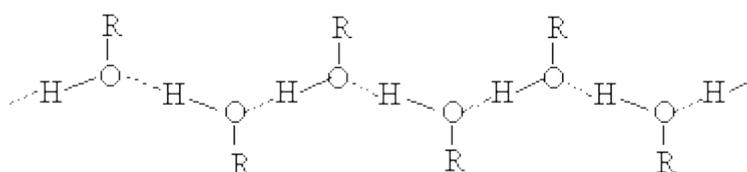


Рисунок 1 – Пространственная структура образования водородной связи между водой и спиртом

При проведении исследований использовались и водно – спиртовые растворы в различных концентрациях.

Вместе с тем, следует иметь ввиду следующее обстоятельство [1]. На границе раздела металл-раствор или полупроводник-раствор формируется двойной электрический слой (ДЭС). Этот слой со стороны раствора часто называют слоем Гуи-Гельмгольца. Для количественного определения величины электрического заряда в двойном электрическом слое используют дзета-потенциал, который отличен от потенциала адсорбционного и от потенциала поверхностного слоев. Данный слой характеризуется наличием электрического поля с напряженностью многие сотни и тысячи вольт/см. Направление электрического поля и его величина определяются гальвани – потенциалом, а именно его величиной и знаком. Имеет место и разницы значений энергии Ферми на электроде и RedOx-энергии в растворе. Также на величину электрического поля будет оказывать влияние материал электродов и состав, исследуемого раствора.

Характерные особенности строения ДЭС приводят к изменению структуры жидкости, которая используется в технологических операциях. Данное явление происходит за счет влияния электрического поля ДЭС и приводят к изменению, прежде всего, вязкости воды/спирта, а также величины диэлектрической проницаемости, электропроводности и иных физических и физико-химических свойств раствора.

При выполнении экспериментальной части использовалась деионизованная вода, объемом 3 мл, произведенная на ОАО «Интеграл», г. Минск. Спирты были взяты в НИЛ 4.3 В. П. Бондаренко. Исследования производились при нормальных условиях измерительным прибором - регистратор иммитанса E7-25 (производство ОАО «МНИПИ» г. Минска) на диапазоне частот от 25 Гц до 1 МГц. Основным иммитансным параметром, несущим максимальное количество информации о свойствах изучаемых объектов, является тангенс угла потерь ( $\text{tg}\delta$ ), который является наиболее чувствительным к структуре и свойствам различных сред. Более того, численные значения  $\text{tg}\delta$  не зависят от геометрических размеров и конструкции датчика, находящегося в растворе [2].

По этой причине предполагалось и было обнаружено, что деионизованная вода так же, как и спирты, в упомянутом диапазоне частот обладает ярковыраженной экстремальной зависимостью  $\text{tg}\delta$  от частоты  $f$  (рисунок 2). Для спиртов зависимость  $\text{tg}\delta$  от частоты  $f$  приведены на рисунках 3, 4, 5.

Для обеспечения формирования ДЭС, а также электрического поля были предложены датчики двух конструкций:

1. Расположенные параллельно друг другу пластинчатые электроды как одинаковой, так и разной площади, представляющие собой датчики конденсаторного типа. Расстояние между пластинами регулировалось путем установки между ними дистанционных диэлектрических шайб в пределах 0,1-10 мм.

2. Спиралевидный электрод, внутри которого размещался второй штыревой электрод.

С нашей точки зрения данные конструкции датчиков являются наиболее удачными прежде всего из-за простоты технологии изготовления с использованием широкодоступных элементов: цилиндрических проволок как покрытых, так и не покрытых изоляцией. Преимуществом датчиков конструкции №1 является то, что линии электрического поля направлены параллельно друг другу и при удачном выборе расстояния между пластинами и площади электродов позволяет исследователю избавиться от перехода численных значений (например,  $R_S$  и  $R_P$ ) к определению удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости. В качестве металла электродов датчика мы использовали медь, никель, цинк, нержавеющей сталь, платину. В материалах данной работы мы представили результаты регистрации  $\text{tg}\delta$  только для датчика, изготовленного из платины. Эти данные, по нашему мнению, представляют предмет отдельного рассмотрения.

В качестве датчика для определения  $\text{tg}\delta$  деионизованной воды использовался датчик второй конструкции, электроды которого были изолированы от непосредственного контакта с водой слоем диэлектрика. Частным случаем таких датчиков могут быть медные спирали или штыри, изготовленные на основе провода марки ПЭВ-2. Металлические части данного датчика изолированы от прямого контакта с водой слоем эмали – винифлекс (или поливинилацеталь). Лак был нанесен заводом производителем моточных проводов. По этой причине, использованные нами датчики, давали возможность наблюдать только за объемными свойствами воды.

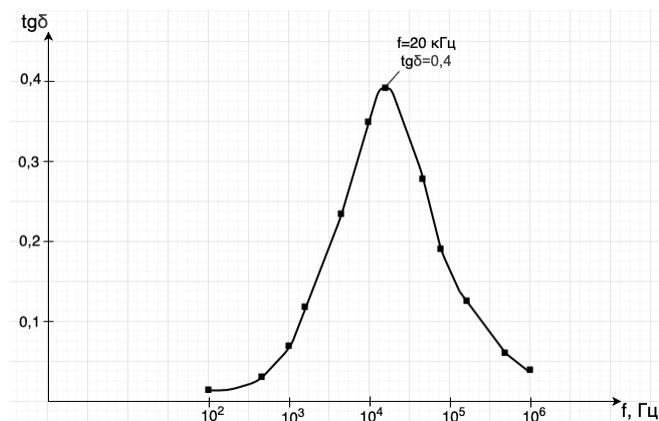


Рисунок 2 – Экспериментальная зависимость  $\text{tg}\delta$  деионизованной воды от частоты

В ходе исследования проводились измерения некоторых характеристик для следующих спиртов: метилового (МС), этилового (ЭС) и изопропилового (ИПС) – которые смешивались с деионизованной водой в различных концентрациях. Результаты приведены в виде графиков зависимости тангенса диэлектрических потерь от частоты, где прослеживаются изменения их свойств в зависимости от концентрации веществ в водно-спиртовом растворе.

При этом было установлено, что при изменении концентрации спирта в водно – спиртовом растворе сдвигаются значения резонансных частот и, соответственно, изменяется значения тангенса диэлектрических потерь. Например, в растворе МС/ $\text{H}_2\text{O}$  значение резонансной частоты уменьшается со снижением концентрации спирта в растворе, также и реагирует значение  $\text{tg}\delta$  - уменьшается. При уменьшении концентрации ЭС в водно-спиртовом растворе наблюдается уменьшение тангенса в резонансной точке, которая остается относительно постоянной. Если рассматривать раствор ИПС/ $\text{H}_2\text{O}$ , то там наблюдается следующее: при увеличении процента воды в данном водно – спиртовом растворе резонансная частота возрастает от 2,442Гц до 19,306Гц. При соотношении  $\text{H}_2\text{O}$ /ИПС 1:1 резонансная частота составляет 16кГц, а значения  $\text{tg}\delta$  в данной точка наименьшее. Зависимость изменения частоты нелинейная.

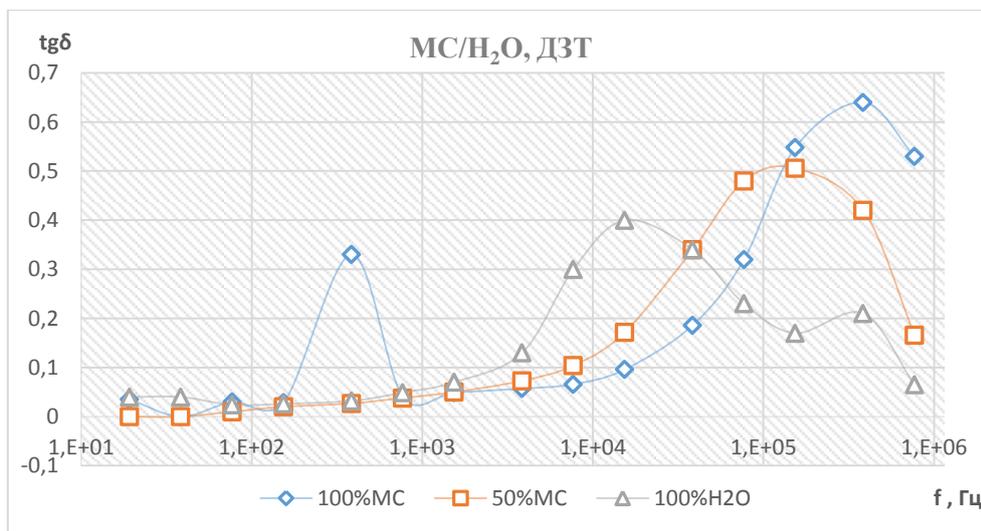


Рисунок 3 – Зависимость тангенса диэлектрических потерь МС от частоты

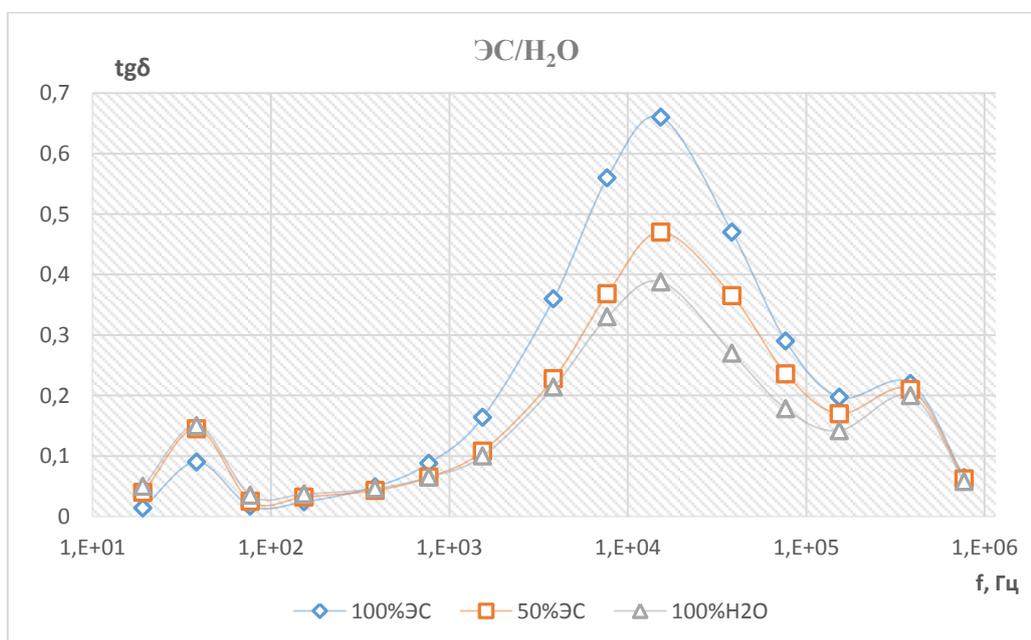


Рисунок 4 – Зависимость тангенса диэлектрических потерь ЭС от частоты

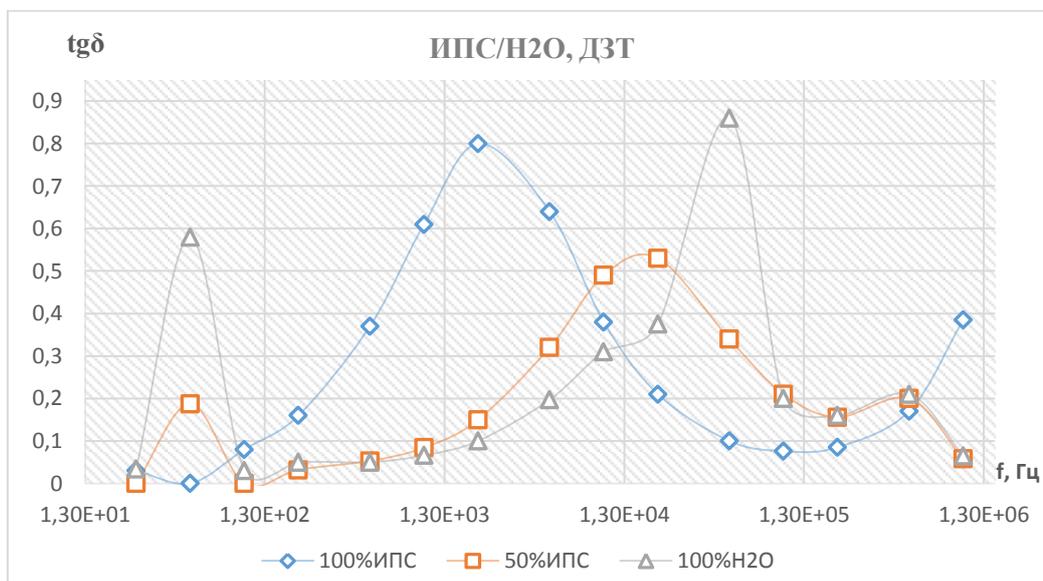


Рисунок 5 – Зависимость тангенса диэлектрических потерь ИПС от частоты

В соответствии с моделью релаксационных потерь (моделью Дебая) такое поведение  $\text{tg}\delta$  описывается уравнением (1):

$$\text{tg}\delta = \frac{\omega\tau(\varepsilon_c - \varepsilon_x)}{\varepsilon_c + \varepsilon_x(\omega\tau)^2} \quad (1)$$

Максимальное значение  $\text{tg}\delta$  определяется условием (2):

$$\omega\tau = \sqrt{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_x}} \quad (2)$$

В данных уравнениях  $\omega=2\pi f$ , где  $f$  – частота в Гц,  $\tau$  – время релаксации наблюдаемого процесса,  $\varepsilon_c$  – стационарное значение диэлектрической проницаемости (для воды находится в районе  $80\pm 2$  единиц, для МС –  $32,70\pm 2$ , для ЭС –  $24,55\pm 2$ , для ИПС –  $19,41\pm 2$ ),  $\varepsilon_x$  – диэлектрическая проницаемость при частоте намного большей, чем частота, отвечающая максимальному значению  $\text{tg}\delta$ .

Решая систему уравнений (1) и (2), мы получили соотношение (3):

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_x} = (1 + 2\text{tg}^2\delta) - 2\text{tg}\delta \sqrt{1 + \text{tg}^2\delta} \quad (3)$$

Данные соотношения позволяют рассчитать диэлектрические проницаемости рассмотренный нами жидкостей/растворов. Исходя из полученных данных были получены значения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Значения полученных диэлектрических проницаемостей исследуемых веществ

Вещество	Вода	МС	ЭС	ИПС
$\varepsilon_x$	93	36,04	26,55	20

Из полученных результатов можно заметить, как изменяется диэлектрическая проницаемость жидкости, которая вызвана заменой одного атома водорода в молекуле воды на органическую функциональную группу R в химической формуле R–O–H. В публикации [3] было показано, что для гомологического ряда N-спиртов в диапазоне частот не свыше 1МГц зависимость  $\text{tg}\delta$  имеет экстремум. Авторы данной работы справедливо отмечают, что в этом же районе частот значение диэлектрической проницаемости спиртов уменьшается.

Можно сделать некоторые выводы:

- особые свойства деионизованной воды могут быть использованы как диагностический инструмент при разработке и контроле технологических процессов в микро- и нанoeлектронике.
- особенности строения представленных водно – спиртовых растворов свидетельствуют об изменении их свойств.
- на основе полученных значений  $\text{tg}\delta$  и соответствующих этим значениям частот можно получить реальные значения диэлектрической проницаемости жидкости.

#### Список использованных источников:

1. Цивадзе А.Ю. (ред.) Структурная самоорганизация в растворах и на границе раздела фаз. Монография. - Москва, ЛКИ, 2008. - 544 с.
2. S. A. Volchek, V. A. Petrovich, S. V. Granko, V. Yu. Serenkov and V.A. Yakovtseva Bond Energy in Nanostructured Water —World scientific publishing company, 2019
3. ФКС XIII: Материалы конференции — Гродно: ГрГУ, 2015, стр 294.
4. Клеман М. Основы физики частично упорядоченных сред: жидкие кристаллы, коллоиды, фрактальные структуры, полимеры и биологические объекты / М.Клеман, О. Д. Лаврентович; пер. с англ. под ред. С. А. Пикина, В.Е. Дмитриенко. - М: Физматлит, 2007
5. Журнал №3 «Наонатехнологии: разработка, применение XXI век» — Москва, 2019.стр 5-13
6. Я.Ю. Ахадов Диэлектрические свойства чистых жидкостей, 1972

Лещинская Ангелина Викторовна, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь angelina260194@gmail.com

Руководитель: Петрович Владимир Алексеевич – доцент, канд. физ.-мат. наук, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, (почта)

УДК 621.793; 533.9.03

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ОКСИДА КРЕМНИЯ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Занько А.И. аспирант 3-го курса, Леонович Н.В. аспирант 1-го курса

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Котов Д.А. – канд. техн. наук

**Аннотация.** Проводилось плазмохимическое осаждение оксида кремния с использованием плазмы Ar+TEOS/Ar при атмосферном давлении. Стабилизация на воздухе параметров полученных пленок занимает порядка 15 дней, при этом наблюдается повышение показателя преломления с 1,4-1,45 до стехиометрического оксида кремния 1,46-1,47.

**Ключевые слова.** Оксид кремния, ПХО, атмосферное давление, показатель преломления.

В настоящее время активно развиваются технологические процессы низкотемпературного осаждения оксида кремния в качестве защитных, оптических и диэлектрических свойств в различных отраслях промышленности. Наиболее часто используется метод плазмохимического осаждения из газовой фазы (ПХО), с помощью которого получают высококачественные пленки, которые активно применяются в микроэлектронике, оптике и оптоэлектронике. Из-за высоких требований к вакуумной камере, газораспределению, источникам плазмы и ее согласования, а также необходимости осаждения тонких пленок на большие площади метод ПХО как правило является дорогостоящим техпроцессом. Для обработки подложек большой площади, а также рулонной обработки возникает большой интерес к ПХО при атмосферном давлении, из-за своей возможности гибкого масштабирования больших областей плазмообразования и осаждения при низких температурах.

Для плазмохимического осаждения оксида кремния использовалась экспериментальная разрядная система факельного типа, которая из себя представляла кварцевую трубку с внутренним диаметром 4 мм и системой внешних электродов. В качестве прекурсора использовался тетраэтоксисилан (TEOS), пары теоса переносились прокачкой аргоном. Осаждение проводилось на кремниевые подложки при мощности разряда 22 Вт, общем расходе аргона 720 л/ч и варьировании смеси Ar+TEOS/Ar длительностью 2 минуты. Диаметр область осаждения составлял 8-12 мм равномерностью  $\pm 5\%$ . Контроль толщины и показателя преломления пленки проводился на эллипсометре HORIBA UVISEL 2 после осаждения и через 15 дней после осаждения. Полученные зависимости толщины и показателя преломления оксида кремния представлены на рисунке 1. В ходе экспериментальных исследований было обнаружено уменьшение толщины и увеличение показателя преломления со временем до значений 1,46-1,47 стехиометрического оксида кремния, что говорит об получении изначально оксида кремния с высокой пористостью, которая исчезает посредством окисления на воздухе, дальнейшие изменения свойств пленок со временем не обнаружено.

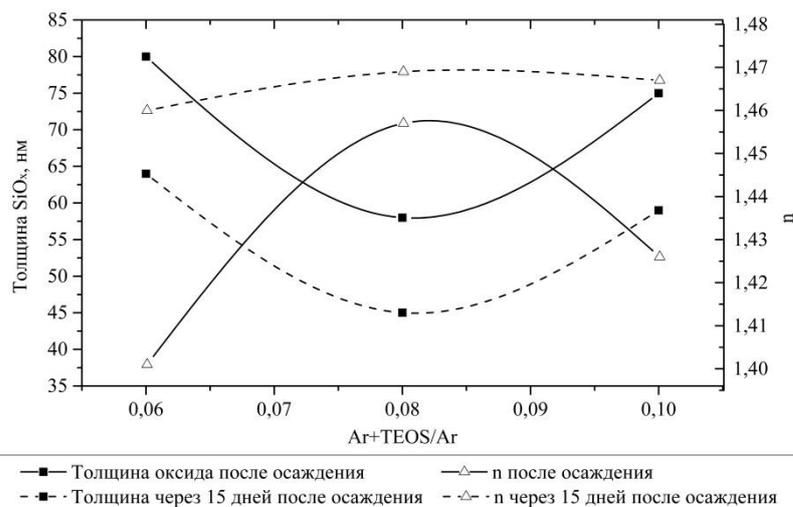


Рисунок 1 – Зависимости толщины и показателя преломления оксида кремния от соотношения смеси газов Ar+TEOS/Ar при длительности осаждения 2 минуты

### Список использованных источников:

1. Kakiuchi, H. Low refractive index silicon oxide coatings at room temperature using atmospheric-pressure very high-frequency plasma / H. Kakiuchi □, H. Ohmi, Y. Yamaguchi, K. Nakamura, K. Yasutake // *Thin Solid Films* 519 (2010) 235–239.

## ОЦЕНКА ПРОФИЛЯ ВЫРАБОТКИ МИШЕНИ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Шекелевский В.В., Бездников М.С.

Котов Д.А. – канд. техн. наук, доцент

В работе представлена методика оценки геометрии профиля зоны эрозии мишени исходя из определения пространственного распределения электронов над поверхностью мишени методом Монте-Карло частиц.

Современная промышленность в производстве изделий микро-, нано- и оптоэлектроники при нанесении тонкопленочных покрытий чаще всего использует магнетронное распыление. Из-за распространенности этого метода в настоящее время является актуальной разработка методик определения равномерности формируемого покрытия, для которых необходимо знать геометрические параметры зоны распыления.

Магнетронное распылительное устройство состоит из электрической, магнитной, охлаждающей, газораспределительной систем. Система электродов нужна для создания разности потенциалов, магнитная – для создания магнитной ловушки, охлаждающая – для предотвращения перегрева магнитной системы и других элементов конструкции, газораспределительная – для подачи рабочего вещества в разрядной зоне.

Локализация плазмы у поверхности мишени с помощью магнитной ловушки зависит от конфигурации магнитного поля системы магнитов [1]. Для определения профиля зоны эрозии мишени необходимо знать профиль распределения плотности ионного тока, который зависит от конфигурации магнитного и электрического полей и давления в камере. Профиль зоны эрозии можно рассчитать по формуле

$$h(r_i, t) = t \cdot g_i(r_i) = t \cdot \frac{\langle Y_i \rangle j_i(r_i) A_i}{e N_A \rho_i} \quad (1)$$

где  $\langle Y_i \rangle$  – средняя по энергетическому спектру безразмерная величина коэффициента распыления материала мишени (эффективный коэффициент распыления) на радиусе  $r$ ,  $j_i(r)$  – плотность ионного тока над мишенью на радиусе  $r$ ,  $A/\text{см}^2$ ,  $A_i$  – атомная масса распыляемого материала,  $\text{г/моль}$ ,  $\rho_i$  – плотность материала,  $\text{г/см}^3$  [2].

Ключевым этапом при расчете профиля зоны эрозии мишени является нахождение профиля распределения плотности ионного тока, который можно оценить исходя из пространственного распределения электронов над поверхностью мишени методом Монте-Карло. Для этого необходимо решить уравнение движения электрона в магнитном и электрическом полях по следующей формуле

$$m \cdot \vec{a} = q(\vec{v} \times \vec{B}) + q \cdot \vec{E} \quad (2)$$

где  $m$  – масса частицы,  $\text{кг}$ ,  $a$  – ускорение,  $\text{м/с}^2$ ,  $q$  – заряд,  $\text{Кл}$ ,  $v$  – скорость,  $\text{м/с}$ ,  $B$  – индукция магнитного поля,  $\text{Тл}$ ,  $E$  – напряженность электрического поля,  $\text{В/м}$ .

Это уравнение является дифференциальным уравнением второго порядка, для решения которого в декартовых координатах необходимо разбить на систему из трех уравнений для нахождения проекции вектора скорости на каждую из осей

Для примера на рисунке 1 показана траектория движения электронов в магнитной ловушке планарного магнетрона, рассчитанная с помощью языка программирования Python 3.8 с использованием библиотек SciPy, Matplotlib, Magpylib, Numpy. Расчеты проводятся для электронов, равномерно распределенных над поверхностью мишени и со случайными начальными скоростями, лежащими в интервале от 16 эВ до 300 эВ, что обуславливается необходимостью наличия электронов с энергией выше энергии ионизации аргона. Верхняя граница обуславливается тем, что электроны с высокой энергией не задерживаются в магнитной ловушке и оказывают слабое влияние на процессы ионизации.

Для определения распределения электронов в области над поверхностью мишени для каждого момента времени область расчета разбивалась на объемы одинакового размера, в которых велся подсчет электронов, входящих в него. Далее бралось сечение, проходящее

через ось магнитной системы, и электроны, входящие в объемы, пересекающие плоскость сечения, суммировались вдоль и поперек поверхности мишени.

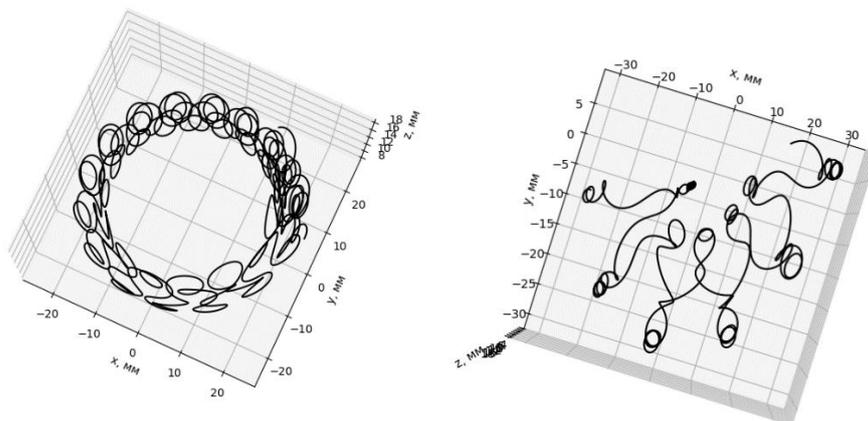


Рисунок 1 – Примеры траектории движения электрона в магнитной ловушке планарного магнетрона диаметром 80 мм для разных начальных координат

Примеры расчета распределения электронов в плоскостях, проходящих через ось z и ось x, показаны на рисунке 3.5 и рисунке 2.

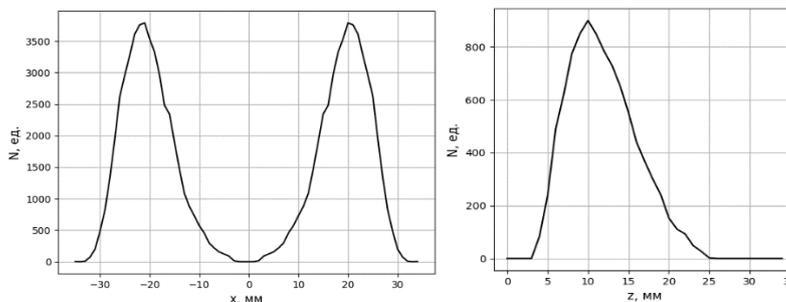


Рисунок 2 – Рассчитанный профиль концентрации электронов при суммировании вдоль z и x соответственно

Результат вычисления дает выраженные максимумы и минимумы, наблюдающиеся экспериментально. После определенного количества рассчитанных траекторий картина распределения перестает изменяться, что говорит о нецелесообразности дальнейших расчетов.

Следует заметить, что рассчитанный профиль описывает лишь качественное, а не количественное распределение, которое зависит от числа тестовых частиц, количество которых в проводимых расчетах было от 12000 до 100000.

Для определения плотности ионного тока над поверхностью мишени используется аппроксимация полученного ранее профиля распределения электронов. В нашем случае кривая распределения плотности тока разряда аппроксимировалась с использованием гауссового распределения. При данном методе моделирования профиль распределения плотности ионного тока в зоне разряда задается аналитически с помощью формулы

$$j(r_i) = \frac{I_{dc}}{\pi(R_{max}^2 - R_{min}^2)} \cdot \frac{f(r_i)}{\int_0^{\infty} f(r_i) dr_i} \quad (3)$$

где  $R_{min}$  – минимальный зоны эрозии мишени, м,  $R_{max}$  – максимальный радиус зоны эрозии мишени, м,

$f(r_i)$  – функция распределения, полученная путем аппроксимирования расчетного профиля концентрации электронов.

В нашем случае используется модуль библиотеки SciPy для аппроксимации точечных кривых, полученных при расчете профиля распределения электронов, заданной функцией.

Таким образом приведен метод расчета профиля зоны эрозии мишени исходя из пространственного распределения электронов над поверхностью мишени, рассчитываемого методом Monte-Carlo.

Список использованных источников:

1. Данилин, Б.С. Магнетронные распылительные системы / Б.С. Данилин, В.К. Сырчин – М.: Радио и связь, 1982. - 72с.
2. Голосов, Д.А., Мельников, С.Н., Кундас С.П., Достанко А.П. // Проблемы физики, математики и техники. – Т. 2. – 3. – 2010. – С. 62-67.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРТИН ДИФРАКЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ 2D СТРУКТУР

Богомазов Н.С.<sup>1</sup>, студент гр.740301

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Комиссаров И.В. – канд. физ.-мат. наук

В работе представлен алгоритм симуляции дифракционных картин быстрых отраженных электронов посредством языка программирования JS, а также получение данных для дальнейшей обработки и их анализа.

Одним из перспективных направлений для приложений графена является использование его в качестве буферного слоя на аморфных подложках для эпитаксиального роста пленок широкозонных нитридных полупроводников. В связи с этим становится актуальной проблема контроля качества кристалличности буферного слоя графена, как задающего качество эпитаксиальной пленки осаждаемой на нем.

Целью моей работы является разработка алгоритма симуляции дифракционных картин быстрых отраженных электронов для двумерных структур, таких как графен. Симуляция учитывает переход в обратное пространство и входные параметры, такие как:

- энергия электронов источника;
- размер кристаллита;
- чувствительность прибора;
- угол поворота подложки.

На рисунке 1 представлен пример типичной дифракционной картины (дифрактограммы) исследуемого графена. Ниже описано теоретическое обоснование такого результата.



Рисунок 1 – Типичная дифрактограмма графена полученная методом RHEED

На рисунке 2 представлена прямая решетка с трансляционными векторами  $\vec{a}_1$  и  $\vec{a}_2$  для графена в двумерном пространстве. По формулам перехода к обратному пространству можно получить трансляционные вектора  $\vec{b}_1$  и  $\vec{b}_2$ , с использованием которых была построена двумерная обратная решетка графена (см. рисунок 3).

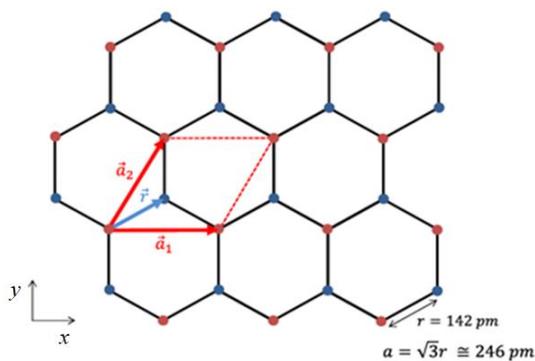


Рисунок 2 – Прямая решетка графена

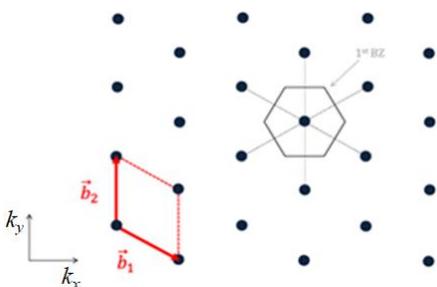


Рисунок 3 – Обратная решетка графена

Метод RHEED реализуется следующим образом. В установку, состоящую из электронной пушки (источника электронов с заданной энергией), держателя образца и детектора (см. рисунок 5) помещается образец на держатель. Далее под скользким углом направляется электронный луч, в результате взаимодействия которого с образцом на детектор приходят дифрагированные лучи отраженных электронов.

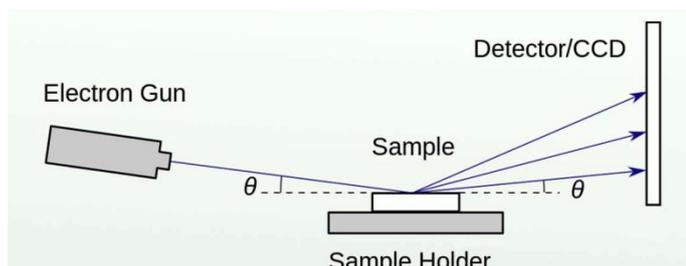


Рисунок 5 – Упрощенная схема установки RHEED

Согласно [2] условием дифракции является нахождение точек (проводов в трехмерном случае) обратного пространства на поверхности (внутри) сферы Эвальда. При выполнении этих условий на детекторе будут наблюдаться полосы.

Авторами работы [3] был предложен метод анализа дифракционных данных, при котором строится зависимость интенсивности дифракции (яркости флуоресцентного экрана вдоль выделенной толстой пунктирной линии, см. рисунок 1) от азимутального угла.

Данный метод получил название азимутальной дифракции быстрых отраженных электронов (АДБОЭ, ARHEED). На рисунке 6 представлен полученный мною в результате обработки RHEED-данных ARHEED-картина для графена, представляющая собой его обратное пространство (угол соответствует азимутальному углу поворота образца).

Согласно рисунку 6 исследуемый графен состоит из двух фракций кристаллитов, повернутых друг относительно друга на  $30^\circ$ .

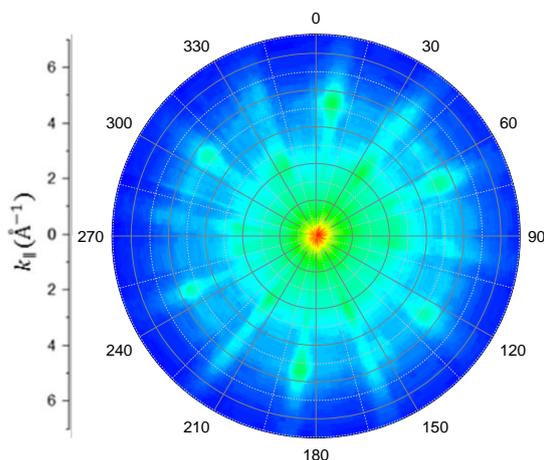


Рисунок 6 – Картина АДБОЭ буферного слоя графена

Для расчета и дальнейшего построения модели обратного пространства и моделирования дифрактограммы в разработанной мною программе вводятся исходные данные о структуре.

Энергия электронов (в эВ) используется для расчета радиуса сферы Эвальда по формуле:

$$k = 0.512\sqrt{E} \text{ \AA}^{-1}, \text{ где} \quad (1)$$

$E$  – энергия электронов, выраженная в эВ

Трансляционные вектора обратной решетки ( $\vec{b}$ ) выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_1 &= \frac{2\pi}{a} \left( \frac{1}{\sqrt{3}}, -1, 0 \right) & |\mathbf{b}_1| &= \frac{2\pi}{a} \frac{2}{\sqrt{3}} \\ \mathbf{b}_2 &= \frac{2\pi}{a} \left( \frac{1}{\sqrt{3}}, 1, 0 \right) & |\mathbf{b}_2| &= \frac{2\pi}{a} \frac{2}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_1 &= a \left( \sqrt{3}/2, -1/2, 0 \right) & |\mathbf{a}_1| &= a = 2.46 \text{ \AA} \\ \mathbf{a}_2 &= a \left( \sqrt{3}/2, 1/2, 0 \right) & |\mathbf{a}_2| &= a = 2.46 \text{ \AA} \end{aligned} \quad (3)$$

Радиус “кружков” задается для учета чувствительности прибора и конечности кристалла, из-за чего точка решетки Бравэ в обратном пространстве имеет конечные размеры.

С помощью рассчитанных данных, задаваемых для анализа определенных состояний кристаллической решетки графена, комплекс программы создает обратную решетку с дальнейшим математическим расчетом параметров, необходимых для построения дифрактограммы.

Работу данного этапа программы можно разделить на несколько этапов:

6. Построение осей по  $x$  (используется как приближение сферы Эвальда ввиду ее больших размеров по сравнению с изучаемой областью) и  $y$ .
7. Построение сферы Эвальда с упрощением до модели “круга Эвальда”.
8. Построение гексагональной обратной решетки графена.
9. Расчет соприкосновения “кружков” со сферой Эвальда. Включает окрашивание их контуров в красный цвет, их “пустое” заполнение и подчеркивание точек пересечения для более точной настройки программы.
10. Передача данных, полученных при этапе 4 в код программы, создающий дифрактограмму для данной обратной решетки и угла.

Результат выполнения данной части программы изображен на рисунке 7.

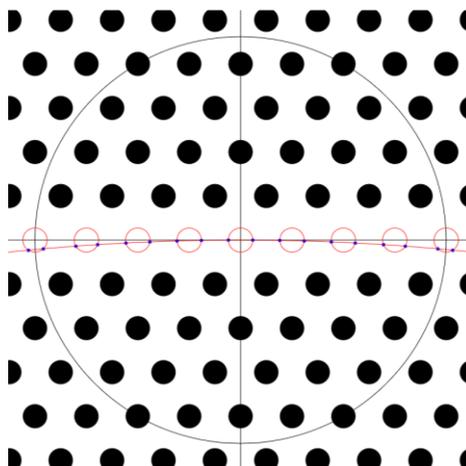


Рисунок 7 – Область обратной решетки, построенная программой

После получения данных пересечения “кружков” со сферой Эвальда вычисляются трансляционные вектора для построения дифрактограммы, которые затем вносятся в массив, содержащий данные данной дифрактограммы для конкретного угла.

Результаты данной работы:

- разработан алгоритм симуляции дифракционных картин БОЭ на 2D-структурах Бравэ;
- построены картины БОЭ для разных размеров кристаллита и энергий электронов;

**Список использованных источников:**

1. Borisenko D. P. et al. Plasma assisted-MBE of GaN and AlN on graphene buffer layers // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2019. – Т. 58. – №. SC. – С. SC1046.
2. Xiang Y. et al. Reflection high-energy electron diffraction measurements of reciprocal space structure of 2D materials // *Nanotechnology*. – 2016. – Т. 27. – №. 48. – С. 485703.
3. Lu Z. et al. Revealing the crystalline integrity of wafer-scale graphene on SiO<sub>2</sub>/Si: an azimuthal RHEED approach // *ACS applied materials & interfaces*. – 2017. – Т. 9. – №. 27. – С. 23081-23091.
4. Murdock A. T. et al. Controlling the orientation, edge geometry, and thickness of chemical vapor deposition graphene // *ACS nano*. – 2013. – Т. 7. – №. 2. – С. 1351-1359.

## ФОРМИРОВАНИЕ МАССИВОВ НАНОПРОВОДОВ ПЕРЕМЕННОЙ МОРФОЛОГИИ

Касаткин М. В., Федосенко В. С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Горох Г. Г. – канд. техн. наук

В ходе проведения исследования проверена возможность перехода между разными диаметрами пор анодного оксида алюминия (АОА) в процессе роста пленки АОА. Отработана методика создания перехода между разными диаметрами. Созданы и исследованы пленки АОА с переменным диаметром пор. Выявлен недостаток перехода с меньшего диаметра пор на больший и предположен механизм его работы.

Поскольку АОА имеют хорошо упорядоченную наноразмерную структуру и относительно просты в изготовлении, сфера их применения касается большого количества научных областей, таких как: шаблоны для изготовления нанотрубок или нанопроводов, мембранная фильтрация с последующей функционализацией, изготовление магнитных наноматериалов и оптических устройств и так далее.

Ввиду того, что на наноуровне действуют квантовые законы, любое изменение в составе или геометрии нанобъекта может привести к кардинальному изменению физических и химических свойств всей структуры. Это создает потребность в разработке более сложных структур (нанотрубки и нанопровода с разными диаметрами на разной высоте), для чего необходимо управлять геометрией нанопор АОА в процессе создания пленки оксида алюминия.

Пленки АОА с ветвящимися порами могут использоваться в качестве шаблонов для формирования углеродных нанотрубок [1] и металлических нанонитей с ветвлением.

В ходе проведения лабораторных опытов созданы образцы с большой и малой разницей между диаметрами пор. Так как СЭМ-изображения второго образца нерепрезентативные (на них почти

невозможно отличить слои с разным диаметром), рассмотрим образец с большой разницей между диаметрами пор, СЭМ-изображения которого представлены на рисунке 1.

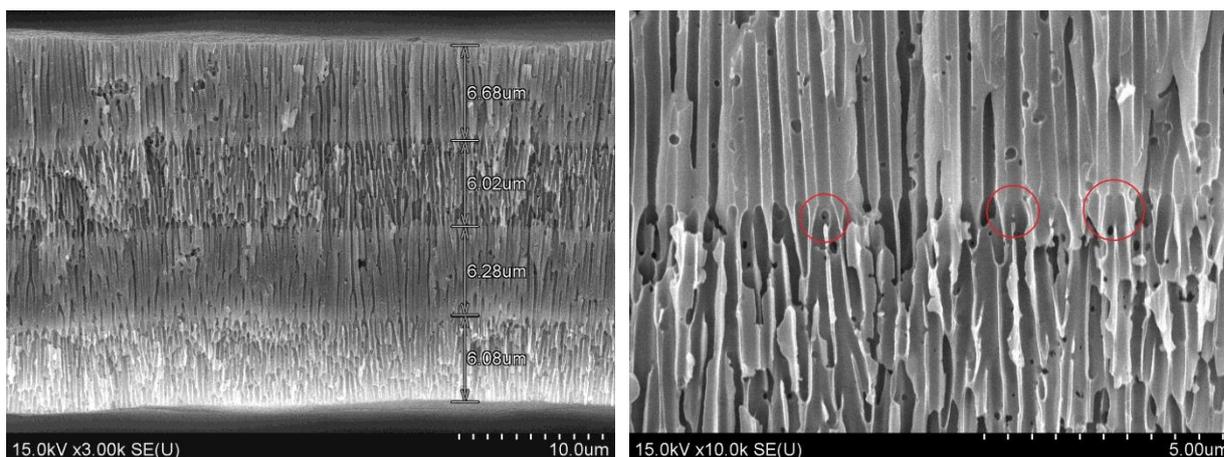


Рисунок 1 – СЭМ-изображения сечения АОА с переменным диаметром пор (слева) и перехода с большего диаметра на меньший (справа)

Анодировался образец алюминия невысокой чистоты (99,9 %). Создавались четыре слоя глубиной по 5 мкм без учета толщины переходов. Диаметр пор, как и другие геометрические параметры пор, определяется напряжением анодирования, которое и регулировалось в процессе выращивания слоя АОА. Так как один электролит подходит для анодирования в узком диапазоне напряжений, то для разных слоев изготавливались отдельные электролиты, которые заменялись на переходах между слоями. В результате реализованы переходы между 212 В (винная кислота 0,6 М) и 150 В (ортофосфорная кислота 1 %).

Кинетика анодирования образца представлена на рисунках 2 и 3. Первый и третий слой (212 В) формировались при постоянном токе ( $6 \text{ mA/cm}^2$ ), а второй и четвертый (150 В) при постоянном напряжении. Переходы с большего диаметра на меньший формировались следующим образом. Ток ограничивался до  $1 \text{ mA/cm}^2$ , вследствие чего напряжение плавно уменьшалось до стационарного значения для соответствующей плотности тока (винная кислота 0,6 М), примерно до 193 В (см. рисунок 3, первая половина первого и третьего переходов). После этого процесс останавливался, электролиты заменялись, ограничение по току снова выставлялось  $6 \text{ mA/cm}^2$ , процесс возобновлялся, но напряжение сначала поднималось до предыдущего уровня (193 В), а затем уменьшалось и устанавливалось на уровне стационарного напряжения второго электролита (ортофосфорная кислота 1 %), до 150 В. Переход с меньшего диаметра на больший формировался просто заменой второго электролита на первый в самом начале перехода. При этом стоял предел по току  $6 \text{ mA/cm}^2$ , но так как стационарное напряжение для первого электролита выше, то при постоянном токе напряжение постепенно само поднималось до своей нормы.

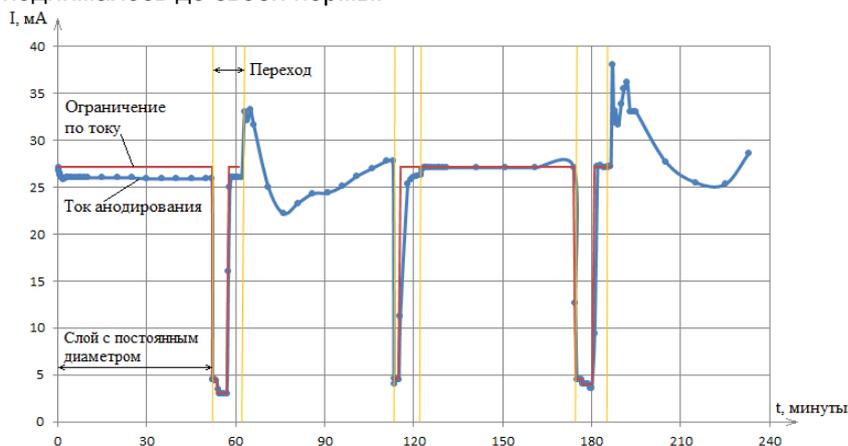


Рисунок 2 – Кинетика тока в процессе формирования АОА с разным диаметром пор

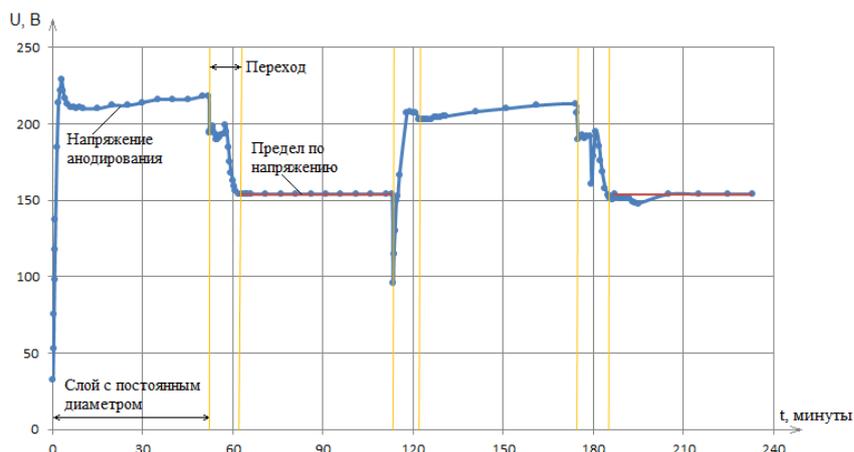


Рисунок 3 – Кинетика напряжения в процессе формирования АОА с разным диаметром пор

СЭМ-изображения образца показали, что при переходе с большего диаметра на меньший часть пор продолжает расти как и раньше, но сужаясь, а часть разветвляется (см. рисунок 1 (справа)). А при переходе с меньшего диаметра на больший часть пор продолжает расти, расширившись, а часть перестает расти (закупоривается) на произвольной глубине. Последний момент сильно вредит осаждению металлов в поры с разным диаметром [2], так как при осаждении поры должны быть открыты, чтобы с одной из сторон можно было сформировать контакт, к которому будут двигаться ионы осаждаемого материала, что обеспечивает высокое заполнение пор. Такое поведение пор можно объяснить тем, что между порами существует горизонтальная разность потенциалов, отталкивающая их друг от друга (которая и стремится распределить поры в равноудаленные шестигранники). При переходе на большее напряжение поры, которые раньше начали расширяться, своим горизонтальным полем препятствуют росту своих соседей, вследствие чего те со временем перестают расти. Возможно это и препятствует объединению пор, но эта гипотеза еще будет проверяться, когда эксперимент дойдет до стадии формирования массивов нанопроводов.

Данная работа выполнена в рамках гранта Министерства образования Республики Беларусь на 2021 год, утвержденного Министром образования 17 февраля 2021 года (ГБЦ № 21-3172М).

Авторы также выражают благодарность Д.В. Жигулину за проведение растровой электронной микроскопии образцов.

**Список использованных источников:**

1. Synthesis of multi branched carbon nanotubes in porous anodic aluminum oxide template / Y.C.Sui [et al.] // Carbon, 2001. – P. 1709–1715.
2. Understanding Pore Rearrangement during Mild to Hard Transition in Bilayered Porous Anodic Alumina Membranes / A. Santos // ACS Appl. Mater. Interfaces 2011. – P. 1925–1932.

УДК 537.523

**ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИАМИДА И ПОЛИКАРБОНАТА  
В ПЛАЗМЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ**

*Деревянко Э.Г., студент, Аксючиц А. В., аспирант, Запорожченко Ю. В., аспирант.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Котов Д.А. – канд. техн. наук*

**Аннотация.** В статье изложены результаты экспериментальных исследований угла смачивания поверхности полиамида 6 и поликарбоната в плазме атмосферного разряда. В качестве рабочего газа использовался аргон. Угол смачивания дистиллированной водой определялся методом лежащей капли. Описан ход проведения экспериментов. Представлены результаты обработки поверхности полимеров.

**Ключевые слова.** Угол смачиваемости, полимер, обработка, плазма диэлектрического барьерного разряда, атмосферное давление, метод лежащей капли

Полиамид 6 (ПА 6) и поликарбонат представляют собой довольно разные полимеры с точки зрения химического состава и механических свойств. Однако оба пластика являются широко используемыми конструкционными материалами благодаря сочетанию механических и химических свойств.

Полиамид 6 (капролон, ПА-6) – полимер, применяющийся в антифрикционных деталях и конструктивных элементах. Детали из полиамида 6 отлично выдерживают ударные нагрузки, долговечны, могут работать в узлах трения без смазки. Полиамид 6 является хорошим диэлектриком, по механической и тепловой стойкости превосходит изоляторы из полистирола, поливинилхлорида и т.д. Вот уже 30 лет полиамид 6 успешно находит применение в машиностроении, судостроении, энергетике, в химической, нефтяной и целлюлозно-бумажной промышленности.

Поликарбонат же бывает двух видов – сотовый и монолитный. В данной статье речь идет о монолитном поликарбонате. За счет своих свойств – жесткости и прочности - данный вид используют в строительстве зданий и сооружений. Пищевая промышленность также не может обойтись без поликарбоната. Из него делают пищевые пленки, одноразовую небыющую посуду и столовые приборы различных цветов. Также стоит отметить, что данный пластик используют для производства сосудов и упаковок для хранения медицинских препаратов, зубных протезов и деталей для медицинского оборудования.

Учитывая, что в большинстве случаев полимеры соединяются с другими конструктивными элементами с помощью специализированных клеев, адгезионные свойства также имеют большое значение. Адгезии способствуют такие факторы, как высокая поверхностная энергия, хорошая смачиваемость и большая площадь контактирующих поверхностей. Однако полимеры обычно обладают плохими поверхностными свойствами, включая низкую поверхностную энергию и низкую смачиваемость из-за недостатка полярных групп на поверхности. По этой причине были предприняты многочисленные попытки улучшить поверхностные свойства пластмасс.

Одним из методов улучшения поверхностных свойств является плазменная обработка. Плазменная обработка может проводиться в вакууме или при атмосферном давлении. Работа при атмосферном давлении дает несколько преимуществ: простое оборудование, так как не требуется вакуумных камер, загрузочных камер для образцов и вакуумных насосов; обработку можно объединить с другими этапами процесса, такими как нанесение клея или распыление порошка; при обработке в атмосферном давлении поверхность материала не подвергается воздействию вторичных явлений, включая ионную бомбардировку, электронное воздействие и т.д.

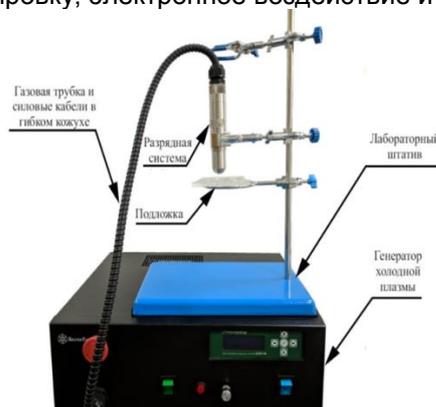


Рисунок 1 – Внешний вид экспериментального комплекса

Комплекс, используемый для плазменной обработки полимеров, включает разрядную систему коаксиального типа, к которой через гибкий кабель-канал подводится плазмообразующее вещество и питающее напряжение для генерации диэлектрического барьерного разряда, лабораторный штатив с обрабатываемой подложкой для размещения поверхности обрабатываемого материала.

Для исследования изменения гидрофильных свойства полиамида 6 от времени обработки в плазме атмосферного разряда использовались детали корпусов сельскохозяйственных приборов. Образцы отмывали в изопропиловом спирте и сушили перед обработкой. На рисунке 2 и 3 показан процесс обработки поверхности полиамида 6

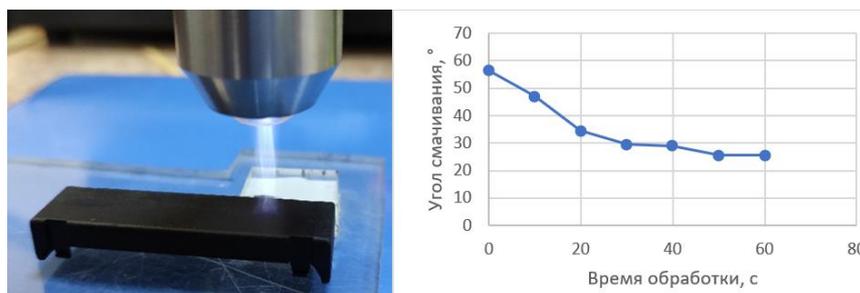


Рисунок 2 – Обработка поверхности полиамида 6 (1) в плазме атмосферного разряда и зависимость угла смачивания поверхности от времени обработки

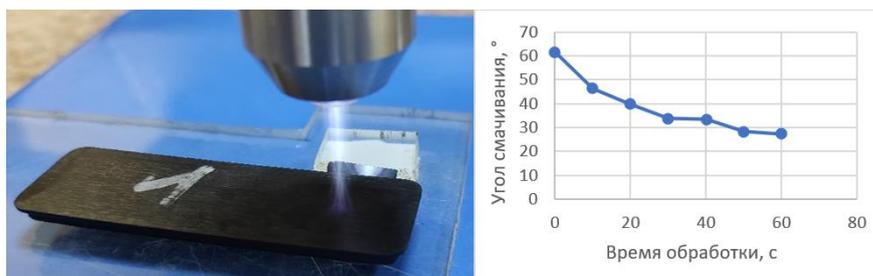


Рисунок 3 – Обработка поверхности полиамида 6 (2) в плазме атмосферного разряда и зависимость угла смачивания поверхности от времени обработки

На полученных графиках видно, что за 60 секунд обработки угол смачивания у образцов уменьшился в два раза. Такое изменение объясняется процессами очистки и активации поверхности. Понижение угла смачивания после обработки поверхности полиамидов в плазме атмосферного разряда говорит о том, что данный метод может эффективно использоваться для модификации поверхности и данного рода полимеров.

Проводилось исследование влияния плазменного факела на смачиваемость поверхности поликарбоната от времени обработки (рисунок 4). В качестве исследуемых образцов использовались пластины корпусов деталей медицинского оборудования. Пластины отмывали в изопропиловом спирте и сушили перед обработкой. Обработка проводилась на гладких участках поверхности детали.

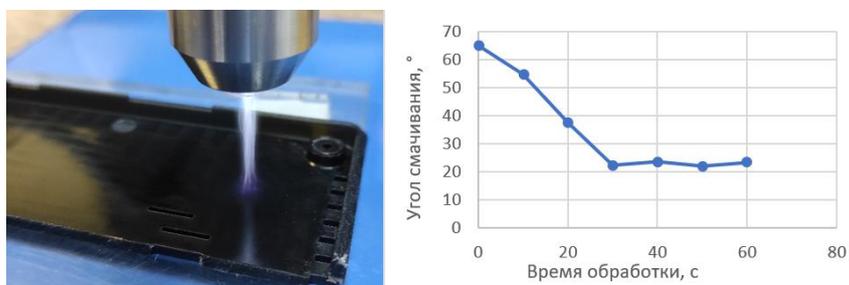


Рисунок 4 – Обработка поверхности поликарбоната в плазме атмосферного разряда и зависимость угла смачивания поверхности полимера от времени обработки

Данные, полученные на основе проведенных экспериментальных исследований, позволяют сделать вывод, что плазма атмосферного разряда подходит для очистки и активации поверхности различного рода пластмасс. Это универсальный и эффективный инструмент для увеличения адгезии поверхности полимеров. Наиболее эффективное время обработки составляет: у полиамида 6 за 40 секунд угол смачивания уменьшился в 2 раза, у поликарбоната за 30 секунд угол смачивания уменьшился в 3 раз. Таким образом, обработка в плазме диэлектрического барьерного разряда способствует эффективному управлению гидрофильными и гидрофобными свойствами поверхности полимеров.

**Список использованных источников:**

1. Thomas M., Mittal K. L. (ed.). *Atmospheric pressure plasma treatment of polymers: Relevance to adhesion.* – John Wiley & Sons, 2013.

## ТЕПЛОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ БОЛОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

Садченко В.В., Чан В.Ч.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

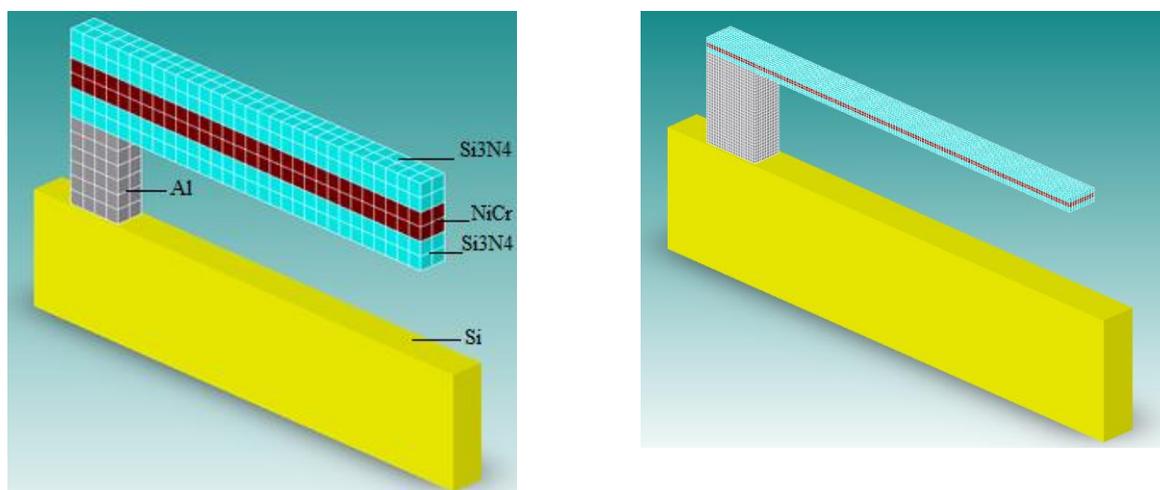
Ловшенко И.Ю. – ст. преподаватель каф. МНЭ,  
зав. НИЛ 4.4 НИЧ БГУИР

Болометры – это миниатюрные резистивные детекторы температуры или термисторы, а также другие типы температурочувствительных резисторов, используемых в основном для измерения среднеквадратичных значений интенсивности электромагнитных излучений в широком спектральном диапазоне от среднего ИК до микроволнового диапазона [1]. Области применения таких детекторов включают определение ИК-температуры, построение тепловых образов, измерение локальных полей при высокой мощности излучений, тестирование СВЧ-устройств [2]. Принцип действия всех болометров основан на фундаментальном физическом законе, связывающем величину поглощенного электромагнитного сигнала с рассеиваемой мощностью [3].

Моделирование и создание таких устройств может представлять значительные трудности, так как необходимо решение целого комплекса задач математической физики (деформации твердого тела, теплопроводности, диффузии, электростатики, гидродинамики и других). Кроме того, моделирование микроустройств требует учета факторов, обычно не принимаемых во внимание при анализе устройств на макроуровне: сопротивления воздуха (или среды, в которой будет использовано устройство) и силы тяжести в электростатических устройствах, поверхностного натяжения жидкости в жидкостных устройствах.

Для описания поведения микромеханических устройств применяются различные подходы: аналитические, с помощью поведенческих моделей (*ROM*), с использованием дискретной модели на основе конечных элементов, сочетание нескольких способов описания.

Универсальные пакеты конечного элементного анализа, такие, как ANSYS, Algor, Comsol Multiphysics (Femlab) и другие, обеспечивают решение описанных выше задач.[4] Одним из таких инструментов является программный продукт CoventorWare и его различные модули. Используя программный модуль CoventorWare можно создать описание приборной структуры, задать параметры исходных материалов и выполнить моделирование эксплуатационных характеристик болометра. Одним из важных параметров для болометра, является устойчивость к механическим напряжениям (внутренним и внешним). Для оценки механической прочности конструктивного решения болометра проведено термомеханическое моделирование консольных балок (рисунок 1), выполняющих роль подвеса активной области. Балка состоит из трёх слоёв: нижний  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (слой 1), NiCr (слой 2), верхний  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (слой 3). Ширина балки равна 1 мкм. Балка опирается на алюминиевую опору квадратного сечения (1x1 мкм) высотой 3 мкм. Длина фрагмента без опоры – 15 мкм. Для исследования выбраны две конструкции, отличающиеся друг от друга толщиной слоёв: для структуры №1 толщины слоёв 1-3 равны 1 мкм, для структуры №2 – 0,15 мкм.



а) б)  
Рисунок 1 – Структуры №1 (а) и №2 (б) консольной балки

Технологический маршрут формирования конструкции балок условно разделён на 7 операций: задание подложки (кремний, толщина 4 мкм); осаждение алюминиевой пленки (толщина 3 мкм); осаждение и травление в соответствии с топологией тонких пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (слои 1 и 3) и NiCr (слой 1); подтрав алюминиевой пленки.

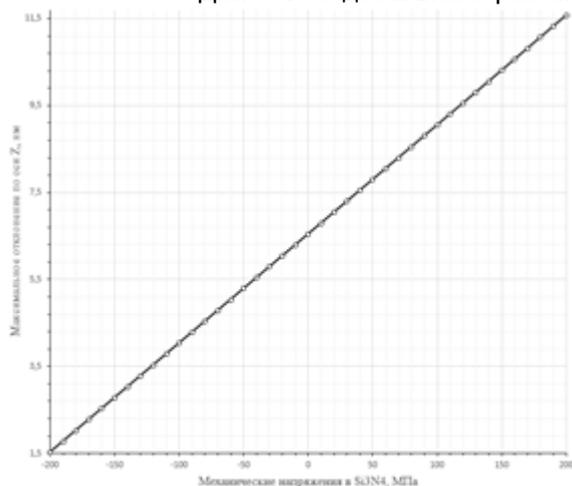
Деформация возникает, когда механическая жесткость устройства уравнивается разрешением остаточных напряжений при изготовлении, а также повышенными температурами, из-за которых происходит неравномерное изменение геометрических размеров слоев из-за разных коэффициентов теплового расширения материалов. Деформации консольных балок вдоль оси OZ (плоскостность) оценена с помощью термомеханического анализа в установившемся режиме, при котором конструкции нагреваются до температуры  $T = 300$  К. Повышение температуры из-за излучения, Джоулева нагрева, проводимости и т. д. не учитывается. В качестве термоинтерфейса (точка с фиксированной температурой  $T = 300$  К) определена алюминиевая опора. Внутренние механические напряжения материалов составляют для  $\text{Si}_3\text{N}_4$  200 МПа, для NiCr 1 ГПа. Результаты моделирования для удобства сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты термомеханического анализа

Параметр	Конструкция №1		Конструкция №2		теплов ой поток 2 нВт/ мкм <sup>2</sup> и T = 37 3К
	без учета внутрен них напряж ений	с учетом внутрен них напряж ений	без учета внутрен них напряж ений	с учетом внутрен них напряж ений	
Деформа ции вдоль оси OZ (прогиб) в области свободног о конца консольно й балки, нм	-8,75	5,0	-5,3	11,6	-3,3
Деформа ции вдоль оси OZ (прогиб) в области закреплен ного конца консольно й балки, нм	4,3	-3,1	0,5	-0,4	1,6

По результатам моделирования установлено, что наибольшее отклонение по оси Z (почти 12 нм) соответствует конструкции №2. Показано, что происходит изменение направления изгиба с учетом внутренних механических напряжений и без него.

Для более детального рассмотрения и выявления зависимости величины отклонения



по оси Z от внутренних механических напряжений в материалах было проведено моделирование Конструкции №2 с изменением внутреннего механического напряжения в слоях  $\text{Si}_3\text{N}_4$  от -200 до 200 Мпа с шагом в 10 Мпа (для NiCr механическое напряжение составляет 1 ГПа). Результаты моделирования представлены на рисунке 2.

Наблюдается линейная зависимость величины отклонения консольной балки по оси Z от внутренних механических напряжений в слоях  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и NiCr. совпадают с теоретическими данными

Рисунок 2 - Зависимость величины отклонения по оси Z от механических напряжений в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и NiCr

Расчеты с использованием программного продукта CoventorWare предлагают возможность выполнения мультифизического (междисциплинарного) анализа компонентов микроэлектроники с учетом факторов, оказывающих существенное влияние на работу микроустройств, позволяющего повысить точность результатов вычислений, сократить сроки и избежать ошибок при проектировании устройств.

**Список использованных источников:**

1. Unil Perera, A.G. *Bolometers* / A.G. Unil Perera – Rijeka : Intech Design Team, 2012. – 196 p.
2. Hengstberger, F. *Absolute Radiometry: Electrical Calibrated Thermal Detectors of Optical Radiation* / F. Hengstberger – Boston : Academic Press, Inc., 1989. – 266 p.
3. Родионов, Ю.А. *Микроэлектронные датчики и сенсорные устройства : учеб. пособие* / Ю.А. Родионов – М. : БГУИР, 2019. – 300 с.
4. Коловский, А.А. *Компьютерное моделирование компонентов МЭМС: научная статья* / А.А. Коловский, А.А. Левицкий, П.С. Маринушкин // *Проблемы разработки перспективных микро- и нанозлектронных систем.* – 2008. – №1. – 398–401 с.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ ОАМР2

Галкин Я.Д.<sup>1,2</sup>, Чеховский В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт ядерных проблем” Белорусского государственного университета  
г. Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>ОАО “Минский научно-исследовательский приборостроительный институт”  
г. Минск, Республика Беларусь

Дворников О.В.<sup>3</sup> – д.т.н., доцент

Исследованы параметры радиационно-стойкого операционного усилителя ОАmp2, созданного на базовом матричном кристалле МН2ХА030. Рассмотрены схемотехнические особенности, уменьшающие радиационную деградацию параметров разработанного операционного усилителя, методика и результаты измерений основных параметров в нормальных условиях.

Электрическая схема операционного усилителя (ОУ) ОАmp2 приведена на рисунке 1, на которой требуемые сопротивления резисторов получены за счет последовательного и параллельного соединения резисторов базового матричного кристалла, а узлы с одинаковым наименованием соединены между собой. Особенности функционирования и выбора режима работы ОУ подробно рассмотрены в [1].

Для уменьшения радиационного изменения параметров в разработанном ОУ использованы следующие технические решения:

- входной ток ОУ по выводу *NI* является разностью базовых токов *n-p-n* Q25 и *p-n-p* Q23 транзисторов (соответственно Q39 и Q37 для *IN*), работающих при одинаковом эмиттерном токе. При приблизительно равном радиационном спаде коэффициента усиления базового тока  $\beta$  транзисторов с разным типом проводимости, входной ток должен изменяться незначительно;

- коэффициент усиления напряжения  $K_V$  при отсутствии цепей отрицательной обратной связи (ОС) ОУ определяется передаточной проводимостью входного каскада и суммарным сопротивлением всех цепей, соединенных с высокоомными узлами (коллекторы Q33 и Q46) [1]. Следовательно, на радиационное уменьшение  $K_V$  будет преобладающе влиять входное сопротивление выходного каскада, а точнее, падение  $\beta$  Q53 и Q51 для выхода *Out1* (Q67 и Q69 для *Out2*), которое можно уменьшить выбором большой плотности эмиттерного тока этих транзисторов;

- усилитель ОАmp2 имеет два парафазных выходных каскада, что позволяет увеличить  $K_V$  и уменьшить влияние проникающей радиации на рабочий режим аналоговых устройств, соединенных с выходом ОУ, за счет съема сигнала между выходами *Out1*, *Out2*. Кроме того, в ОАmp2 введена отрицательная ОС по синфазному сигналу, устанавливающая равенство напряжений между выходом резистивного делителя R31, R32 и узлом FB. При соединении узла FB с шиной нулевого потенциала, такая ОС по синфазному сигналу уменьшает влияние радиационного изменения параметров интегральных элементов на напряжение смещения нуля  $V_{OFF}$ .

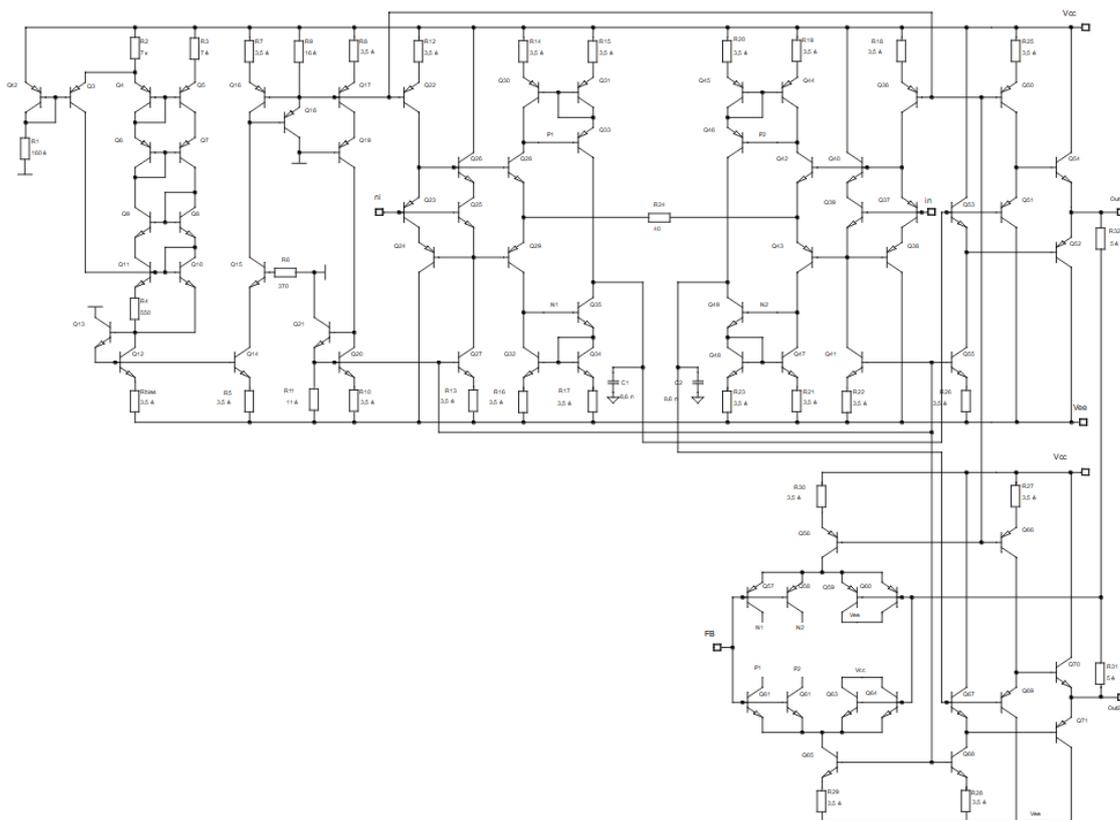


Рисунок 1 – Электрическая схема ОУ OАmp2

До начала радиационных испытаний были разработаны схемы включения OАmp2, позволяющие определить основные параметры (рисунки 2-4), и методика измерений, которые апробированы при проведении измерений OАmp2 в нормальных условиях.

Измерения OАmp2 проводились в контактирующем устройстве при включении ОУ с цепями отрицательной ОС, обеспечивающими усиление по напряжению от 10 до 400, без внешней коррекции амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), с использованием двухканального генератора сигналов произвольной формы и осциллографа фирмы Tektronix, щупа с входным сопротивлением 10 МОм и емкостью 6 пФ, мультиметра Agilent 34401A.

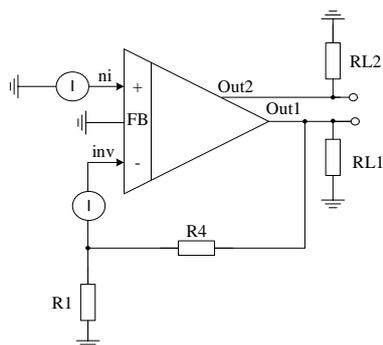


Рисунок 2 – Схема включения OАmp2 при измерении тока потребления и входных токов. I-АКИП-2101/2, R1 = 1,18 кОм, R4=10 кОм, RL1 и RL2 не подключены

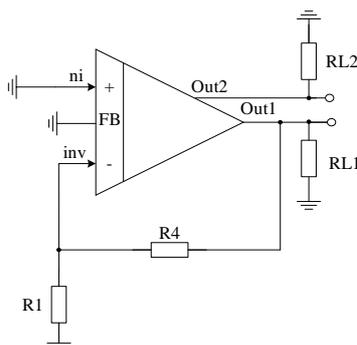


Рисунок 3 – Схема включения OАmp2 при определении напряжения смещения нуля.  $V_{OFF} = -V_{OUT1}/(R4/R1+1)$ , R1 = 83 Ом, R4=128 кОм, RL1 и RL2 не подключены

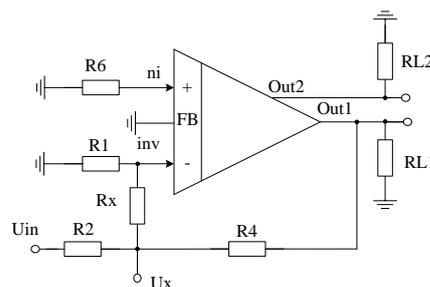


Рисунок 4 – Схема включения OАmp2 при определении коэффициента усиления напряжения.  $K_V = (R_x/R1) \cdot (V_{OUT1}/V_X)$ , R1=R6= 475 Ом, R2=R4=10 кОм, Rx=118 кОм, RL1 и RL2 не подключены,  $V_{IN} = 1$  В (p-p),  $f_{IN} = 100$  Гц

Всего было измерено 10 образцов. Количество годных ОУ по функционированию 9 из 10. Измерения показали, что токи потребления в диапазоне 2,58..2,74 мА, входные токи  $I_{INV} = 0,07..0,59$  мкА,  $I_{NI} = 0,01..0,51$ , коэффициент усиления  $K_V = 5900..6900$ , напряжение смещения нуля  $V_{OFF} = -0,35..0,47$  мВ, полоса пропускания более 200 кГц при  $K_V = 100$  (рисунок 5).

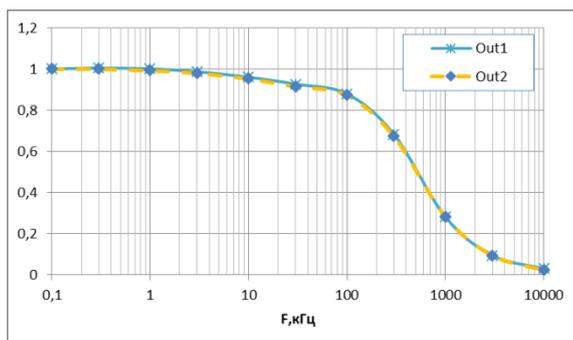


Рисунок 5 – Нормированная АЧХ. Схема включения – рисунок 4. Входной сигнал подан в узел  $V_{in1}$ .  $R1 = R2 = 1,18$  кОм,  $R4 = 118$  кОм,  $RL1$  и  $RL2$  не подключены. Уровни питания  $V_{CC}=+4,5$  В.  $V_{EE}=-4,5$  В.  $V_{IN} = 12$  мВ (p-p)

**Список использованных источников:**

1. O.V. Dvornikov, V.A. Tchekhovski, V.L. Dziatlau, N.N. Prokopenko. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors. Russian Microelectronics. – 2016. - Vol. 45, No. 1. - P. 54-62. DOI: 10.1134/S10 63739716010030

## УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОННЫХ ВОЛН В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ «ГРАФЕН/SiO<sub>2</sub>»

Гвоздовский Д.Ч.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Стемпицкий В.Р. – канд. техн. наук, доцент

Проведено квантово-механическое моделирование структурных и оптических свойств графена, диэлектрической подложки SiO<sub>2</sub> и гетероструктур на их основе. Расчеты проводились на основе теории функционала плотности DFT с использованием методов, включающих силы Ван-дер-Ваальса. Программный пакет VASP использовался в качестве среды моделирования. Отрицательные участки действительной части диэлектрической проницаемости для чистого графена наблюдаются на частотах от 4,05 до 5,28 эВ. Контакт графена с диэлектрической подложкой может привести к образованию двумерного электронного газа. Величина заряда, который возникает вследствие контакта, составляет 0,07 e/атом.

Основной идеей наноплазмоники является использование поверхностных плазмонных волн (ППВ), которые индуцируются возбужденными зарядами посредством оптического излучения. ППВ существуют на границе раздела диэлектрика и проводника. Данное физическое явление может применяться в качестве различных приложений: химические сенсоры, рамановская спектроскопия с поверхностным усилением (способной обнаруживать одиночную молекулу), оптимизация ячейки солнечного элемента для повышения КПД. Одна из наиболее привлекательных особенностей ППВ заключается в том, что они концентрируют и направляют электромагнитное излучение на субволновых масштабах.

Поверхностные плазмоны (ПП) представляют собой связанные колебания электромагнитного поля и электронов проводимости, распространяющиеся вдоль поверхности проводника. Их можно интерпретировать как электромагнитные волны, захваченные поверхностью металла вследствие взаимодействия со свободными электронами. В ходе этого взаимодействия электроны проводимости коллективно реагируют на электромагнитное воздействие, осциллируя в резонансе со световой волной.

Наиболее распространенными механизмами возбуждения плазмонных волн являются: ослабленное полное отражение, рассеяние на топологическом дефекте на поверхности проводника и брэгговское рассеяние с использованием дифракционных решеток или периодической гофрировки. В графене длина волны ППВ может быть примерно в 40 раз короче, чем длина волны падающего излучения в свободном пространстве. Также графен обладает сильным плазмонным откликом в ТГц диапазоне частот при комнатной температуре.

В [1-3] экспериментально и теоретически изучено распространение поверхностных плазмон-поляритонных волн (ПППВ) на границе раздела двух сред: графена и

диэлектрической подложки. ПППВ проявляют сильную волновую локализацию, умеренную потерю энергии, а их частота может изменяться посредством внешнего электромагнитного поля или химического легирования. В отличие от металлических сред, на границе которых распространение волн ППП происходит в диапазоне инфракрасного и оптического спектра, графен обеспечивает распространение волн в терагерцовом диапазоне. В [4] предложена конструкция плазмонной графеновой нанополоски. Показано, что габаритные размеры таких устройств могут измеряться в нанометрах, но при этом иметь диапазон резонансных частот в терагерцовом диапазоне. Таким образом, гетероструктура, которая состоит из графена и диэлектрической подложки может быть функциональной частью нанополоски, которая базируется на ПППВ, что позволяет при нанометровых геометрических размерах иметь терагерцовый диапазон рабочих частот.

Условием существования ППП на плоской границе двух сред является отрицательное значение диэлектрической или магнитной проницаемости [5]. Исследование возможности реализации в планарной периодической структуре на основе графеновых монослоев и диэлектрической подложки поверхностных волн сводится к поиску частотных областей, где действительная часть эффективной диэлектрической проницаемости принимает значения меньше нуля.

Моделирование структурных и электронных свойств наноразмерных объектов, в частности системы «графен/SiO<sub>2</sub>(0001)», является неотъемлемым инструментарием при оптимизации не только состава соединения, но и при получении оптимальных свойств материалов нанoeлектроники. Использование численного эксперимента позволяет удешевить, упростить и ускорить процесс поиска оптимального решения, а в некоторых случаях, дать объяснение возникающим низкоразмерным эффектам.

В качестве среды моделирования структурных и электронных свойств системы «графен/SiO<sub>2</sub>(0001)» использовался программный пакет VASP (Vienna Ab initio Simulation Package) [6], который предназначен для выполнения ab initio расчетов квантово-механическими методами [7]. Расчеты выполнялись на основании теории функционала плотности DFT (Density functional theory) [8].

Отклик материала на воздействие электрического поля световой волны полностью определяется его диэлектрической проницаемостью при этой частоте. Диэлектрическая проницаемость материала с любой конечной (не равной нулю) электрической проводимостью является комплексной величиной, то есть её можно записать как сумму действительной и мнимой частей. Для расчета обеих этих компонент для графена в настоящей работе учитываются разные поляризации электрического поля относительно оси *c* (которая перпендикулярна плоскости листа графена). Это среднее значение рассчитывается как для плоской поляризации света ( $E_{\perp c}$ ), так и для поляризации вне плоскости или параллельно оси *c* ( $E_{\parallel c}$ ).

На рисунке 1 представлены результаты моделирования оптических свойств, в частности диэлектрической проницаемости чистого графена. Чистый графен в частотном диапазоне от 4,05 эВ до 5,28 эВ имеет отрицательную диэлектрическую проницаемость в плоскости листа графена. При частотах более 6 эВ мнимая часть диэлектрической проницаемости устремляется к нулю, что говорит о значительных потерях в электропроводности.

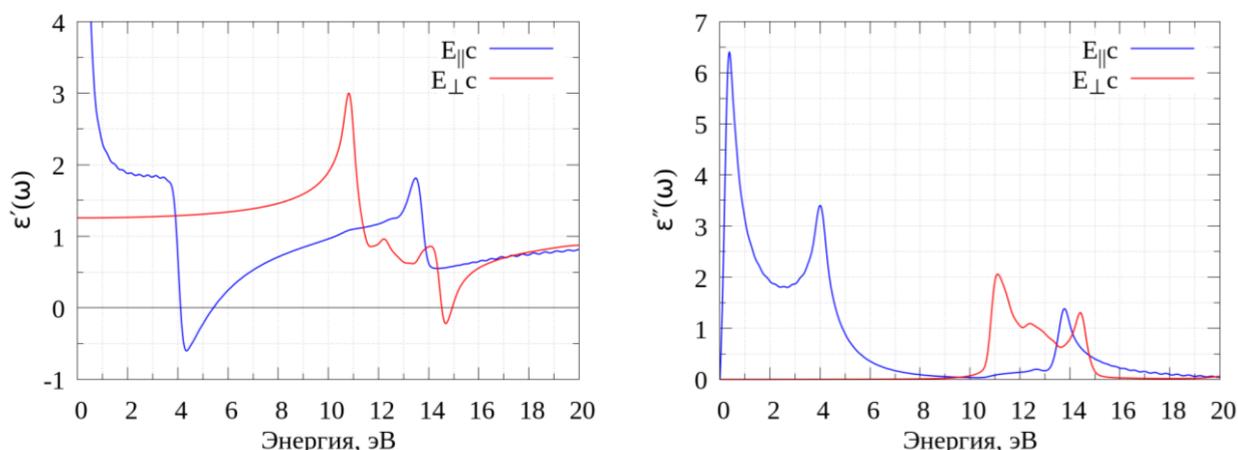


Рисунок 1 – Действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости графена

Результаты расчетов квантово-механического моделирования электронных и оптических свойств системы «графен/ $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>» позволил сделать выводы, что перспективной гетероструктурой для изучения ПППВ является графен, который расположен на поверхности

кварцевой подложки с оборванными связями кислорода  $O^{\text{unsat}}$ . При этом механизм абсорбции является физическим, что способствует сохранению графеном его электронных свойств. В частности энергетический спектр графена вблизи уровня Ферми и в интервале энергий от -1,3 до 0,7 эВ остается линейным. Расчёты оптических свойств выбранной гетероструктуры позволили установить по спектральной зависимости действительной части диэлектрической проницаемости, что система обладает несколькими участками в частотном спектре, где возможно формирование поверхностных плазмонных волн: 0,4-0,5 эВ (I), 1,25-1,5 эВ (II), 4,5-5,5 эВ (III). При этом, наиболее перспективным является частотный участок от 4,5 до 5,5 эВ, поскольку в этом случае графен обладает наибольшей проводимостью. Оценка зарядовой плотности позволила установить, что в структуре «графен/ $SiO_2$ » происходит перераспределение заряда и возможно формирование двумерного электронного газа. Величина заряда, который возникает вследствие контакта, составляет 0,07 е/атом. При этом основной заряд со стороны подложки локализован на атомах кислорода.

Таким образом, перераспределение зарядовой плотности вблизи границы раздела двух материалов (графена и кварца) можно отнести к одному из механизмов возникновения поверхностных плазмон-поляритонных волн.

**Список использованных источников:**

1. Dubinov A.A., Terahertz surface plasmons in optically pumped graphene structures / A.A. Dubinov, V.Y. Aleshkin, V. Mitin // *J. Physics: Condensed Matter*. – 2011. – V. 23 (14). – P. 145302.
2. Koppens F.H.L., Graphene plasmonics: A platform for strong light matter interactions / F.H.L. Koppens, D.E. Chang, F.J. Garcia de Abajo // *Nano Lett.* – 2011. – V. 11 (8). – Pp. 3370-3377.
3. Bludov Yu.V., Mechanism for graphene-based optoelectronic switches by tuning surface plasmon-polaritons in monolayer graphene / Yu.V. Bludov, M.I. Vasilevskiy, N.M.R. Peres // *Europhysics Letters Association*. – 2011. – V. 92 (6). – P. 152.
4. Jornet J.M., Graphene-based nano-antennas for electromagnetic nanocommunications in the terahertz band / J.M. Jornet, I.F. Akyildiz // *Proc. 4th European Conf. Antennas Propag. (EUCAP)*. – 2010.
5. И.Л. Шейнман // *Журнал технической физики : журнал*. – 2001. – № 71(5). – С. 28-34.
6. Kresse G., Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set / G. Kresse, J. Furthmüller // *Computational Materials Science*. – 1996. – V. 6(1). – P. 15-50.
7. Hafner J., The Vienna Ab-Initio Simulation Program VASP: An Efficient and Versatile Tool for Studying the Structural, Dynamic, and Electronic Properties of Materials / J. Hafner, G. Kresse // *Properties of Complex Inorganic Solids*. – 1997. – P. 69-82.
- Parr R. G., *Density-Functional Theory of Atoms and Molecules* / R.G. Parr, W. Yang // Oxford University Press. – 198

УДК 66.06

## ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОФОБНОГО ПОКРЫТИЯ НА СТЕКЛЕ.

Полуйко А.М.<sup>1</sup>, студент гр.743201, Жидкина Н.В.<sup>2</sup>, магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Котов Д.А. – канд. физ.-мат. Наук, доцент

**Аннотация.** В статье излагаются результаты аналитических и экспериментальных исследований технологии формирования гидрофобного покрытия на поверхности стекла. Выбран наиболее удобный метод формирования гидрофобных покрытий на поверхности стекла. В результате проверки гидрофобных свойств экспериментального покрытия было получено среднее значение краевого угла смачивания  $121,72^\circ$ .

**Ключевые слова.** Гидрофобные свойства, краевой угол смачивания, метод центрифугирования, темплатный метод, электрохимическое осаждение.

В настоящее время произошло быстрое развитие рынка мобильных телефонов, планшетов и других портативных электронных устройств, атрибутом которых является отображающий информацию сенсорный экран, используемый как универсальное устройство ввода-вывода, придает проблеме формирования защитных покрытий с гидрофобными свойствами статус критической.

Основными требованиями к покрытиям сенсорных экранов ввода-вывода информации являются максимальная износостойкость, гидро- и олеофобность, обеспечивающие защиту от

загрязнений и, в частности, препятствующие скоплению на экране кожного жира с отпечатков пальцев и упрощающие его удаление (так называемые *anti-fingerprint* свойства), а также высокая прозрачность в видимом диапазоне и отсутствие искажений сигнала со светодиодного дисплея.

Целью работы являлась разработка технологии формирования гидрофобных покрытий на поверхности стекла.

Гидрофобными считаются покрытия, угол смачивания которых водой превышает 90°. Высокогидрофобными считаются покрытия с краевыми углами смачивания водой свыше 120°. Сверхгидрофобными считаются покрытия, характеризующиеся высокими краевыми углами смачивания водой более 150°.

В настоящее время активно используют следующие основные методы создания развитого рельефа поверхности для получения высокогидрофобных покрытий:

- электрохимическое осаждение наночастиц и пленок с последующей обработкой гидрофобными материалами;
- применение темплатных методов для создания шероховатости с последующим удалением темплата и обработкой гидрофобными материалами;
- травление (химическое, реактивное ионное, плазмохимическое) поверхности материалов с последующей обработкой гидрофобными агентами;
- шлифовка поверхности материалов с последующей обработкой гидрофобными агентами;
- применение фотолитографических методов с последующей обработкой гидрофобными материалами;
- химическое осаждение из газовой фазы упорядоченных структур с последующей обработкой гидрофобными материалами;
- обработка поверхности диэлектрическим барьерным разрядом с последующим нанесением гидрофобных материалов.

Примером создания развитого рельефа поверхности для формирования гидрофобного покрытия методом электрохимического осаждения является никелирование с нестандартным электролитом, содержащим равномерно перемешанные частицы тефлона (политетрафторэтилен, *PTFE*). Такой процесс можно назвать гальванической тефлонизацией поверхности.

Для нанесения гидрофобных покрытий на поверхность стекла был использован метод центрифугирования. В методах центрифугирования капли гидрофобизирующего раствора (либо дисперсии) растекаются по поверхности на быстро вращающейся подложке.

Для получения однородного по толщине покрытия большое значение имеют частота вращения и вязкость раствора. Кроме того, немаловажную роль играет летучесть растворителя (дисперсионной среды), определяющая как равновесность структуры покрытия, так и его однородность по толщине и составу [1].

Методы центрифугирования являются оптимальным при получении покрытий на небольших подложках, так как обеспечивают минимальный расход пленкообразующего раствора и обеспечивают равномерную толщину покрытий [12].

Спреевое осаждение. Спреевое осаждение вкупе с центрифугированием обрабатываемой подложки представляет собой достаточно простой и удобный способ создания сверхгидрофобных покрытий.

Спреевым осаждением суспензии перфтороктаноата меди можно придать гидро- и олеофобные свойства практически любой поверхности. Добавка фторированных углеводородов приводит к формированию чрезвычайно стабильного к истиранию покрытия [2].

При спреевом осаждении фторированных кремнийорганических полимеров поверхность должна быть предварительно активирована плазмой либо химически (к примеру, стекло можно активировать раствором серной кислоты и перекиси водорода, увеличив тем самым поверхностную концентрацию Si-OH связей). После нанесения покрытия необходим отжиг подложек во влажной атмосфере [13].

Золь-гель метод. Центрифугирование золь прекурсоров гидрофобизирующих агентов на подложке позволяет придать ей после гелеобразования гидрофобные свойства.

Полимеризация алколюлятов металлов в водной либо органической среде приводит к формированию монолитного геля в результате самоорганизации и разрастания сети дискретных наночастиц.

Можно получать стойкое к истиранию защитное покрытие с гидрофобными свойствами из диоксида кремния в результате центрифугирования пленкообразующего раствора, приготовленного по золь-гель технологии путем гидролиза металлоорганических соединений кремния (тетраэтилортосиликата и метилтриэтоксисилана) в водно-спиртовой смеси.

Покрытый созданным золь-гель методом олигомерным нанокомпозитом из винилтриметоксисилана с концевыми фторалкильными группами и сегментами бифенилена полиметилметакрилат становится не только гидро- и олеофобным, но и приобретает свойство флуоресценции. Стекло, покрытое таким композитом, становится сверхгидро- и олеофобным.

Гидрофобные свойства покрытия тестировались по статическому краевому углу смачивания покрытия водой.

Для определения статического краевого угла смачивания покрытия водой на поверхность наносили каплю дистиллированной воды объемом порядка 2,5 мкл с помощью специального шприц-дозатора, изображенного на рисунке 1.



Рисунок 1 – Шприц-дозатор, формирующий капли объемом 2,5 мкл



Рисунок 1 – Измерение статического краевого угла смачивания в автоматическом режиме

В ходе работы были аналитически изучен метод центрифугирования для формирования гидрофобных покрытий на стекле. Из всего спектра методов выбран именно этот в силу экономичности и оптимальности для нанесения гидрофобных покрытий на небольшие подложки. В результате нескольких измерений было получено среднее значение краевого угла смачивания  $121,72^\circ$

**Список использованных источников:**

1. Бойнович, Л. Б. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение / Л. Б. Бойнович, А. М. Емельяненко // *Успехи химии*. – 2008. – Т. 77, №7. – С. 619–638.
2. Савич, В. А. Формирование защитных покрытий с гидрофобными свойствами / В. А. Савич, А. А. Ясюнас, Г. К. Жавнерко // *Физика конденсированного состояния : материалы XXII междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 17–18 апр. 2014 г.* / ГРГУ им. Я. Купалы [и др.]; редкол.: В. Г. Барсуков [и др.]. – Гродно : ГРГУ, 2014. – С. 178–181.
3. Quéré, D. *Surface chemistry: Fakir droplets* / David Quéré // *Nature Materials*. – 2002. – Vol. 1, №1. – P. 14–15.

УДК 537.523

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДНОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ НЕТЕРМИЧЕСКОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

*Аксюциц А.В., аспирант, Запорожченко Ю.В., аспирант, Логунов К.Т., студент*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Котов Д.А. – канд. техн. наук*

**Аннотация.** В статье излагаются результаты экспериментальных исследований параметров разрядной системы генерации нетермической неравновесной плазмы при атмосферном давлении. В качестве рабочего газа использовался аргон. Установлены зависимости длины факела и температуры образца, помещенного в плазменный поток от входного напряжения и от расхода газа. Установлено, что увеличение расхода рабочего газа с 85 до 375 л/ч приводит к снижению температуры нагрева обрабатываемой поверхности и увеличению длины плазменного факела на 1,6 см.

**Ключевые слова.** Плазма диэлектрического барьерного разряда, обработка, атмосферное давление, температура поверхности образца, режимы генерации.

В последнее время плазменные методы модификации поверхности (в том числе и её активация) привлекают к себе большой интерес. Технология плазменной обработки при атмосферном давлении позволяет достичь высокого уровня дезинфекции и обработки пищевых продуктов, медицинских инструментов, живой биологической ткани, может применяться при лечении различных видов кожных заболеваний и другое. Плазма является «холодной», так как при модификации температура плазмообразующего газа остается близкой к комнатной. Следовательно, плазма не повреждает поверхности, с которыми контактирует. Плазменная обработка является новой междисциплинарной областью исследования, включающей в себя физику, химию, биологию и медицину. Благодаря возможности управления параметрами при создании атмосферной плазмы, она имеет широкую область применения при малых затратах энергии и низкой себестоимостью обработки. [1]

В данной работе были проведены исследования по измерению температуры образцов, помещенных в плазменный поток и длины плазменного факела, а также разработаны и опробованы методики измерения данных параметров.

Для измерения температуры использовался термодетектор Bosch CIS C Professional с диапазоном измерения от – 40 до + 1000 градусов Цельсия. Измерение производилось до установления температуры на постоянном уровне.

С помощью измерительной шкалы определялась длина плазменной струи, так как она может дать понимание свойств разряда. Кроме того, длина плазменной струи помогает оптимизировать расход газа и энергетические затраты при технологической обработке образцов.

В ходе эксперимента было определено влияние изменения расхода газа и входного напряжения на длину факела плазменной струи и температуру обрабатываемой поверхности образцов.

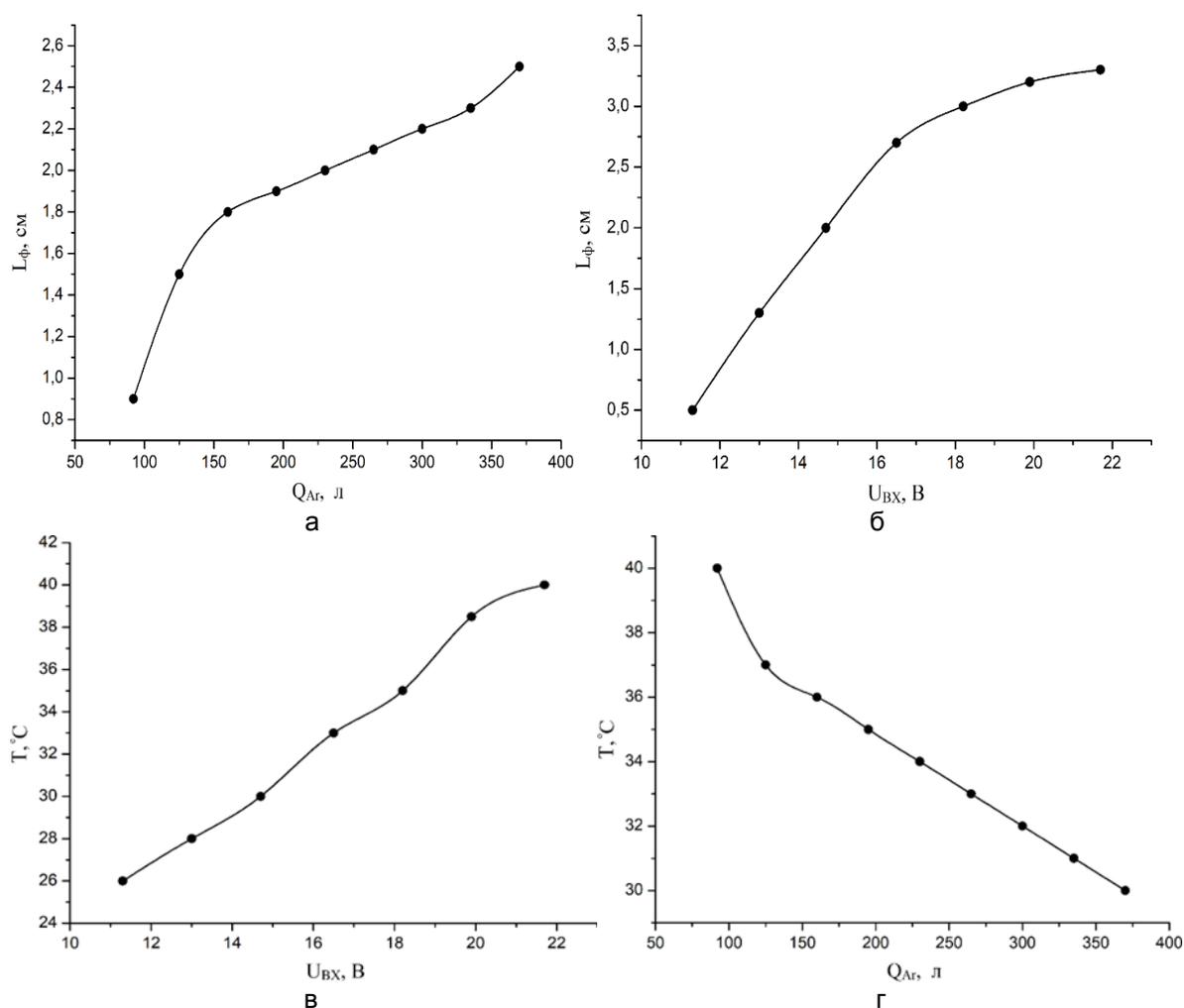


Рисунок 1 – Зависимости длины факела (а, б) и температуры обрабатываемой поверхности образцов (в, г) от входного напряжения (а, в) и от расхода газа (б, г)

При проведении экспериментального исследования (рисунок 1(а)) расход аргона  $Q_{Аг}$  изменялся в пределах от 85 до 380 л/ч. Как видно, после преодоления значения расхода газа в 160 л/ч, рост длины факела плазменной струи с дальнейшим увеличением объёма прокачиваемого газа несколько уменьшается, оставаясь, при это значительным. Рост длины факела при повышении расхода газа можно объяснить увеличением расстояния, которое проходит возбужденная частица за время её жизни.

На приведенном на рисунке 1(б) графике расход газа  $Q_{Аг}$  был зафиксирован на отметке 227 л/ч, а входное напряжение менялось в диапазоне от 11,3 до 21,7 В. Увеличение длины факела при увеличении входного напряжения на первичной обмотке высоковольтного трансформатора можно объяснить повышением степени ионизации аргона. Таким образом, при входных напряжениях свыше 14 В и потоке рабочего газа (аргона) возможно получить факел плазменной струи длиной более 2 см.

В случае с зависимостью температуры плазменной струи от входного напряжения на первичной обмотке высоковольтного трансформатора (рисунок 1(в)), можно наблюдать практически полную линейность кривой по всему диапазону входных напряжений (от 11,3 до 21,7 В). Данную зависимость роста температуры можно объяснить пропорциональным увеличением степени ионизации газа. Дальнейшее увеличение входного напряжения приведёт к невозможности использования данной технологии для обработки объектов биомедицинского назначения из-за непригодно высоких для данного направления температур.

При исследовании влияния расхода рабочего газа на температуру поверхности обрабатываемых образцов (рисунок 1(г)), значение  $Q_{Аг}$  менялось в пределах от 85 до 370 л/ч. При увеличении расхода аргона происходит «отток» из зоны разряда возбужденных и заряженных частиц, что ведет к снижению интенсивности плазмообразования, и, как следствие, снижению температуры.

В результате экспериментальных исследований установлено, что увеличение расхода рабочего газа (аргона) с 85 до 375 л/ч приводит к снижению температуры обрабатываемой поверхности до 26 °С, и увеличению длины факела до 3.25 см., Температура поверхности образца помещенного в

плазму при атмосферном давлении может быть установлена от 41 °С до 26 °С, что позволяет обрабатывать поверхность минеральных и биологических образцов.

**Список использованных источников:**

1. *Heating Effect of Dielectric Barrier Discharges for Direct Medical Treatment / H. Ayan [et.al.] – IEEE Transactions on Plasma Science, 2009. – Vol. 37: p. 113-120.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НЕУПОРЯДОЧЕННОЙ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ АНОДНЫХ ПЛЕНОК НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ АНОДИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ

Лушпа Н.В.

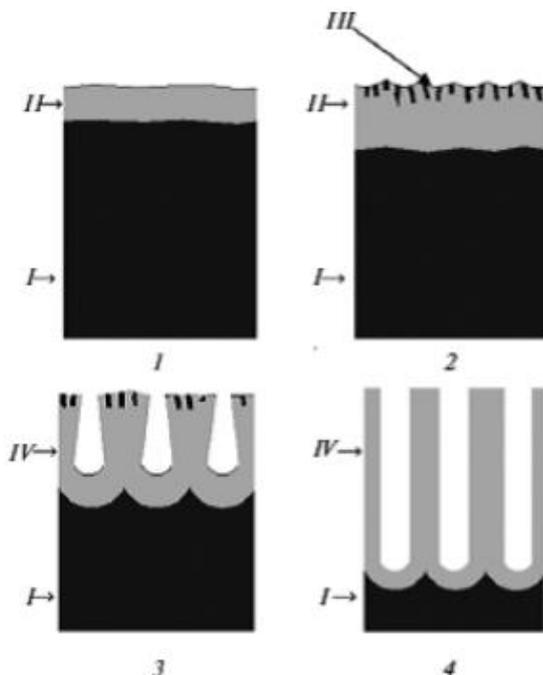
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Врублевский И.А. – канд. техн. наук, доцент

Рассмотрены особенности формирования пористой морфологии пленок анодного оксида алюминия на начальной стадии анодирования алюминия. Установлено, что на начальной стадии анодирования алюминия пористая морфология анодных пленок характеризуется одновременным развитием как главных, так и неосновных пор определенного диаметра. Полученные результаты свидетельствуют, что неосновные поры имеют не хаотичное распределение в анодной пленке, а расположены внутри гексагональных ячеек, составленных из главных пор.

Пленки пористого анодного оксида алюминия (АОА) получают путем электрохимического окисления алюминия в водных растворах кислот. Используя специальные режимы анодирования формируют пленки АОА, с упорядоченной пористой структурой и гексагональной формой ячеек. Толщина анодных пленок определяется временем и плотностью тока анодирования, тогда как напряжение анодирования определяет диаметр пор и расстояние между ними [1, 2].

Согласно многочисленным исследованиям, процесс формирования пленок пористого АОА можно разделить на несколько стадий (рис. 1). На первой стадии формируется слой плотного оксида алюминия. После его частичного электрохимического растворения происходит зарождение пор в местах дефектов поверхности (стадия 2). Далее поры с различными диаметрами конкурируют между собой за продолжение развития (стадия 3). После завершения этого этапа начинается стационарный рост главных пор (стадия 4).



I — алюминий, II — плотный АОА барьерного типа, III — зародыши пор, IV — пористый АОА  
Рисунок 1 – Схематическое изображение основных стадий формирования пористой структуры АОА [3]

Зависимость плотности анодного тока от времени показана на рис. 2. Как и в случае пленок барьерного типа, плотность тока сначала уменьшается (область 1), затем проходит минимум (область 2), возрастает до максимума (область 3) и, наконец, стабилизируется на более низком уровне (область плато 4). Эти области соответствуют стадиям роста изначально плотного оксида (II на рис. 1), образования зародышей пор (III), их развития и роста пор (IV) вглубь алюминия по нормали к поверхности [4 - 6]. На стадии 4 анодного окисления происходит развитие главных пор с высокой регулярностью структуры.



Рисунок 2 – График зависимости анодного тока  $J$  от времени  $t$  [3]

Целью работы было изучение особенностей формирования пористой морфологии пленок анодного оксида алюминия на начальной стадии анодирования алюминия.

Морфологии поверхности пленки пористого оксида алюминия на алюминиевой подложке, полученной в потенциостатическом режиме при 40В в щавелевой кислоте изучалась с помощью СЭМ микроскопии. Для определения диаметра пор проводилась компьютерная обработка поверхностной морфологии анодной пленки в программе ImageJ. Затем по результатам обработки строился график распределения пор по диаметру. Полученные результаты показали, что распределение пор по диаметру имеет два отчетливых пика при  $22,5 \pm 0,2$  и  $26,4 \pm 0,2$  нм. Большой диаметр 26,4 нм имеют главные поры, а диаметр 22,5 нм неосновные поры в пленке анодного оксида алюминия. Это указывает на то, что на начальной стадии анодирования алюминия наблюдается одновременное развитие, как главных пор, так и неосновных пор с близким диаметром. Следует отметить, что количество неосновных пор имеет такой же порядок, как и главные поры. Поэтому с большой вероятностью можно утверждать, что неосновные пор имеют не хаотическое распределение в анодной пленке, а расположены внутри гексагональных ячеек, составленных из главных пор. В тоже время на начальной стадии анодирования форма таких гексагональных ячеек сильно искажена.

Установлено, что на начальной стадии анодирования алюминия пористая морфология анодных пленок характеризуется одновременным развитием как главных, так и неосновных пор определенного диаметра. Полученные результаты свидетельствуют, что неосновные поры имеют не хаотичное распределение в анодной пленке, а расположены внутри гексагональных ячеек, составленных из главных пор.

**Список использованных источников:**

1. Self-ordering regimes of porous alumina: The 10% porosity rule / K. Nielsch [et al.] // *Nano Letters*, 2002 – Vol. 2. – № 7. – P. 677-680.
2. Fabrication of monodomain alumina pore arrays with an interpore distance smaller than the lattice constant of the imprint stamp / J. Choi [et. al.] // *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2003. – Vol. 21. – P. 763-766.
3. Структурированные нанокompозиты ферромагнетик/оксид алюминия на поверхности полупроводниковых и изолирующих подложек. Синтез, строение и свойства металл/полупроводник содержащих наноструктурированных композитов / А.С. Бугаев [и др.] // М.: «Техносфера», Москва, 2016. – С. 345-369.
4. Fast fabrication of long-range ordered porous alumina membranes by hard anodization / W. Lee [et. al.] // *Nature Materials*, 2006. – Vol. 5. – P. 741-747.
5. Sarkar J. Nanowires: properties, applications and synthesis via porous anodicaluminium oxide template / J. Sarkar, G.G. Khan, A. Basumallick // *Bull. Mater. Sci.*, 2007. – Vol. 30. – P. 271-290.

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ЗАРЯДКИ LI-ИОН АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Хиневич А.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Степанов А.А. – канд. техн. наук, доцент

Рассматривается возможность применения алгоритмов глубокого машинного обучения для оптимизации процессов управления литий-ионными аккумуляторами во время эксплуатации и планируется сравнить с описанным в данной работе алгоритмом, основанным на линейных регрессионных моделях прогнозирования величины. В моделях используются оценщики с обратной связью на основе байесовского оптимизатора. Для обучения моделей использовались данные из открытых исследований. Основные пакеты моделей разработаны в качестве стандартных библиотек *TensorFlow* и *Scikit-learn*. Использовались данные по 185 батареям, которые разряжались и заряжались в процессе 100 циклов. Выделено 224 возможных типа зарядки. Время на оценку и оптимизацию составила 16 дней.

В данной работе демонстрируется методология применения машинного обучения для оптимизации пространства параметров тока и напряжения в процессе быстрой зарядки аккумуляторных батарей. Модель, снижающая затраты на оптимизацию, состоит из: 1 модель раннего прогнозирования, что снижает время эксперимента путем прогнозирования срока службы; 2 байесовский алгоритм оптимизации, который уменьшает количество экспериментов путем подбора сбалансированных актов зарядки [1].

Характеристики тока и напряжения зарядки батарей получены в процессе многократной зарядки и разрядки батарей. Эти данные используются в качестве входных данных алгоритмом линейной регрессии. Модель предварительно обучили на данных полного разряда батареи. Всего проводилось четыре последовательных цикла оптимизационной оценки. В результате время тестирования снижается. На рисунке 1 представлены этапы проведения эксперимента.

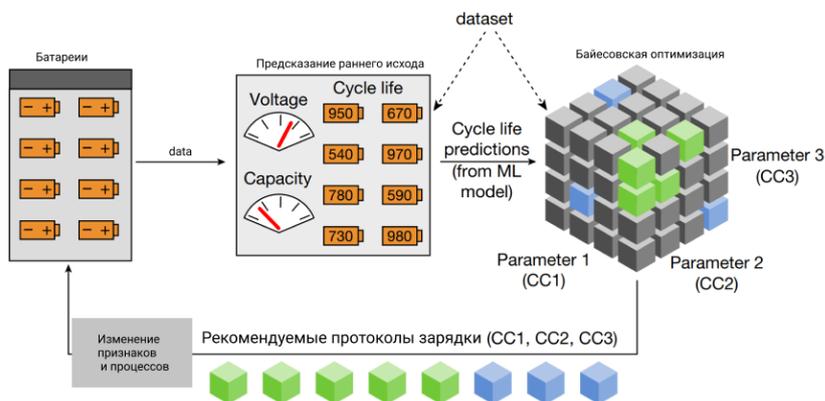


Рисунок 1 – Схема системы оптимизации с обратной связью [1]

Как показано на рисунке 2, каждый тип зарядки определяется тремя независимыми параметрами (CC1, CC2 и CC3); каждый параметр представляет собой ток заряда. Четвертый параметр, CC4, зависит от CC1, CC2, CC3 и времени зарядки.

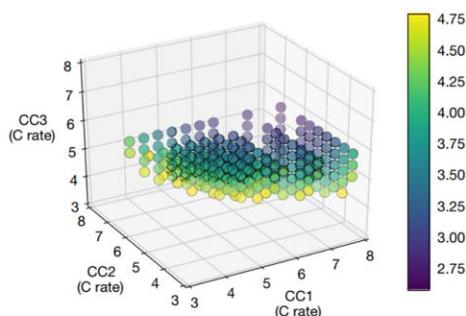


Рисунок 2 – Структура десятиминутного акта быстрой зарядки [1]

После двух циклов появляется общая картина пространства параметров, то есть зависимость срока службы от параметров протокола зарядки  $CC1$ ,  $CC2$  и  $CC3$ , и выявлена область протоколов с продолжительным временем жизни.

Для того чтоб оценить качество модели необходимо провести тестовый эксперимент. Проводится зарядка-разрядка батарей до полного отказа. Последний цикл зарядки-разрядки считается как истинное время жизни. Эти тесты проводятся чтобы, подтвердить, что оценщик может правильно выбрать «типы» зарядки соответствующие максимальному времени жизни. Результаты тестирования представлены на рисунке 3.

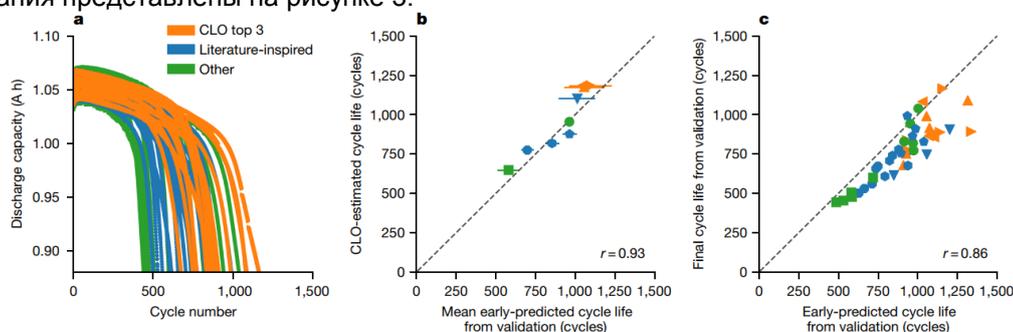


Рисунок 3 – Результаты проверочного тестов [1]

Кривые затухания разрядной емкости демонстрируют нелинейный спад, характерный для быстрой зарядки. Рассматриваемая модель раннего предсказания демонстрирует некоторую погрешность (рисунок 3), из-за старения от различного способа хранения батарей.

Данный метод значительно сокращает необходимое время оптимизации по сравнению с подходами базовой оптимизации.

Таким образом, был рассмотрен алгоритм оптимизации зарядки литий-ионных аккумуляторов с использованием системы оценки и предварительным прогнозом исхода. Этот метод может быть распространен на другие области проектирования быстрых зарядок, таких как импульсная и постоянная зарядка, а также для других целей, таких как более медленная зарядка. Кроме того, эта работа открывает новые возможности для оптимизации батареи. Более того, при условии, что существует подходящий предсказатель предварительного исхода, этот метод также может применяться для оптимизации других аспектов разработки аккумуляторов, таких как электродные материалы и химический состав электролитов [2]. Помимо батарей, подход сочетающий ранний прогноз результата может быть расширен для эффективной оптимизации других физических и вычислительных многомерных пространств параметров, которые вовлекают трудоемкие эксперименты, иллюстрирующие методы на основе данных для ускорения темпов научных открытий [3].

В дальнейшем предлагается рассмотреть возможность применения алгоритмов глубокого обучения для решения аналогичной задачи и увеличения качества моделей.

#### Список использованных источников:

1. Peter M. Attia, Closed-loop optimization of fast-charging protocols for batteries with machine learning / Peter M. Attia, Aditya Grover // *Nature* 559, 547–555 (2020).
2. Butler, K. T, Machine learning for molecular and materials science / Butler, K. T., Davies, D. W., Cartwright, H., Isayev, O. & Walsh, A. // *Nature* 559, 547–555 (2018).
3. Khinevich A., Fabrication and characterization of solution processed CZCTSSe thin films for solar cell application/ A. Khinevich, // *Photonics Global Student Conference, 10 September 2020 г., Shenzhen / Electronic collection.*

# МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Степанов Н.В., студент гр.744101

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Стома С.С. – ассистент кафедры электроники

**Аннотация.** В работе рассмотрено проектирование мобильной системы детектирования и распознавания объектов.

**Ключевые слова.** iOS, нейросеть, machine learning, детектирование.

Задача детектирования и распознавания информации в реальном времени и по изображениям представляет интерес в области компьютерного анализа. На данный момент эту задачу решают разнообразные технологии и инструменты. Различные методы дают разную точность и скорость обработки информации.

Целью данной работы является разработка приложения для детектирования и распознавания объектов в приложении для платформы iOS, проведение анализа имеющихся алгоритмов и разработка собственной нейросети для ускоренной обработки данных, полученных с камеры смартфона.

Процесс работы данной мобильной системы начинается с запуска приложения и выбора режима работы. При выборе режима детектирования в реальном времени – открывается камера и процесс анализа данных запускается. Результат отображается сразу же на экране устройства. При выборе режима детектирования по фото – происходит выбор фотографии и дальнейший её анализ алгоритмами детектирования объектов.

Область применения приложения достаточно обширная: оно может быть использовано как организациями и предприятиями для внедрения в свои системы охраны или производства, так и для помощи слабовидящим людям.

Экономическая эффективность/значимость работы: работа является конкурентоспособной, социально значимой и экономически выгодной.

Ее применение позволяет:

- высокоточно детектировать и распознавать детали на производствах;
- использовать её как недорогой способ системы охраны на КПП на предприятиях;
- помогать слабовидящим людям распознавать какой объект находится возле них;
- экономить огромные средства на специализированные приборы.

Преимущества данной системы следующие:

- дешевизна;
- легкость применения;
- автоматизация;
- экономия времени;
- большая область применения;
- актуальность.

#### Список использованных источников:

1. *Selfie infographic* (2001): <http://techinfographics.com/selfie-infographic-selfiegraphic-facts-and-statistics/>
2. Canny J. F. A computational approach to edge detection // *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*. 1986. No6. P. 679-698.
3. Duda, R. O., P. E. Hart Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures // *Comm. ACM*, 1972, Vol. 15, P. 11–15;
4. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // *Computer Vision and Pattern Recognition 2001*
5. Viola P., Jones M. Fast Multi-view Face Detection // *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition 2003*
6. Viola P., Jones M. Robust Real-time Object Detection // *International Journal of Computer Vision 2001*
7. Freund Y., Schapire R.E. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. In *Computational Learning Theory: Eurocolt '95*, pages 23–37. Springer-Verlag, 1995.
8. *Smartphone OS Market Share (2015)*: <http://www.idc.com/prodserv/smartphone-os-market-share.jsp>
9. *Swift, C++ Performance*: <http://www.primatelabs.com/blog/2014/12/swift-performance/>
10. *OpenCV modules*: <http://docs.opencv.org/3.1.0>
11. *Using C++ in Swift*: <https://developer.apple.com/library/ios/documentation/Swift/Conceptual/BuildingCocoaApps/index.html>
12. *CascadeClassifier Class Reference*: [http://docs.opencv.org/3.1.0/d1/de5/classcv\\_1\\_1CascadeClassifier.html](http://docs.opencv.org/3.1.0/d1/de5/classcv_1_1CascadeClassifier.html)
13. *Viola-Jones Face Detection*: <https://sites.google.com/site/5kk73gpu2012/assignment/viola-jones-face-detection#TOC-Image-Pyramid>

## БЛОК ПИТАНИЯ РЕЗЕРВНЫЙ

Кундельский Р.В., студент гр.744101

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Глецевич П.О. – ассистент каф. электроники

В работе рассматриваются проблемы внезапного отключения устройств при пропаже питающего напряжения, а также способы решения таких проблем.

В настоящее время наблюдается увеличение потребности в высокоскоростных центрах обработки данных, системах безопасности, системах телекоммуникационной связи в реальном времени и применении систем с непрерывным автоматическим технологическим процессом. Рост потребности в таком оборудовании вместе с обеспечением большим количеством разнообразных возможностей выдвигает повышенные требования к источникам электропитания.

Невзирая на то, что при генерации электроэнергии, напряжение имеет отличные характеристики, в тот момент, когда электропитание достигает потребителя, его качество далекое от идеального. Значительные провалы напряжения и колебания частоты, могут привести к непоправимым потерям, вызванным повреждением оборудования или его непредвиденным отключением без сохранения данных.

Особенное внимание, при разработке источников питания, стали уделять при построении сложных цифровых устройств (персональный компьютер или любая другая микропроцессорная техника), где возникла потребность обеспечения этих устройств непрерывным и самое главное - качественным питанием. Пропадание напряжения для устройств этого класса может быть фатальным: медицинские системы жизнеобеспечения нуждаются в постоянной работе комплекса устройств, и требования к их питанию очень строги; системы банковской защиты и охранные системы; системы экстренной связи и передачи информации.

При создании электронного устройства отдельного класса и назначения (электронно-вычислительные машины, медицинская и бытовая электронная техника, средства автоматизации) источник обеспечения гарантированного питания может быть подобран из тех, которые выпускаются серийно. В некоторых странах существуют фирмы, которые специализируются на промышленном выпуске источников бесперебойного питания, и потребитель имеет возможность выбрать тот, который ему больше всего подходит. Однако, когда по эксплуатационным, конструкторским или другим характеристикам источника бесперебойного питания, которые выпускаются серийно, не удовлетворяют потребностям потребителя, необходимо разработать новый, с учетом всех правил, специфических для этого вида.

Темой данного проекта является разработка универсального резервного блока питания (далее БПР), структурная схема которого представлена на рис. 1.

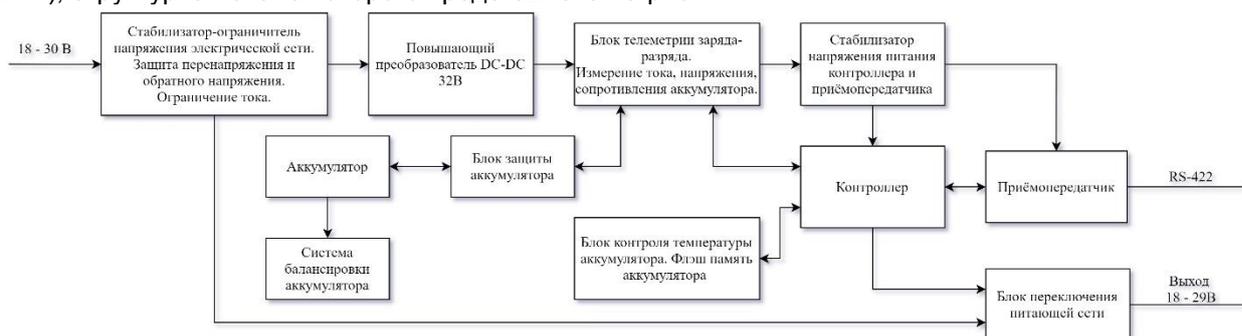


Рисунок 1 – Структурная схема БПР

Его универсальность заключается в том, чтобы он мог использоваться в любой аппаратуре мощностью до 500 Вт, питающейся в диапазоне 3,6 – 32,4 В (диапазон выходного напряжения и мощности выбирается при настройке) начиная от простых систем аварийного освещения и заканчивая системами безопасности и медицинским оборудованием. Причина построения бесперебойного источника питания — это возможность его использования в любой аппаратуре, для которой стабильное электропитание является важным фактором, а также создание отечественного устройства которое будет дешевле зарубежных аналогов.

Для повышения надежности блока, при его проектировании, предлагается:

- обеспечить легкие электрические, тепловые рабочие режимы деталей и материалов конструкции, их правильный выбор;
- обеспечить надежную защиту от внешних и внутренних дестабилизирующих факторов;

- широко использовать интегральные микросхемы, а также стандартные компоненты;
- обеспечить ремонтпригодность изделия, используя функционально-узловой метод конструирования.

Основные факторы рассматриваемые при разработке:

- стоимость;
- масса и размеры;
- длительность работы от аккумуляторной батареи;
- защищённость от внешних факторов;
- универсальность

Для обеспечения заданных климатических и механических требований предлагается использовать элементную базу и материалы, учитывая предельные внешние воздействия, которые негативно влияют на работоспособность изделия.

Предполагается использование в системах безопасности, системах видеонаблюдения, медицинском оборудовании, системах аварийного освещения, а также для использования в автомобилях для различных целей.

**Список использованных источников:**

1. Analog [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/ru/products/ltc4015.html>
2. Analog [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/ru/products/lt4356-1.html>
3. Irbis [Электронный ресурс] : Datasheet / Irbis. – Режим доступа: 60w.pdf
4. Mouser [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.mouser.com/ProductDetail/Maxim-Integrated/MAX3462ESA%2B?qs=1THa7WoU59G5z0ZIP95kGA%3D%3D>
5. Microchip [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328>
6. Electrosam [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrotehnika/jelektrobezopasnost/avariinoe-osveshchenie/>

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОЛИВА РАСТЕНИЙ

*Левина М.О., студентка гр.744101*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Стома С.С. – ассистент кафедры электроники*

**Аннотация.** Процесс работы автоматической системы полива комнатных растений начинается с датчика влажности. Он измеряет влажность почвы и передает аналоговое значение микроконтроллеру. Далее каждые 5 минут срабатывают прерывания: проверяется значение, переданное АЦП. Затем сигнал идет на силовой ключ. Срабатывает проверка открытия/закрытия силового ключа. В зависимости от влажности почвы система определит, какое действие произвести с ключом: закрыть или открыть.

**Ключевые слова.** Полив, микроконтроллер, датчик влажности, Bluetooth.

В данной работе рассмотрено проектирование автоматической системы полива растений на основе датчика влажности почвы. Автоматическая система полива — это система, позволяющая осуществлять постоянное орошение почвы необходимым объемом жидкости на протяжении определенного периода.

Основной задачей подобной системы является обеспечение растений строго необходимым им количеством воды с учетом реально выпавших атмосферных осадков в случае нахождения растений на открытой территории, а также с учетом влажности почвы в настоящее время в случае нахождения предмета полива в здании.

Целью работы является проведение комплексных инженерных исследований, включая поиск необходимой информации, анализ и интерпретацию данных с применением базовых и специальных знаний и современных методов для достижения требуемых результатов.

Область применения: устройство предназначено для жилых помещений и автоматического полива комнатных растений.

Экономическая эффективность/значимость работы: работа является конкурентоспособной и экономически выгодной.

Система автоматического полива позволяет создать благоприятные условия развития растениям, избавляет от продолжительной рутинной ежедневной работы по уходу за садом, газоном, огородом, дачей.

Ее применение позволяет:

- выращивать здоровые, ухоженные растения на даче;
- создавать красивый газон;
- обеспечивать равномерный полив без прямого участия человека;
- экономить потребление воды.

Преимущества данной системы следующие:

- дешевизна;
- легкость применения;
- автоматизация;
- экономия времени;
- большая область применения;
- актуальность.

Автоматизированная система полива растений состоит из 2 частей: система детектирования влажности почвы и система полива растений.

Система детектирования влажности почвы определит, сколько воды в данный момент времени содержится в почве, и передаст информацию через Bluetooth. В зависимости от этого есть некоторые пути развития этой системы. К примеру, сделать автоматическую систему полива комнатных растений дома либо сложную систему полива, например, газона, занимающего крупную территорию, или в еще более крупных масштабах, как было рассмотрено выше, для сельского хозяйства страны, а конкретно – для пахотных земель. В первом случае данная система будет учитывать испарение воды в комнатных растениях (т.к. очевидно, влажность почвы зависит напрямую от испарения воды с нее). Это гораздо эффективнее, чем полив растений по расписанию. Во втором и третьем случаях такая система будет давать хороший результат благодаря тому, что она учитывает погодные условия. В дождь влажность выше, соответственно, работа системы полива осуществляться не будет. В ясную погоду выше испарение, значит датчик отметит низкий показатель влажности почвы и передаст информацию микроконтроллеру (а также человеку через Bluetooth).

Система полива подключается к водопроводу и равномерно распределяет воду по нужной территории. Однако в данной работе мы рассмотрим «макет» такой системы, то есть более простой вариант, но в котором тоже есть необходимость, - систему полива комнатных растений. В такой системе вода будет поступать из удобной для пользователя емкости через шланг напрямую к месту полива.

Существует несколько методов полива растений:

- 1 Метод полива из лейки;
- 2 Метод частичного погружения емкости с растением в воду;
- 3 Метод полного погружения;
- 4 Метод капельного орошения;
- 5 Фитильный полив;

Рассмотрим все методы полива поочередно, с точки зрения их эффективности.

Метод полива из лейки является самым распространенным, но недостаточно эффективным.

При поливе из лейки, если субстрат пересох, большая часть воды сбрасывается в поддон не увлажняя почвы, и растение не получает необходимого количества воды.

Метод частичного и полного погружения является наиболее эффективным из всех перечисленных, но при наличии большого количества растений достаточно трудоемок.

Метод капельного орошения эффективен, но связан с необходимостью точной настройки оборудования, расположением растений в одном месте и дополнительном месте для размещения насосов, таймеров управления и емкости с водой.

Фитильный полив не пригоден для большинства растений, его используют при выращивании сенполий.

Автоматизированная система полива растений – приспособление довольно распространенное, например, в дачных условиях. Однако у каждой такой системы есть свои недостатки. Самым большим недостатком при покупке такой системы является ее завышенная стоимость.

Краткий принцип работы:

- 1 Вся система управляется микроконтроллером STM32F407.
- 2 К нему подключается датчик влажности почвы и MH-Sensor. Эта система подает сигнал на микроконтроллер при определенном уровне влажности почвы.
- 3 Если же влажность относительно низкая, микроконтроллер подает сигнал на Bluetooth-модуль, который в свою очередь оповестит пользователя о каком-то уровне влажности.
- 4 В том же случае через силовой ключ пойдет сигнал на насос, который начнет качать воду из удобной для пользователя ёмкости.

Структурная схема автоматизированной системы полива растений представлена на рисунке 1.

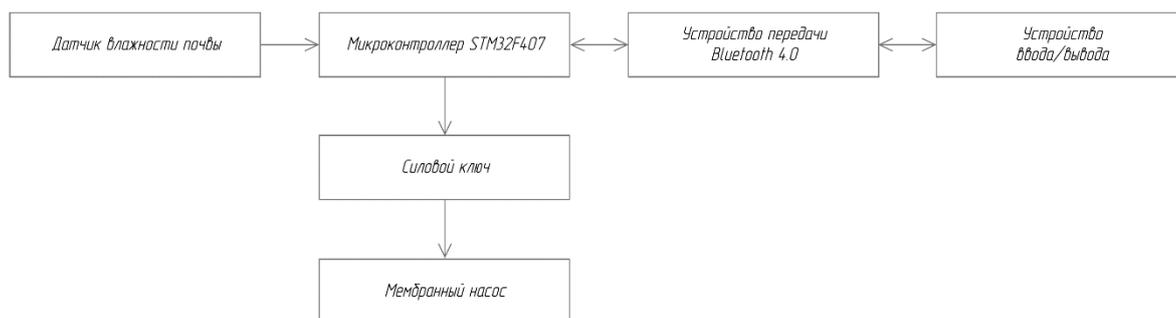


Рисунок 1 – Структурная схема системы автоматизированного полива растений

**Список использованных источников:**

1. Севбо Владимир, Титов Михаил Микроконтроллеры фирмы STMicroelectronics // Компоненты и Технологии. 2001. №14.
2. Демидов П.В., Улезько А.В. Оценка условий воспроизводства сельскохозяйственных угодий // Дальневосточный аграрный вестник. 2018. №2 (46).
3. Баранова Елизавета Михайловна, Глаголев Владислав Максимович, Щепакин Константин Михайлович Программирование микроконтроллера на языке Си // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. №9-2.
4. Васильев Сергей Николаевич, Медведева Людмила Ивановна Анализ датчиков влажности с целью разработки автономной автоматизированной системы полива дачного участка // Научные исследования. 2017. №6 (17).
5. Островский А.А., Савчиц А.В., Костин В.Е. Реализация датчика влажности почвы для обеспечения повышения качества полива автоматической системой // ИВД. 2018. №4 (51).
6. Егоров Юрий Валентинович, Бобков Алексей Викторович, Кириченко Анатолий Валентинович, Есафова Елена Николаевна Свойства и возможности датчиков влажности для управления поливом // Вестник АГАУ. 2017. №1 (147).
7. Соболин Г. В., Сатункин И. В., Прядкин А. А., Гуляев А. И. Перспективы развития принципиально новых способов полива // Известия ОГАУ. 2006. №12-1.