

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**



**ИНФОРМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА**

**4 (26)**

**Донецк – 2021**

УДК 004.3+004.9+004.2+51.7+519.6+519.7

**ИНФОРМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА, № 4 (26), 2021,  
Донецк, ДонНТУ.**

Выпуск подготовлен по VII Международной научно-технической конференции «Современные информационные технологии в образовании и научных исследованиях» (СИТОНИ-2021), проведенной 23 ноября 2021 г. в рамках мероприятий, посвященных 100-летию ДонНТУ. Также представлены другие материалы аспирантов, соискателей и научных работников по вопросам приоритетных направлений научно-технического обеспечения в области информатики, кибернетики, вычислительной техники и инженерного образования.

Материалы предназначены для специалистов народного хозяйства, ученых, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Редакционная коллегия

**Главный редактор:** Павлыш В. Н., д.т.н., проф.

**Зам. глав. ред.:** Мальчева Р. В., к.т.н., доц.

**Ответственный секретарь:** Лёвкина А. И.

**Члены редакционной коллегии:** Аверин Г. В., д.т.н., проф.; Аноприенко А. Я., к.т.н., проф.;

Звягинцева А.В., д.т.н., доц.; Зори С. А., д.т.н., доц.; Карабчевский В. В., к.т.н., доц.;

Привалов М. В., к.т.н., доц.; Скобцов Ю. А., д.т.н., проф.; Федяев О. И., к.т.н., доц.;

Шелепов В. Ю., д.ф-м.н., проф.

Рекомендовано к печати ученым советом ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» Министерства образования и науки ДНР. Протокол № 10 от 24 декабря 2021 г.

Свидетельство о регистрации СМИ: серия ААА № 000145 от 20.06.2017.

Приказ МОН ДНР № 135 от 01.02.2019 о включении в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР.

Контактный адрес редакции

ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУ ВПО «ДонНТУ»,

4-й учебный корпус, к. 36., ул. Кобозева, 17.

Тел.: +38 (062) 301-07-35, +38 (071) 334-89-11

Эл. почта: [infcyb.donntu@yandex.ru](mailto:infcyb.donntu@yandex.ru)

Интернет: <http://infcyb.donntu.org>

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика и вычислительная техника

<b>Моделирование и визуализация трехмерной модели с применением технологии дополненной реальности</b> <i>Аноприенко А. Я., Крахмаль М. В.</i> .....	5
<b>Разработка метода оптимального управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля</b> <i>Черников В. Г., Павлыш В. Н.</i> .....	14
<b>Реализация машинного обучения в интеллектуальной системе процесса баротерапии</b> <i>Кравченко Н. М., Бондарчук В. В., Ключанова Т. Д.</i> .....	22
<b>Разработка архитектуры интегрированной системы генерации псевдослучайных тестов цифровых устройств</b> <i>Зинченко Т. А., Зинченко Ю. Е., Дяченко О. Н.</i> .....	27
<b>Задачи планирования производственно-логистической деятельности предприятия</b> <i>Дмитрюк Т. Г., Зори С. А.</i> .....	33
<b>Анализ криптографических протоколов удаленного доступа к ПК</b> <i>Ефименко К. Н., Пауков Д. В.</i> .....	45
<b>О моделировании диффузии неравновесных неосновных носителей заряда, генерированных электронным пучком в многослойной полупроводниковой мишени</b> <i>Степович М.А., Туртин Д.В., Калманович В.В.</i> .....	51
<b>Анализ аппаратных платформ для обработки изображений</b> <i>Секирин А. И., Вустяк Н. Ф.</i> .....	56
<b>Разработка модифицированного алгоритма измерения физических величин для сенсорных систем</b> <i>Койбаш А. А.</i> .....	63
<u>Об авторах</u> .....	70
<u>Требования к статьям, направляемым в редакцию научного журнала «Информатика и кибернетика»</u> .....	72

# **Информатика и вычислительная техника**

## Моделирование и визуализация трехмерной модели с применением технологии дополненной реальности

А. Я. Аноприенко, М. В. Крахмаль  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
[meri.krakhmal@gmail.com](mailto:meri.krakhmal@gmail.com)

### **Аннотация**

*В статье рассматриваются современные системы и средства для разработки технологии дополненной реальности. Проанализированы библиотеки компьютерного зрения, которые наиболее подходят для создания AR-приложений в зависимости от их целей и задач. Приведена общая структура создания дополненной реальности на базе безмаркерных технологий, показана математическая модель детектора обнаружения особых точек. Реализована программа в среде разработки Android Studio, создана трехмерная модель в среде Blender. Произведено экспериментальное исследование приложения. Выполнен анализ полученных результатов по работоспособности программы. Поставлены задачи для дальнейшего исследования.*

### **Введение**

В настоящее время инновационные технологии внедряются во все сферы жизнедеятельности человека, поскольку происходит усовершенствование более ранних методов взаимодействия с информацией [1]. Современный этап развития компьютерных систем более детально исследует области компьютерной визуализации. Моделирование систем и отображение динамики процессов выполняется с использованием интерактивных программных средств [2]. Во время работы такого программного продукта выполняется наглядное отображение процесса развития ситуации и индикация всех внешних воздействий. Такая интерактивная система представляет собой модель интерфейса поддержки принятия решений.

На сегодняшний день одним из самых важных направлений развития современных компьютерных технологий является применение дополненной реальности (ДР или AR – *augmented reality*). Система, созданная на основе технологии ДР, представляет совершенно новый тип интерфейса, который частично погружает человека в трехмерный мир и позволяет воспринимать 3D-модели и манипулировать ими [3]. Такие системы с каждым днем получают широкое распространение среди научно-технических, обучающих и развлекательных приложений. Приложение с ДР при правильной реализации может передать максимально реалистичные объекты, за которыми человек будет наблюдать с экрана смартфона, планшета или специальных умных очков. Для этого необходимо выбрать правильное программное обеспечение, которое работает с различными алгоритмами отслеживания объектов, захвата и

распознавания изображений. Кроме этого, продукт должен быть оптимизирован под различные устройства и платформы.

Главным отличием VR-технологии от AR-технологии является использование менее дорогостоящего оборудования, специальных устройств. Технология дополненной реальности может быть реализована на одном из самых распространенных и востребованных устройств – на смартфоне.

Современные IT-технологии решают различные задачи, связанные с компьютерным зрением, которое позволяет восстанавливать сцену или изображение, распознавать любые образы или точки: локализация, детектирование или сегментация объектов. Исходя из этого AR-технология в ближайшем будущем имеет большие перспективы в дальнейшем развитии.

В данной работе будет разработана система с ДР на основе безмаркерной технологии. Приложение отображает дополненный объект на созданной виртуальной плоскости. Наложённый объект обладает функциями масштабируемости, переноса и обзора с разных углов.

### **Цель исследования и постановка задач**

Целью данного исследования является определение способов реализации программного продукта с использованием технологии ДР. Тестирование функциональных возможностей разработанного приложения на различных устройствах.

В работе решаются следующие задачи:

– анализ и сравнение наиболее используемых средств разработки AR-приложений;

- построение алгоритма работы приложения с ДР и реализация программы в среде разработки Android Studio;
- представление AR-приложения с применением современных технологий ДР;
- определение задач для дальнейшего исследования.

### **Анализ средств для разработки приложений с дополненной реальностью**

AR-технология позволяет пользователю взаимодействовать в реальной обстановке с наложенными виртуальными предметами (трехмерные модели, текстовые данные, аудио- или видео-файлы) [4]. В статье [5] были рассмотрены достоинства и недостатки данной технологии, показаны примеры использования в образовательных и промышленных целях. Также был проведен анализ базовых методов для создания дополненной реальности.

На сегодняшний день самой важной проблемой использования приложений с AR-технологией на устройствах является мощность смартфонов или планшетов. Низкая производительность приводит к более длительной обработке данных, полученных из камеры, в отличие от ноутбуков или стационарных компьютеров с веб-камерой. В результате этого перед созданием приложения необходимо выбрать подходящую среду разработки, которая будет соответствовать задачам и требованиям будущего продукта. В зависимости от функциональных задач приложения можно выбрать готовые SDK (*Software Development Kit*), которые оснащены определенным набором функций или создавать программу с помощью интегрированной среды

для работы с платформой Android – Android Studio [6]. При разработке мобильных приложений нужно придерживаться двух требований – качество виртуальных моделей и программный код, который должен подгружать все объекты на сцену и занимать не встроенную память телефона, а оперативную.

Для создания AR-приложения необходимо использовать многофункциональные инструменты, которые будут обрабатывать большой объем данных. Выбор программного продукта и его инструментов зависит от целей самого приложения. Правильный выбор библиотеки компьютерного зрения (поиск координат, масштаба, угла поворота моделей) упростит создание приложения с AR-технологией, так как не будут использоваться ненужные аппаратные средства. Основными функциями приложений с дополненной реальностью являются распознавание и отслеживание реальных объектов. Для этих целей были разработаны алгоритмы машинного зрения для камеры устройства.

Двумя основными компонентами для создания AR-технологии является визуализация моделей и трекинг (отслеживание в реальном времени). Существует множество различных методов для реализации технологии – библиотеки и движки компьютерного зрения. Был проведен аналитический обзор различных средств для создания ДР. В табл. 1 представлены наиболее популярные и востребованные инструменты для создания и работы с ДР-технологией. В табл. 2 приведена сравнительная характеристика существующих библиотек компьютерного зрения, которые являются наиболее используемыми при создании AR-приложения.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика средств разработки AR

Название SDK	Поддерживаемые платформы	Функциональные возможности	Поддержка языков программирования
Vuforia (Free, Commercial)	Android, iOS, Unity	Анализ, распознавание и отслеживание разных типов визуальных объектов (плоские изображения и трехмерные). Обнаружение текстовой информации, предметов в окружающей среде	C++, Java, Objective-C, .Net
Wikitude (Free)	Android, iOS, смарт-очки, плагин для Unity	Распознавание и отслеживание различных изображений, отслеживание на основе SLAM, GEO Data (географическая привязка объектов), облачное распознавание объектов	Java, Objective-C
EasyAR (Free)	Android, Unity, iOS, Windows	Работа со смарт-очками, распознавание трехмерных объектов, облачное распознавание	Java, Objective-C, .Net
Kudan (Free, Commercial)	Android, iOS	Анализ и распознавание плоских изображений	Java

Таблица 2 – Сравнительная характеристика библиотек компьютерного зрения для создания AR

Название библиотеки	Поддерживаемые платформы	Функциональные возможности	Поддержка языков программирования
OpenCV	Android, Windows, Linux, iOS	Анализ и сравнение ключевых точек, анализ движений, скорость выполнения продукта, открытый исходный код	C, C++, Python, Ruby, Lua, Matlab
ARToolkit	Android, Unity, iOS, смарт-очки	Поддержка шлемов и очков, открытый исходный код, высокая скорость приложений, отслеживания положения устройства, интерактивное взаимодействие виртуальных объектов	Java, Objective-C
Metaio SDK	Android, Unity, iOS, WEB	Безмаркерная технология для встраивания в приложения, встроенный 3D-движок	Java, Objective-C, .Net

Каждое из приведенных средств разработки приложений имеет не только базовые функции для использования дополненной реальности, но и усложненные функции, которые позволяют выводить AR-приложения на более высокий уровень [7].

Максимальная дистанция захвата изображения рассмотренных средств разработки AR-технологии значительно отличается: «Vuforia» – 1.2-3.7 м, «Wikitude» – 0.8-3 м, «EasyAR» – 0.9-2.7 м, «Kudan» – 0.8-3 м.

Wikitude SDK дополнительно реализовали функции для работы с алгоритмом SLAM (*Simultaneous localization and mapping*) и ARCore (инструмент для разработки программного обеспечения, включающий три основных функции: отслеживание движения, понимание окружающей среды, оценка освещенности). Алгоритм SLAM объединяет в себе функции навигации и создания карты, с которыми можно работать без обработки маркеров и специальных кодов, в результате чего строится трехмерная модель окружающего пространства в режиме реально времени (во время работы трекинга).

Значительное отличие Wikitude SDK от Vuforia SDK заключается в том, что Vuforia позволяет использовать только технологию ARCore. Ранее была разработана и использовалась собственная реализация SLAM алгоритма. Также в этой среде разработки есть уникальный инструмент Vuforia Chalk, который используется для создания графических подсказок над наложенными объектами.

ARCore позволяет определять размер и местоположение всех типов поверхностей: горизонтальных, вертикальных и наклонных поверхностей. Во время перемещения ARCore обнаруживает визуально различимые объекты (особые точки) и строит пространственную карту, которая в дальнейшем позволяет определить положение и ориентацию устройства. ARCore предоставляет оценку текущих условий освещенности и допускает применить эти данные для вывода виртуальной модели. Можно

реализовать логику виртуального объекта при изменении освещенности [8].

Аналитическая компания Tractica ежегодно составляет отчеты по развитию IT-технологий. Согласно новому отчету ведущего аналитика Марка Бекью по использованию мобильных AR-технологий, в 2022 году количество уникальных активных мобильных пользователей (*MAU – Monthly Active Users*) возрастет до 1,9 миллиарда, когда в 2020-м году насчитывалось около 1,5 миллиардов. В то время как количество приложений с ДР увеличится до 4,65 миллиардов с 3,2 миллиардов за 2020-й год [9]. Проанализировав график (рис.1) развития, можно сделать вывод, что технология дополненной реальности становится более востребованной для внедрения в мобильные приложения с помощью различных SDK.

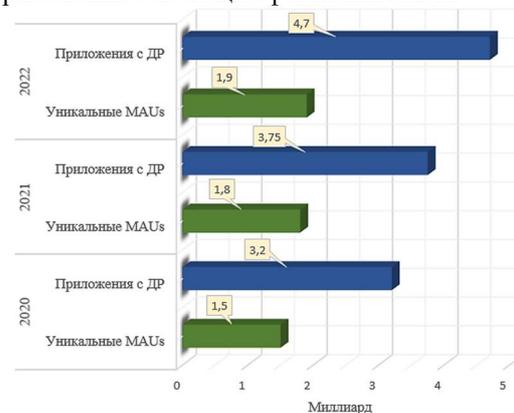


Рисунок 1 – Прогноз увеличения количества пользователей и приложений ДР к 2022 году

Дополненная реальность совмещает одновременно реальное и наложенное на одном экране. Информация отображается в режиме реального времени и изменяется при каждом перемещении камеры в пространстве. AR-технология на смартфонах или планшетах станет одним из самых популярных инструментов, который улучшит взаимодействие пользователей с устройствами [10]. На рис.2 показано три основных преимущества использования приложений с ДР.



Рисунок 2 – Преимущества использования приложений с технологией дополненной реальности

### Разработка мобильного приложения под ОС Android

Основной особенностью всех алгоритмов создания технологии дополненной реальности является наличие в них последовательности выполнения стандартных действий.

Существует базовый алгоритм для пространственных и безмаркерных технологий [11]. Так как такие алгоритмы более сложные, при сканировании оптическим сканером на изображение (фотографии, учебники, вывески, реальная картинка) или местность происходит наложение специальной сетки, которая позволяет определять «опорные» точки, необходимые для дальнейшего анализа и визуализации дополненной реальности. Стандартный алгоритм для таких технологий имеет следующую структуру (рис.3):

- распознавание представленного объекта, считывание «опорных» точек;
- инициализация полученных точек для дальнейшего сравнения;
- обращение к базе данных существующих моделей для соответствия и подтверждения правильного считывания;
- визуализация моделей дополненной реальности на места «опорных» точек.

Распознавание и трекинг изображений в реальном времени является ключевыми функциями для создания AR-технологии в любом SDK. Это позволяет пользователю захватывать большое пространство камерой устройства для дальнейшего дополнения наложенными объектами.

Для получения надежной оценки позиции наложенные объекты должны быть равномерно распределены по текущему изображению. Длина проецируемой линии зависит от перспективы камеры и расстояния до объекта.



Рисунок 3 – Общий алгоритм для создания AR-приложения на базе пространственных или бемаркерных технологий

Количество точек выборки должно зависеть от длины проектируемой площади, а не от длины трехмерной модели. Точки на проектируемой плоскости рекурсивно пронумерованы (рис.4).

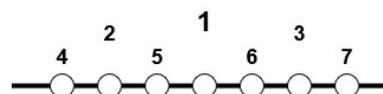


Рисунок 4 – Рекурсивная нумерация точек

Первые  $n$  точек используются для вычисления трехмерных соответствий (1):

$$n = \frac{\text{длина проектируемой линии}}{\text{плотность точки выборки}} \quad (1)$$

Вся структура проецируемой карты показана на рис.5.

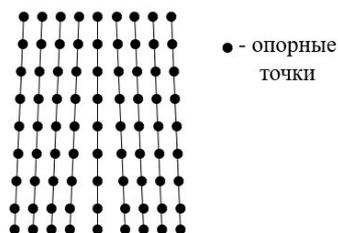


Рисунок 5 – Структура проецируемой карты

В [12] был выполнен анализ методов обнаружения «опорных» точек для создания AR-технологии. В результате были выделены 3 наиболее точных детектора. Детектор SURF (*Speed up Robust Feature*) с точки зрения реализации и прогнозируемого времени обработки текущих кадров является наиболее перспективным, но для эффективной работы данного детектора необходимым требованием является повышение быстродействия.

Детектор SURF [13] выполняет работу в два шага: извлечение и описание функций. Интегральное представление изображения (2) используется для эффективного вычисления суммы значений пикселей в считываемом изображении.

$$I(x,y) = \sum_{i=0}^x \sum_{j=0}^y I(i,j), \quad (2)$$

где  $I(x,y)$  – яркость пиксела с координатами  $(x,y)$  интегрального изображения;  $I(i,j)$  – яркость пикселя с координатами  $(i,j)$  исходного изображения.

Обнаружение особых точек в детекторе SURF основано на вычислении детерминанта матрицы Гессе. Матрица Гессе и ее детерминант определяется следующим образом (3):

$$\det(h) = D_{xx}D_{yy} - (0.9 * D_{xy})^2, \quad (3)$$

где  $D_{xx}$ ,  $D_{yy}$ ,  $D_{xy}$  – свертки по фильтрам (рис.6); коэффициент 0,9 корректирует приближенный характер вычислений.

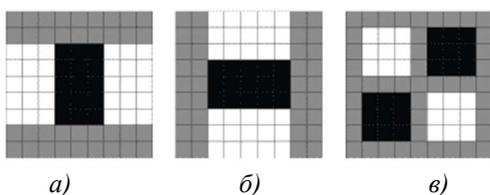


Рисунок 6 – Фильтры, используемые в алгоритме: а)  $D_{xx}$ , б)  $D_{yy}$ , в)  $D_{xy}$

Рисунок 6 отображает фильтры, в которых белые области соответствуют значению «+1»,

черные – «-2» (на третьем фильтре «-1»), серые – «0». Пространственный масштаб каждого фильтра – 9x9 пикселей. Для идентификации «опорных» точек детектор SURF выполняет поиск по всем пикселям изображения для нахождения максимума гессиана.

В данной работе реализация осуществляется с использованием инструмента для разработки программного обеспечения ARCore. При перемещении устройства выполняется взаимодействие с камерой для распознавания ключевых особенностей на каждом кадре (обнаруженное изображение). В данном случае выполняется поиск правильной поверхности для определения особых («опорных») точек для точного определения положения устройства в реальном пространстве. По найденным ключевым точкам можно получить площадь для визуализации объектов.

Ключевым моментом в работе приложения является сопоставление виртуального положения камеры с действительным положением используемого устройства. При правильном считывании наложение объектов происходит на плоскость, а отображение осуществляется с правильной точки зрения, что позволяет рассмотреть 3D-модель с любого угла.

Для визуализации моделей дополненной реальности каждый из объектов должен прикрепляться к определенной «опорной» точке, которая имеет фиксированное положение и ориентацию в реальном пространстве.

После нажатия пользователем по экрану устройства на определенную «опорную» точку ARCore проверяет нажатие и выполняется сравнение координат этой точки  $(x,y)$ . После успешной проверки на проецируемую плоскость помещается трехмерная модель из базы данных (облачное хранилище или внутренняя память устройства).

Структура работы инструмента ARCore для реализации дополненной реальности показана на рис.7. Камера устройства считывает изображение в действительном пространстве и передает его в обработку. Затем выполняется поиск «опорных» точек на изображении. При нахождении программа идентифицирует каждую из таких характерных точек и устанавливает для них текущие координаты. После того, как на экране устройства отобразится предполагаемое поле для встраивания объектов ДР, пользователь может нажать на любую из таких точек, после чего программа определяет координаты выбранной точки и загружает из предварительно скомпилированной БД нужную 3D-модель. Далее выполняется наложение виртуальной модели на экране устройства.

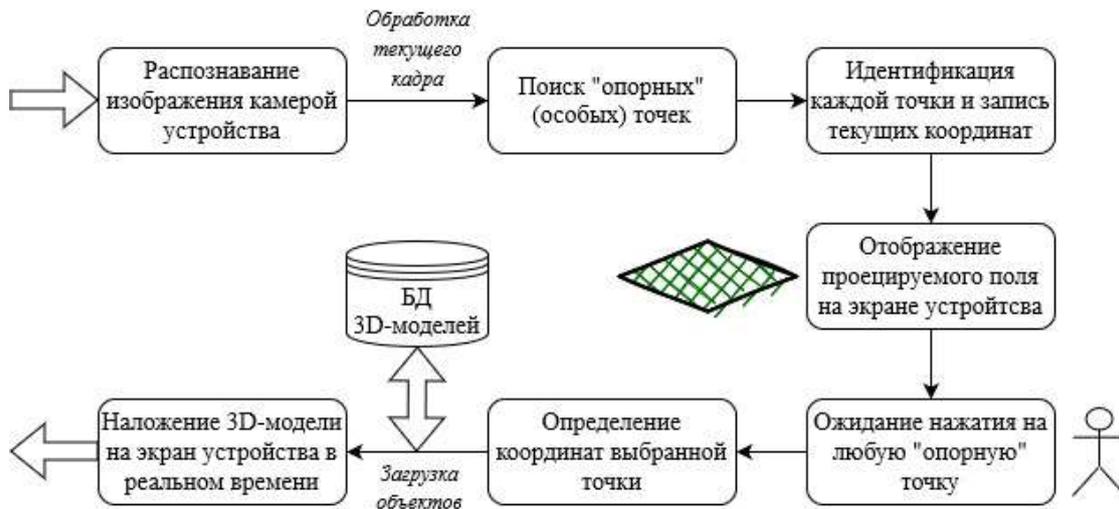


Рисунок 7 – Структура создания AR-технологии с помощью ARCore

### Тестирование разработанного ПО в среде Android Studio

Для создания трехмерной модели использовалось программное обеспечение Blender, созданное для проектирования трехмерной компьютерной графики. ПО имеет большой набор функций: средства моделирования, анимация, симуляция процессов, постобработка видео со звуком. Созданная модель в виде 3D-текста показана на рис.7 и рис.8.



Рисунок 7 – Полигональная сетка

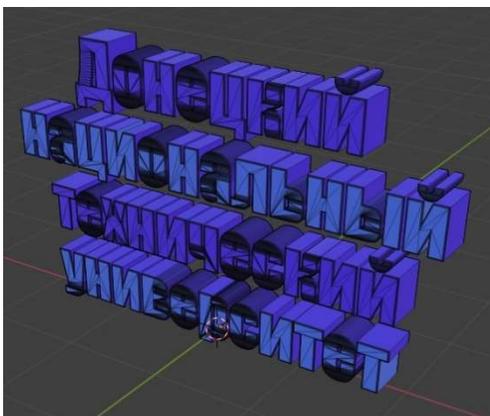


Рисунок 8 – Текстурирование модели

Ниже приведен листинг функции для визуализации 3D-модели на экране устройства.

```
private void addModelToScene(Anchor
anchor, ModelRenderable
modelRenderable) {
    AnchorNode node = new
AnchorNode(anchor);
    TransformableNode transformableNode
= new
TransformableNode(arFragment.getTransfo
rmationSystem());
    transformableNode.setParent(node);
    transformableNode.setRenderable(modelRe
nderable);
    arFragment.getArSceneView().getScene().
addChild(node);
    transformableNode.select();
}
```

Главный экран программы не содержит кнопку навигации, после запуска ПО на экране отображается жест, который пользователь должен выполнить, после чего продолжается работа. Наложение модели осуществляется после нажатия на соответствующую область (точку) на экране. Приложение с технологией дополненной реальности работает (как в вертикальном, так и горизонтальном положениях) без значительных затрат оперативной памяти и потребления энергии аккумулятора.

Работоспособность ПО тестировалась на пяти различных устройствах (смартфоны с разной версией Android, объемом оперативной памяти, процессором): Android 11 / 10 / 8.1 / 7.0.

Из представленных моделей программа успешно установилась и работала на версиях Android 11, 10, 8.1. Однако, значительное влияние на запуск ПО несет версия операционной системы, которая поддерживает настройки дополненной реальности. Даже при создании кроссплатформенного мобильного приложения (для более ранних версий Android),

AR-технологии не будут отображаться, поскольку в ОС нет данных настроек.

Быстродействие на трех устройствах показало одинаковые результаты. Проецируемая сетка из «опорных» точек отображается на экране устройства в течении 1-2 секунд (в зависимости от считываемого изображения). Трехмерная модель визуализируется и подвергается функциям масштабирования, перемещения, вращения на 360° вокруг своей оси и приближения камеры к объекту ДР без задержек. После запуска приложения на экране устройства отображается анимированная иконка, представленная на рис.9. Выполнение данного действия необходимо для предварительного сканирования пространства, а затем наложения проецируемой сетки.



Рисунок 9 – Запуск приложения

После передачи камерой текущего кадра в обработку на экране отображаются «опорные» точки (рис.10), которые визуализируются относительно текущего положения камеры в реальном мире.

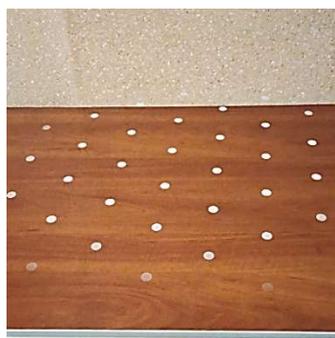


Рисунок 10 – Отображение «опорных» точек

При любом перемещении устройства (например, на сантиметры или метры) сетка из особых точек будет перемещаться и отображаться в зависимости от считываемой поверхности. Если навести камеру устройства в угол комнаты, то сетка будет визуализироваться не полностью, а только некоторые «опорные точки», на которые в данный момент времени можно наложить модель ДР.

На каждом устройстве выполнялись одинаковые действия по отношению к

наложенному объекту (загружается из базы приложения). Первой тестируемой функцией было масштабирование 3D-модели (рис.11 а, б). После проверки выполнялось вращение данного объекта вокруг своей оси, как в приближенном варианте, так и в отдаленном.

Затем осуществлялось перемещение 3D-объекта дополненной реальности (рис.12 а, б) через экран устройства с помощью специального жеста (текущее положение устройства осталось без изменений).

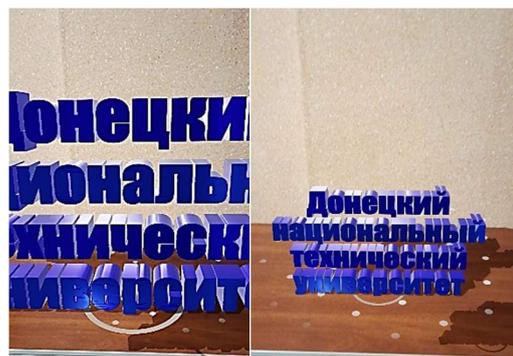


Рисунок 11 – Процесс масштабирования 3D-модели: а) уменьшение, б) увеличение



Рисунок 12 – Перемещение моделируемого объекта: а) приближение, б) отдаление

Следующая проверка заключалась в перемещении и вращении самого устройства: приближение к 3D-объекту, обзор модели с различных углов и ракурсов (рис.13 а-г). При максимальном приближении к трехмерной модели на экране устройства отображается качественная текстурированная модель с затенением. Смоделированная объемная модель в среде Blender реалистично отображает каждую деталь. Кроме этих функций можно размещать множество трехмерных моделей дополненной реальности по всей площади, которая будет сканироваться камерой устройства (рис.14 а, б). Одна 3D-модель может частично перекрываться иной, если проецируемая сетка «опорных» точек была размещена рядом с предыдущей.

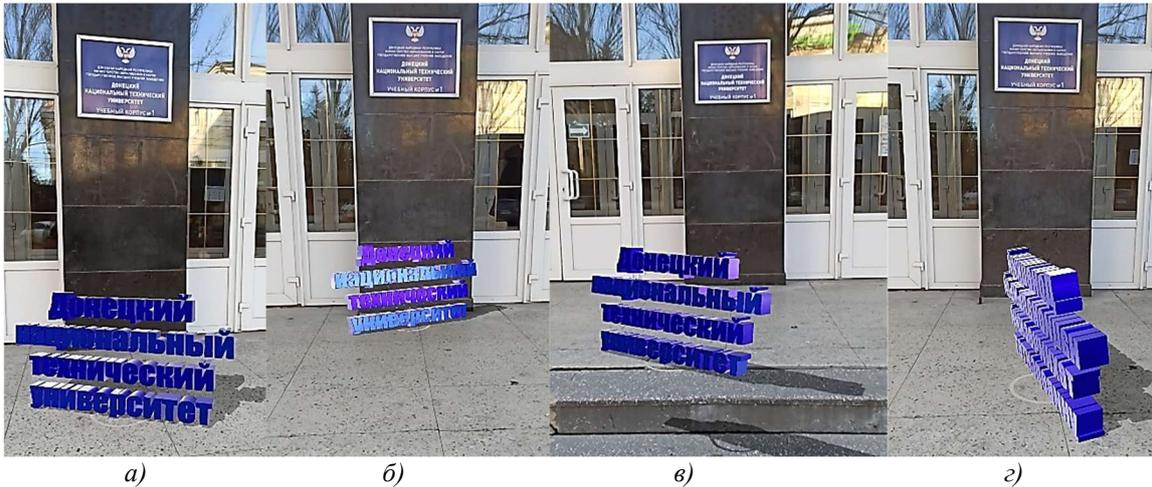


Рисунок 13 – Процесс вращения и перемещения устройства: а) приближение камеры к объекту, б) отдаление камеры от объекта, в) обзор модели с правого края, з) обзор модели с обратной стороны

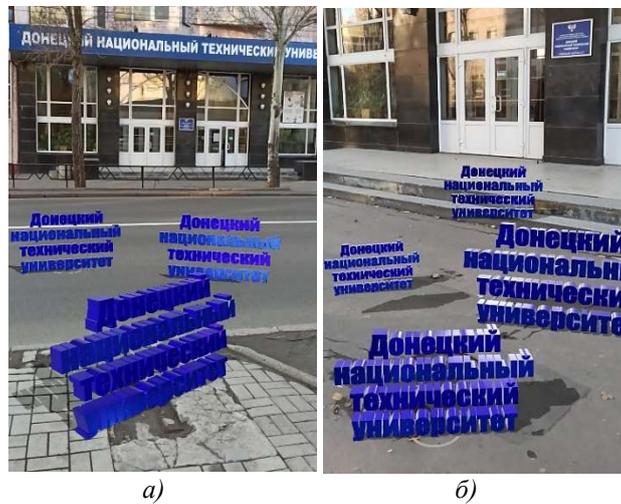


Рисунок 14 – Размещение множества 3D-моделей на экране: а) три модели поблизости, б) перекрытие модели

Проведенное тестирование показало, что разработанное ПО корректно выполняет все заявленные функции. Приложение без задержек и сбоев определяет сканируемую поверхность. Технология дополненной реальности исправно работает и визуализирует созданную модель на устройстве.

### Выводы

Технология дополненной реальности, благодаря своим уникальным свойствам и возможностям, является отдельным направлением в сфере информационных технологий. Результаты данного исследования показывают высокую степень актуальности и востребованности данной технологии в самых разных сферах жизни.

Внедрение дополненной реальности в сферу образования значительно упростит преподнесение материала (как теоретическая информация, так и практические занятия) и увеличит скорость понимания материала

обучающимися. Разработанная и протестированная система является основой для дальнейших исследований, направленные на разработку программы в среде Android Studio, которая будет использовать пространственные методы для наложения виртуальных объектов. ПО будет осуществлять работу через пользовательский интерфейс и выполнять обмен данными с облачной базой данных.

### Литература

1. Ткаченко, О. Н. Компьютерная визуализация как сфера реализации специалиста по информационным технологиям / О. Н. Ткаченко // Россия молодая: передовые технологии - в промышленность. – Омск, 2015. – № 3. – С. 108–111.
2. Ваганова, О. И Интерактивные средства обучения как эффективный инструмент образовательной деятельности / О. И. Ваганова, Д. А. Лошкарева // Балтийский гуманитарный журнал, 2020. – № 3(32). – Т. 2. – С. 135–139.

3. Галкин, Д. В. Эволюция пользовательских интерфейсов: от терминала к дополненной реальности / Д. В. Галкин, В. А. Сербин // Информатика. – Томск, 2013. – Вып.7. – С. 35–49.
4. Roitman, L. A Comparative Analysis of Augmented Reality Technologies and their Marketability in the Consumer Electronics Segment / L. Roitman, J. Shrager, T. Winograd // Journal of Biosensors & Bioelectronics, 2017. – Vol. 8. – 19 p.
5. Крахмаль, М. В. Анализ технологий для создания дополненной реальности / М. В. Крахмаль // Информатика и кибернетика: науч. журн. – Донецк : ДонНТУ, 2020. – №4 (22). – С.12–20.
6. Demidova, L. Augmented Reality and ARToolkit for Android: the First Steps / L. Demidova // SHS Web of Conferences, 2016. – Vol.29. – 4 p.
7. Обзор AR-библиотек для создания приложений с дополненной реальностью // Azoft. – URL: <https://www.azoft.ru/blog/biblioteki-dopolnenoj-realnosti-dlya-ar-prilozhenij/> (дата обращения: 21.10.2021).
8. Milsap, G. Advanced Rendering for Augmented Reality on Mobile Devices / G. Milsap, E. Bourland // 2011. – 6 p.
9. 2022 Trends to Watch: AR and VR // Omdia. – URL: <https://omdia.tech.informa.com/OM021776/2022-Trends-to-Watch-AR-and-VR> (дата обращения: 27.10.2021).
10. Кравцов, А. А. Совершенствование пользовательского интерфейса визуализации трехмерных объектов при помощи технологии дополненной реальности / А. А. Кравцов, В. И. Лойко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №100(06). – 13 с.
11. Bimber, O. Spatial Augmented Reality Merging Real and Virtual Worlds / O. Bimber, R. Raskar // A K Peters: CRC Press, 2005. – 392 p.
12. Крахмаль, М. В. Research of edge detection methods for objects in images / М. В. Крахмаль, Л. В. Соснина // Young scientists' researches and Achievements in science: материалы науч.-практ. конф. для молодых ученых, 15 апр. 2021, г. Донецк. – Донецк : ДонНТУ, 2021. – С. 106–113.
13. Bay, H. Speeded-Up Robust Features (SURF) / H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, L. V. Gool // Computer Vision and Understanding, 2020. – Vol.110, Issue 3. – P. 346–359.

*Аноприенко А. Я., Крахмаль М. В. Моделирование и визуализация трехмерной модели с применением технологии дополненной реальности. В статье рассматриваются современные системы и средства для разработки технологии дополненной реальности. Проанализированы библиотеки компьютерного зрения, которые наиболее подходят для создания AR-приложений в зависимости от их целей и задач. Приведена общая структура создания дополненной реальности на базе безмаркерных технологий, показана математическая модель детектора обнаружения особых точек. Реализована программа в среде разработки Android Studio, создана трехмерная модель в среде Blender. Произведено экспериментальное исследование приложения. Выполнен анализ полученных результатов по работоспособности программы. Поставлены задачи для дальнейшего исследования.*

**Ключевые слова:** дополненная реальность, библиотеки компьютерного зрения, трехмерное моделирование, визуализация, Android Studio, Blender.

*Anoprienko A., Krakhmal M. Modeling and visualization of a three-dimensional model using augmented reality technology. Modern systems and tools for the development of augmented reality technology are discussed in the article. The libraries of computer vision, which are most suitable for creating AR-applications, depending on their goals and objectives are analyzed. The general structure of creation of augmented reality based on markerless technologies is presented, a mathematical model of the detector for detecting special points is shown. The program in the Android Studio development environment is implemented, a three-dimensional model in the Blender environment is created. An experimental study of the application has been performed. The analysis of the results received has been completed. Tasks for further research are set.*

**Keywords:** augmented reality, computer vision libraries, three-dimensional modeling, visualization, Android Studio, Blender.

Статья поступила в редакцию 19.11.2021  
Рекомендована к публикации профессором Мальчевой Р. В.

## Разработка метода оптимального управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля

В.Г. Черников В.Н. Павлыш  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
[chernikov1210@gmail.com](mailto:chernikov1210@gmail.com)

### **Аннотация**

*Разработана методика формирования управляющего сигнала для системы ориентирования фотоэлектрического модуля на базе позиционного электропривода. Управление системой ориентирования реализовано на основе микропроцессорного контроллера промышленного исполнения Simatic S7-300. Эффективность предложенной методики подтверждена экспериментальными исследованиями на специально разработанном стенде. Применение предложенного закона управления позволяет существенно повысить энергоэффективность фотоэлектрической системы.*

### **Введение**

В условиях интенсивно развивающейся зеленой энергетики доля экологически чистой энергии в энергобалансе развитых стран неуклонно растет. За прошедшее десятилетие наибольшие темпы роста показывают электроэнергетические системы на базе ветрогенераторов и фотоэлектрических модулей. В связи с этим большое внимание уделяется разработке систем управления, способных повысить эффективность энергоустановок на базе возобновляемых источников энергии.

Приведенные в статье исследования позволяют разработать метод оптимального управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля. Для решения поставленной задачи предлагается применить программируемый логический контроллер с достаточной вычислительной мощностью. Основным критерием эффективности предложенного метода является увеличение выработки энергии фотоэлектрической системой.

**Целью исследования** является разработка метода оптимального управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля, проверка работоспособности предложенного метода на экспериментальной установке, а так же оценка повышения энергоэффективности фотоэлектрического модуля за счет применения предложенной методики управления.

### **Анализ литературных источников**

В [1] рассматриваются разновидности систем ориентирования фотоэлектрических модулей и проводится анализ их эффективности для различных географических мест установки.

В [2] рассмотрена структура системы регулирования положения на базе электропривода, выделены основные контуры регулирования, приводятся методы настройки

регуляторов, обосновывается необходимость применения задатчика положения в системе регулирования.

В [3] проанализированы преимущества применения систем векторного регулирования скорости двигателей переменного тока с использованием преобразователей частоты.

В [4] рассмотрены методы расчета плотности солнечной энергии, поступающей на наклонную поверхность фотоэлектрического модуля, в зависимости азимута и зенита солнца и положения модуля по отношению к земной поверхности.

В [5] рассмотрены примеры расчетов энергоэффективности различных систем ориентации фотоэлектрических модулей для различных географических координат расположения фотоэлектрической системы.

В [6] рассматриваются вопросы выбора оптимального интервала времени при включении системы ориентирования в течении светового дня, а так же приведены разновидности датчиков для оценки плотности солнечной энергии.

В [7] описывается взаимосвязь между плотностью солнечной энергии и током короткого замыкания фотоэлектрической ячейки, которая позволяет применить метод не прямой оценки интенсивности солнечной инсоляции.

В [8] проводится оценка влияния таких внешних факторов, как плотность солнечного излучения и температура фотоэлектрического модуля, на основные параметры его вольт-амперной характеристики.

В [9] описана структура аппаратной конфигурации программируемого логического контроллера серии Simatic, приведен основной набор команд для создания программ пользователя на языке STEP 7, рассмотрены возможности коммуникации микропроцессорной системы с исполнительными устройствами по информационной сети.

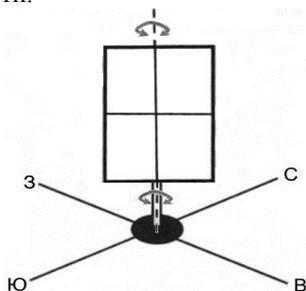
В [10] приведена методика расчета повышения энергоэффективности фотоэлектрического модуля за счет применения различных систем ориентации для географических координат г. Донецк.

### Постановка задачи исследования

Разработка методики формирования сигнала управления для системы ориентирования фотоэлектрического модуля на базе позиционного электропривода. Программная реализация компонентов системы управления ориентацией на основе микропроцессорного контроллера. Проверка работоспособности предложенной методики на экспериментальном стенде.

### Основное содержание и результаты работы

Анализ литературных источников позволил выделить основные разновидности систем ориентирования фотоэлектрических модулей. Во-первых, это одноосные системы с горизонтальной или вертикальной осью, пример одноосной системы с вертикальной осью показан на рис.1. В случае вертикальной оси поверхность модуля может быть наклонена на фиксированный угол по отношению к земной поверхности.



Риснок 1 – Одноосная система ориентирования с вертикальной осью

Во-вторых, это одноосные системы с наклонной осью по отношению к поверхности земли (см. рис. 2). В таких системах плоскость модуля, вращаясь одним двигателем вокруг наклонной оси, совершает одновременный поворот в горизонтальной и вертикальном направлениях.

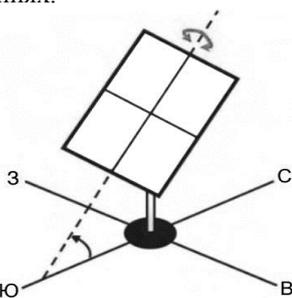


Рисунок 2 – Система ориентирования с наклонной осью

В третьих, это двухосные системы, в которых наличие двух двигателей обеспечивает одновременное вращение модуля относительно горизонтальной и вертикальной осей (см. рис. 3).

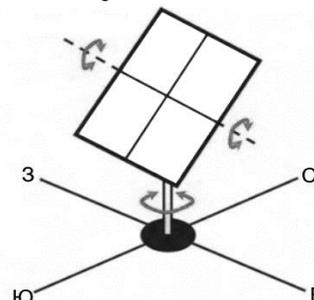


Рисунок 3 - Двухосная система ориентирования

При изготовлении экспериментального стенда предпочтение было отдано системе ориентирования с наклонной осью. Поскольку, как уже упоминалось, в этой системе один двигатель обеспечивает поворот модуля в горизонтальном и вертикальном направлениях. При этом, с точки зрения конструктивного решения, двигатель с закрепленной на валу шестерней вращает полудиск, который наклонен к земной поверхности на угол  $\beta$ . Поверхность модуля закреплена перпендикулярно поверхности полудиска (см. рис. 4).

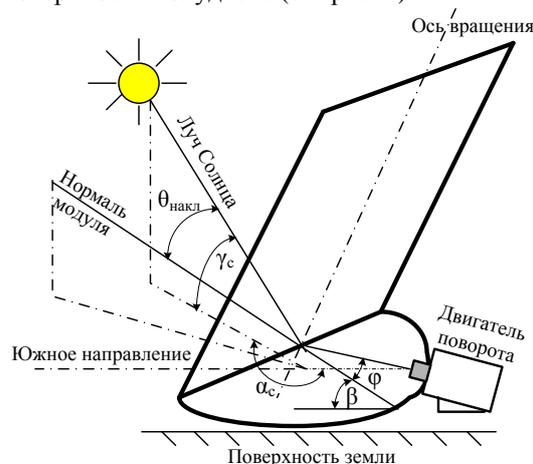


Рисунок 4 – Конструкция экспериментального стенда с наклонной осью вращения модуля.

На рисунке показаны следующие углы:  $\varphi$  – угол поворота полудиска относительно его центральной оси,  $\beta$  – угол наклона плоскости полудиска к земной поверхности,  $\alpha_c$  – азимут Солнца,  $\gamma_c$  – угол высоты Солнца над горизонтом,  $\theta_{накл}$  – угол падения солнечных лучей на наклонную поверхность модуля, т.е. угол между нормалью модуля и направлением на Солнце. Используя геометрические соотношения, можно доказать, что косинус угла  $\theta_{накл}$  может быть вычислен по формуле:

$$\cos \theta_{накл} = \cos \varphi \cdot (\sin \gamma_c \cdot \sin \beta - \cos \gamma_c \cdot \cos \alpha_c \cdot \cos \beta) - \cos \gamma_c \cdot \sin \alpha_c \cdot \sin \varphi. \quad (1)$$

В данном случае оптимальный метод управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля подразумевает определение такого угла поворота полудиска  $\varphi_{опт}$ , при котором угол  $\theta_{накл}$  между направлением на солнце и нормалью модуля будет минимальным. Тогда солнечные лучи будут попадать на поверхность модуля как можно ближе к перпендикулярному направлению и энергоотдача модуля будет максимальной.

Для того, чтобы определить значение оптимального угла  $\varphi_{опт}$ , проведем исследование функции, описанной формулой (1) на экстремум, т.е. приравняем производную  $d(\cos\theta_{накл})/d\varphi$  нулю. Это позволит определить значение  $\varphi_{опт}$ , при котором значение косинуса угла  $\theta_{накл}$  будет максимальным, т.е. сам угол  $\theta_{накл}$  будет иметь минимальное значение. Для удобства введем дополнительные обозначения переменных

$$d = \sin \gamma_c \cdot \sin \beta - \cos \gamma_c \cdot \cos \alpha_c \cdot \cos \beta. \quad (2)$$

$$q = \cos \alpha_c \cdot \sin \gamma_c. \quad (3)$$

Тогда получим

$$\varphi_{опт} = \arccos \left( \frac{d}{\sqrt{d^2 + q^2}} \right). \quad (4)$$

Таким образом, для вычисления оптимального угла поворота полудиска достаточно знать углы положения Солнца -  $\gamma_c$  и  $\alpha_c$ , а так же угол наклона полудиска к земной поверхности -  $\beta$ . Для вычисления углов положения солнца воспользуемся предложенной в [4] методикой. Сначала рассчитаем параметр  $J$ , связанный с номером дня в году

$$J = 360^\circ \cdot \frac{\text{День года}}{\text{Число дней в году}}. \quad (5)$$

Далее рассчитаем солнечное склонение -  $\delta$

$$\delta = 0,3948 - 23,2559 \cdot \cos(J + 9,1^\circ) - 0,3915 \times \times \cos(2 \cdot J + 5,4^\circ) - 0,1764 \cdot \cos(3 \cdot J + 26^\circ). \quad (6)$$

Рассчитаем уравнение времени, которое учитывает изменение длительности светового дня.

$$t_{ep} = 0,0066 + 7,3525 \cdot \cos(J + 85,9^\circ) + 9,9359 \times \times \cos(2 \cdot J + 108,9^\circ) + 0,3387 \cdot \cos(3 \cdot J + 105,2^\circ). \quad (7)$$

Далее рассчитаем значение среднего местного времени -  $СМВ$

$$СМВ = МВ - ЧП + 4 \cdot \lambda, \quad (8)$$

где  $МВ$  - местное время, час;  $ЧП$  - часовой пояс;  $\lambda$  - долгота местности, градусы.

На основании значений  $СМВ$  и  $t_{ep}$  определим реальное местное время -  $РМВ$ .

$$РМВ = СМВ + t_{ep}. \quad (9)$$

На основании параметра  $РМВ$  рассчитаем значение часового угла -  $\omega$ .

$$\omega = (12 - РМВ) \cdot 15. \quad (10)$$

Теперь, на основании рассчитанных выше параметров и географической широты местности -  $\varphi$ , можно рассчитать угол высоты Солнца над горизонтом -  $\gamma_c$  и азимут Солнца -  $\alpha_c$ .

$$\gamma_c = \arcsin(\cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta). \quad (11)$$

$$\alpha_c = 180^\circ - \arccos \frac{\sin \gamma_c \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_c \cdot \cos \varphi}, \quad (12)$$

для  $РМВ < 12:00$  ч

$$\alpha_c = 180^\circ + \arccos \frac{\sin \gamma_c \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_c \cdot \cos \varphi}, \quad (13)$$

для  $РМВ > 12:00$  ч.

Таким образом, формулы (5-13) позволяют вычислить все необходимые величины для расчета оптимального угла поворота  $\varphi_{опт}$ .

Для реализации системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля был использован микропроцессорный контроллер - Simatic S7-300. В качестве привода поворота использовался преобразователь частоты Micromaster 440, который обеспечивает вращение асинхронного электродвигателя.

Основные аппаратные и программные компоненты системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля приведены на рис. 5.

Выходные данные системного таймера позволяют рассчитать параметр  $J$  по формуле (5) и значение среднего местного времени -  $СМВ$  по формуле (8), что позволяет рассчитать оптимальный угол поворота модуля  $\varphi_{опт}$ . Блок управления поворотом модуля формирует последовательность подачи заданий на систему ориентирования. При этом формирования сигнала задания на угол поворота модуля может происходить как в автоматическом режиме, когда интервал выдачи задания определяется сигналом программного тактового генератора, так и в полуавтоматическом режиме, когда момент подачи задания определяется оператором. Выбор режима осуществляется переключателями на пульте управления. Посредством датчика положения обеспечивается плавное перемещение механизма поворота с заданными значениями скорости перемещения и ускорения. Далее сигнал задания поступает на регулятор положения, который совместно со звеном предупреждения формирует сигнал заданного значения скорости перемещения механизма ориентирования.

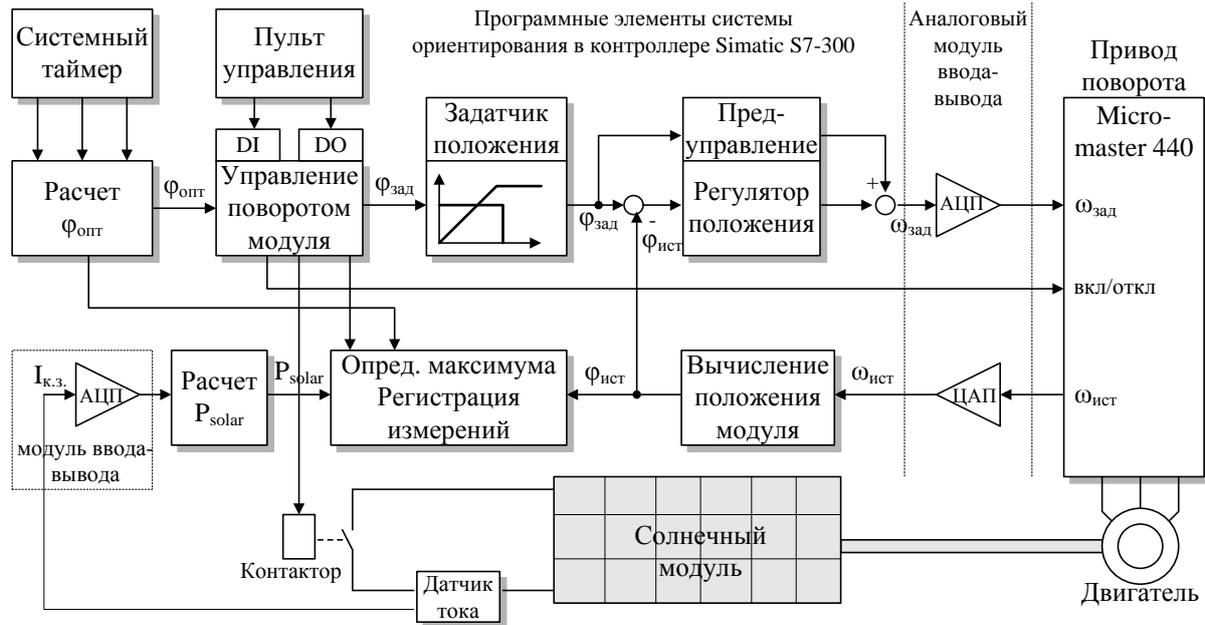


Рисунок 5 - Структура системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля на базе программируемого логического контроллера

Внутри звена преуправления происходит вычисление производной от сигнала задания на угол поворота  $\varphi_{зад}$ , что позволяет эффективней формировать сигнал задания на скорость и увеличить быстродействие контура позиционирования. Цифровой сигнал заданного значения скорости  $\omega_{зад}$  через АЦП контроллера передается в аналоговой форме на привод поворота модуля.

Реальное значение скорости вращения привода  $\omega_{ист}$  оценивается импульсным датчиком, установленным на валу двигателя со степенью точности 2048 импульсов на оборот. Сигналы импульсного датчика обрабатываются преобразователем частоты Micromaster 440 и в аналоговой форме поступают на ЦАП контроллера, который оцифровывает значение сигнала скорости вращения двигателя поворота. В дальнейшем, на базе цифрового значения скорости, можно вычислить реальный угол поворота фотоэлектрического модуля  $\varphi_{ист}$ , который поступает в качестве обратной связи на регулятор положения.

При этом необходимо отметить, что нулевое значение угла поворота фотоэлектрического модуля присваивается такому положению модуля, когда его поверхность сориентирована перпендикулярно южному направлению. Нулевое значение угла поворота модуля фиксируется в системе управления соответствующим конечным выключателем. Таким образом, поворот модуля левее южного направления будет соответствовать отрицательным углам поворота, а поворот модуля правее южного направления будет соответствовать положительным углам поворота. Полный ход механизма ориентации

соответствует диапазону углов поворота от  $-85^\circ$  до  $+85^\circ$ . При этом крайние положения механизма поворота фиксируются двумя соответствующими конечными выключателями для предотвращения выхода приводной шестерни за пределы полудиска.

Расчет реального угла поворота фотоэлектрического модуля  $\varphi_{ист}$  происходит на базе передаточной функции дискретного интегратора, которая трансформируется в разностное уравнение

$$\varphi_{ист} = \frac{b_0}{1 - a_1 \cdot z^{-1}} \cdot \omega_{ист} \quad (14)$$

$$\varphi_{ист}[n] = k_I \cdot T \cdot \omega[n] + \varphi[n-1], \quad (15)$$

где  $k_I$  - коэффициент интегратора;  $T$  - период дискретности интегратора.

Ниже приводится пример реализации программного блока вычисления реального угла поворота модуля на языке программирования Step 7 в виде нескольких сегментов программы.

```

Netzwerk 5: Масштабирование скорости
L   #w_ist
L   13824
-I
T   #w_ist_2
T   MW 30
L   #w_ist_2
ITD
DTR
T   #w1
L   1.047000e+001
*R
L   1.382400e+004
/R
L   -1.000000e+000
*R
T   #w
    
```

▣ **Netzwerk 6** : Дискретный интегратор

```
L      #ω
L      #T
+R
L      #Ki
+R
L      #Fi_n1
+R
T      #Fi_n1
T      #Fi
SPA   m01
```

▣ **Netzwerk 7** : Обнуление переменных

```
m00: L      0.000000e+000
      T      #Fi_n1
      T      #Fi
m01: NOP   0
```

Кроме этого, приведенная на рис. 5 система управления позволяет рассчитывать мгновенные значения мощности фотоэлектрического модуля  $P_{solar}$  на основании его тока короткого замыкания, т.е. без использования какого либо фотоэлектрического датчика. Это происходит следующим образом: контактор по команде контроллера замыкает цепь солнечного модуля, быстродействующий датчик тока на основе эффекта Холла замеряет ток короткого замыкания модуля, сигнал датчика тока поступает на АЦП контроллера, после чего оцифрованное значение тока может быть использовано для расчета значения максимальной мощности фотоэлектрического модуля  $P_{solar}$  по нижеследующей формуле.

$$P_{solar} = \frac{P_{solarN}}{I_{кзN}} \cdot I_{кз}, \quad (16)$$

где  $P_{solarN}$  и  $I_{кзN}$  - максимальная мощность и ток короткого замыкания модуля соответственно при стандартной плотности солнечной энергии  $E_s=1000\text{Вт/м}^2$ .

Таким образом, блок регистрации измерений в заданные моменты времени позволяет сохранять в памяти контроллера значения мощности фотоэлектрического модуля  $- P_{solar}$  на заданных углах его поворота относительно южно-направленной оси полудиска  $- \varphi$ , а так же сами значения этих углов. Эта способность системы управления дает ей возможность работать в исследовательском режиме работы. В этом режиме сначала мощность фотоэлектрического модуля фиксируется системой регистрации при строгой ориентации модуля на юг и затем при повороте модуля на оптимальный угол  $- \varphi_{opt}$ , рассчитанный системой управления. При таком методе регистрации измерений можно провести сравнительный анализ, который покажет, какой прирост мощности дает использование системы ориентирования по сравнению с жестко

закрепленным и сориентированным на юг фотоэлектрическим модулем.

Кроме регистрации мощности в указанных фиксированных положениях модуля, можно проводить регистрацию измерений прямо во время его движения с коротким временным интервалом записи в память, например каждые 20 ms. При этом диапазон изменения угла поворота целесообразно установить в пределах от  $\varphi=0^\circ$  (ориентация на юг) до  $\varphi=\varphi_{onm}+15^\circ$ . Во время поворота модуля можно использовать алгоритм трекера максимальной мощности на исследуемом секторе поворота с последующей записью в память значения максимальной зарегистрированной в данном секторе мощности и угла поворота, соответствующего этой мощности. Дальнейшее сравнение зарегистрированного угла поворота, соответствующего максимальной мощности, с расчетным значением оптимального угла поворота модуля  $- \varphi_{onm}$  позволит сделать вывод о корректности предложенного метода расчета оптимального угла для ориентации фотоэлектрического модуля на максимальный поток солнечной энергии.

Временная диаграмма, демонстрирующая процесс регистрации основных параметров системы во время измерительного цикла приведена на рис. 6. При этом измерительным циклом можно считать процесс поворота модуля с исходной позиции при  $\varphi=0^\circ$  до позиции  $\varphi=\varphi_{onm}+15^\circ$  и возврат в исходное положение (ориентация на юг). Процесс записи в память измеренных параметров происходит в моменты появления активирующих импульсов (см. рис. 6).

Первый импульс появляется через секунду после включения контактора в цепи фотоэлектрического модуля, в этот момент запоминается значение мощности модуля  $- P_{solar}$  в исходной позиции при  $\varphi=0^\circ$  и время измерения  $- t$ . Сразу после этого начинается поворот модуля в позицию  $\varphi=\varphi_{onm}+15^\circ$ . В процессе движения, при  $\varphi=\varphi_{onm}$ , появляется второй импульс и происходит регистрация мощности модуля  $- P_{solar}$  в позиции  $\varphi_{onm}$  и значения угла  $- \varphi_{onm}$ . Третий импульс появляется в момент достижения позиции  $\varphi=\varphi_{onm}+15^\circ$ . В этот момент фиксируется максимальная мощность модуля, зарегистрированная трекером в пройденном секторе  $- P_{solar\ max}$  и угол поворота, на котором эта мощность была зафиксирована  $- \varphi_{max}$ . В процессе регистрации все данные записываются в соответствующие блоки данных. При регистрации используется метод косвенной адресации, при котором адрес ячейки памяти в блоке данных, куда будет произведена запись, задается в адресном регистре. При окончании измерительного цикла значение адресного регистра увеличивается на 32 бита и подготавливается к следующей записи в память.

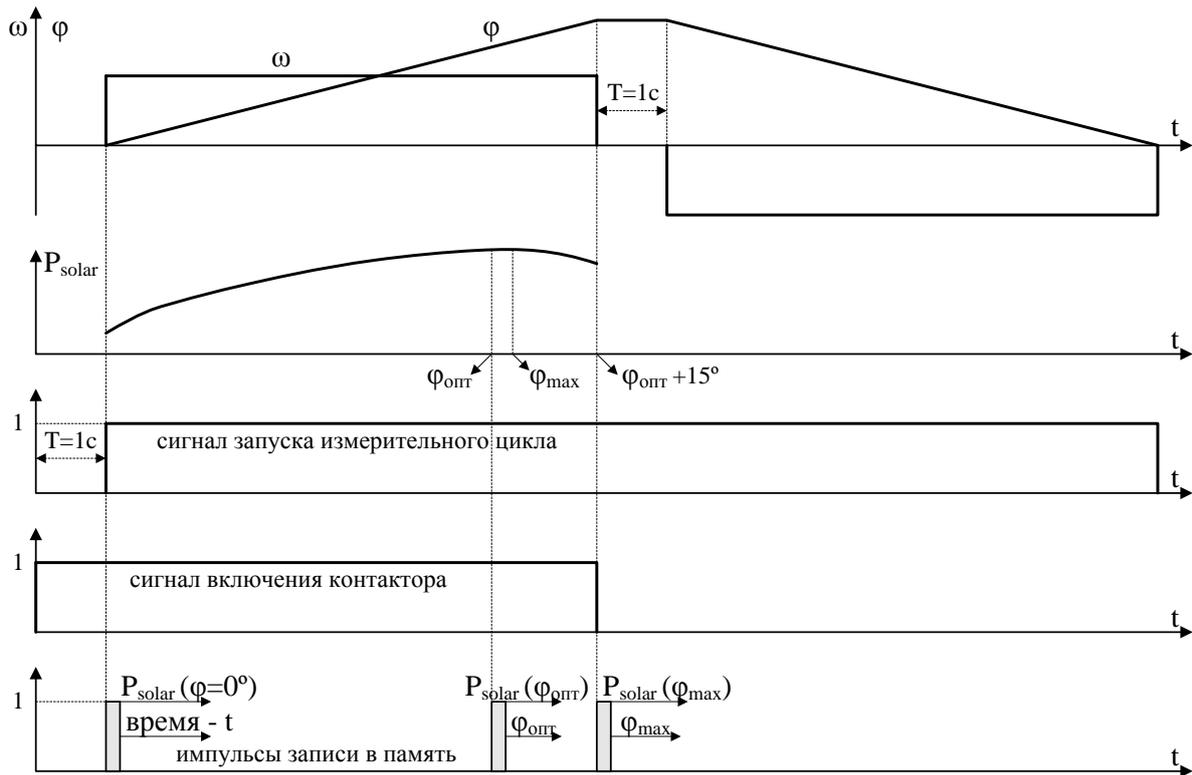


Рисунок 6 - Временная диаграмма измерительного цикла при регистрации основных параметров

Измерительный цикл заканчивается, когда модуль возвращается в исходное положение -  $\varphi=0^\circ$ . Проверка правильности предложенной методики проводилась на экспериментальном стенде 27 октября в ясный безоблачный день на открытой площадке при отсутствии затенения. Интервал проведения измерительных циклов составлял 10 минут. Пример фрагмента программы, который позволяет регистрировать мощность модуля и угол его поворота в точке максимума, приведен ниже.

▣ **Netzwerk 9** : Замер  $E_{solar\_max}$

```

U      T      5
FP     M      5.2
=      #imp_zamer_max
UN     #imp_zamer_max
SPB    m02
AUF    DB     150
LAR1   MD     150
L      #E_solar_max
T      DBD [AR1,P#0.0]
L      P#4.0
+AR1
TAR1   MD     150
AUF    DB     160
LAR1   MD     154
L      #Fi_max
T      DBD [AR1,P#0.0]
L      P#4.0
+AR1
TAR1   MD     154
SPA    m02
    
```

Результаты регистрации угла поворота модуля в точке максимальной мощности -  $\varphi_{max}$  и в расчетной оптимальной точке -  $\varphi_{опт}$  приведены на рисунке 7. Они показывают, что отличие значения расчетного оптимального угла поворота модуля -  $\varphi_{опт}$  и значения угла поворота в точке максимальной мощности не превышает  $1^\circ$ , т.е. они практически совпадают на полуторачасовом измерительном интервале. Небольшая разница между этими углами может быть объяснена погрешностью при работе АЦП контроллера, которая по данным производителя может составлять около 1%.

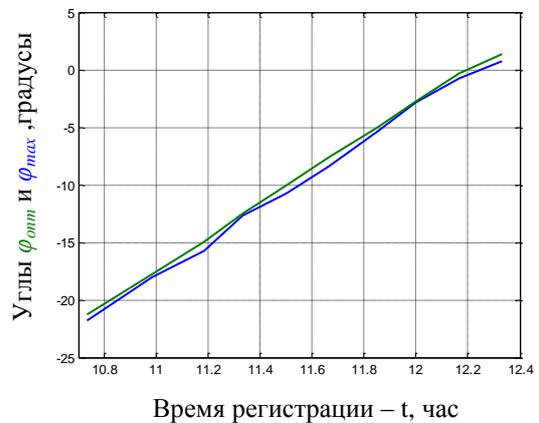


Рисунок 7 - Зарегистрированные значения угла поворота модуля в расчетной оптимальной точке -  $\varphi_{опт}$  и точке макс. мощности -  $\varphi_{max}$ .

На рис. 8 приведены значения зарегистрированной мощности фотоэлектрического модуля в трех позициях: при фиксированной ориентации на юг ( $\varphi=0^\circ$ ), в расчетной позиции ( $\varphi=\varphi_{opt}$ ) и в позиции достижения максимальной мощности ( $\varphi=\varphi_{max}$ ). Они показывают, что значения мощности модуля в расчетной точке ( $P_{solar,opt}$ ) и в точке максимальной мощности ( $P_{solar,max}$ ) также практически совпадают, однако они могут быть существенно больше мощности фиксированно закрепленного модуля с ориентацией на юг,  $P_{solar,0}$  при значительном отклонении солнца от южного направления.

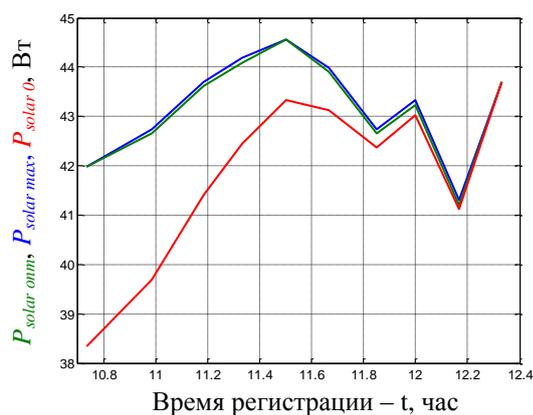


Рисунок 8 - Зарегистрированные значения мощности модуля в расчетной оптимальной точке –  $P_{solar,opt}$ , точке максимальной мощности –  $P_{solar,max}$  и при ориентации на юг –  $P_{solar,0}$

Результаты исследования, показанные на рисунках 7 и 8, позволяют утверждать, что для ориентации фотоэлектрического модуля на максимальный поток солнечной энергии в ясную солнечную погоду нет необходимости применять алгоритм трекера максимальной мощности, а достаточно воспользоваться формулой (4), которая на основании углов положения солнца и угла наклона оси вращения модуля позволит рассчитать оптимальный угол поворота модуля –  $\varphi_{opt}$ . Углы положения солнца ( $\alpha_c$  – азимут Солнца и  $\gamma_c$  – угол высоты Солнца над горизонтом) рассчитываются на основании данных системного таймера и географических параметров местности установки модуля. Исключение алгоритма трекера максимальной мощности позволит снизить энергозатраты на работу позиционного привода поворота модуля.

Выяснение будут ли приведенные утверждения так же справедливы для облачной погоды, когда положение светового пятна на небе может смещаться за счет рассеяния и отражения облаками, потребует дальнейших исследований.

После сделанных выводов остается выяснить, с какой периодичностью система ориентирования должна включаться и

поворачивать модуль вслед за перемещающимся по небосклону Солнцем, чтобы, с одной стороны, избежать частых включений, а, с другой стороны, получать практически максимальную энергию от светового потока. Для решения этой задачи была использована способность системы регистрации записывать значения мощности модуля и угол его поворота с интервалом 20 ms прямо во время перемещения модуля в процессе измерительного цикла. График зависимости мощности модуля от угла его поворота, снятый во время движения, приведен на рис. 9.



Рисунок 9 - График зависимости мощности модуля от угла его поворота

Пиковое значение мощности на рис. 9 соответствует оптимальному углу поворота модуля –  $\varphi_{opt}$ . На графике видно, что отклонение мощности на 1% от пикового значения достигается при отклонении угла поворота модуля от оптимального значения на  $7^\circ$ . На рисунке 7 можно увидеть, что на  $7^\circ$  Солнце перемещается приблизительно за 0,5 часа. Отсюда можно сделать заключение о том, что, если установить предел снижения мощности фотоэлектрического модуля за счет дискретности процесса слежения за Солнцем на уровне 1%, то включать систему ориентирования и подворачивать модуль вслед за солнцем нужно не реже, чем каждые полчаса. Это и будет оптимальной периодичностью включения системы ориентирования.

## Выводы

Материалы проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что оптимальный метод управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля заключается в формировании заданного угла поворота модуля в соответствии с законом, определяемым формулой (4), с периодичностью включения системы ориентирования – 0,5 часа. Для вычисления оптимального угла поворота

модуля достаточно данных системного таймера контроллера и географических координат местности. В безоблачную погоду этот метод позволяет исключить использование трекера максимальной мощности, что снижает затраты энергии на работу позиционного привода в процессе трекинга. Предложенный метод оптимального управления позволяет достичь максимальной энергоэффективности использования фотоэлектрического модуля в течение светового дня.

### **Литература**

1. Wesselak Viktor. Photovoltaik / Viktor Wesselak. – Berlin: Springer, 2012. – 129 с.
2. Gross Hans. Elektrische Vorschubantriebe in der Automatisierungstechnik. Grundlagen Berechnung, Bemessung / Hans Gross. - Erlangen: Siemens Corporate Publishing, 2012. - 228 с.
3. Черников, В. Г. Сравнительная характеристика способов частотного регулирования асинхронного электропривода / В. Г. Черников, А. А. Горбунов, В. И. Калашников // Материалы конференции «ЭНЕРГИЯ-2020». – Иваново: ИГЭУ, 2020. – Т. 4. - С. 3-8.
4. Куашнинг, Ф. Системы возобновляемых источников энергии. Технология, расчеты, моделирование: учебник / Ф. Куашнинг. – Астана: Фолиант, 2013. – 480 с.

5. Елистратов, В. В. Солнечные энергоустановки. Оценка поступления солнечного излучения: учеб. пособие / В. В. Елистратов, Е. С. Аронова.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 164 с.

6. Китаева, М. В. Аппаратно-программный комплекс для контроля оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей на максимальный поток солнечного излучения: дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Китаева Мария Валерьевна. – Томск. 2014. – 139 с.

7. Wesselak V. Handbuch Regenerative Energietechnik / V. Wesselak, T. Schabbach. – Berlin: Springer, 2017. – 943 s.

8. Mertens, K., Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice / K. Mertens, , G. Roth. - Wiley & Sons Ltd, 2014. – 294 s.

9. Berger, H. Automating with STEP 7 in LAD and FBD fur SIMATIC S7-300/400 Programmable Controllers / H. Berger. – Erlangen:: Publicis Publishing, 2012. – 540 s.

10. Горбунов, А. А. Оценка повышения энергоэффективности фотоэлектрических модулей посредством применения системы ориентации / А. А. Горбунов, В. Г. Черников // Молодая мысль: наука, технологии, инновации. Материалы XII (XVIII) Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов аспирантов и молодых ученых. – Братск: Изд-во БрГУ, 2020. – С. 231-235.

**Черников В.Г., Павлыш В.Н. Разработка метода оптимального управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля.** Разработана методика формирования управляющего сигнала для системы ориентирования фотоэлектрического модуля на базе позиционного электропривода. Управление системой ориентирования реализовано на основе микропроцессорного контроллера промышленного исполнения Simatic S7-300. Эффективность предложенной методики подтверждена экспериментальными исследованиями на специально разработанном стенде. Применение предложенного закона управления позволяет существенно повысить энергоэффективность фотоэлектрической системы.

**Ключевые слова:** фотоэлектрический модуль, система ориентирования, позиционный электропривод, программируемый логический контроллер, аналого-цифровой преобразователь, контур регулирования.

**Chernikov V., Pavlysh V. Development of a method for optimal control of the orientation system of a photovoltaic module.** A method for generating a control signal for the orientation system of a photovoltaic module based on a positional electric drive has been developed. The control of the orientation system is implemented on the basis of a microprocessor controller of industrial design Simatic S7-300. The effectiveness of the proposed technique has been confirmed by experimental studies on a specially designed stand. The application of the proposed control law makes it possible to significantly increase the energy efficiency of the photovoltaic system.

**Keywords:** photoelectric module, orientation system, positional electric drive, programmable logic controller, analog-to-digital converter, control loop.

Статья поступила в редакцию 09.12.2021  
Рекомендована к публикации профессором Зори С. А.

## Реализация машинного обучения в интеллектуальной системе процесса баротерапии

Н. М. Кравченко, В. В. Бондарчук, Т. Д. Ключанова  
Донецкий институт проблем искусственного интеллекта  
отдел распознавания зрительных образов

[natali.kravchenko70@mail.ru](mailto:natali.kravchenko70@mail.ru), [vv\\_bondar@mail.ru](mailto:vv_bondar@mail.ru), [kklushanova@mail.ru](mailto:kklushanova@mail.ru)

### **Аннотация**

*Выполнен аналитический обзор современных научных исследований по вопросу автоматизации процесса баротерапии, который подтвердил актуальность проблемы, ее соответствие приоритетным научным направлениям в медицине. Представлена реализация машинного обучения в интеллектуальной системе процесса баротерапии. Приведены фрагменты программного кода алгоритма дерева решений. Разработанная экспертная система поддержки принятия решений для автоматизации процесса баротерапии успешно прошла предварительные испытания и опытную эксплуатацию в Республиканском центре профпатологии и реабилитации.*

### **Введение**

Синергия междисциплинарных исследований в области искусственного интеллекта охватывает фундаментальные и прикладные научные исследования, стратегические приложения, фокусируется на разработке цифровых платформ с возможностями интеллектуальных вычислений. Инструментальные средства обработки интеллектуальной информации, современных технологий вычислений основаны на альтернативных механизмах обработки информации для создания интеллектуальных цифровых паспортов всех сфер социально-экономического развития. Глобальный вызов искусственного интеллекта цифрового развития осуществлен в интеллектуальных системах, интеллектуальных сервисных агентах и крупномасштабных интеллектуальных инфраструктурах, включая интеллектуальную медицину [1-4]. Аналитический обзор современных научных исследований по вопросу автоматизации процесса баротерапии подтвердил актуальность проблемы, ее соответствие приоритетным научным направлениям в медицине [5].

**Цель работы** заключается в разработке алгоритмов косвенной критериальности, при которой контролируют режимы работы барокамеры в зависимости от реального состояния variability сердечного ритма, что позволяет уменьшить динамические действия процесса гипербарической оксигенации, исключить небезопасные тревожные ситуации или приостановить динамику процесса, и тем самым поддержать устойчивую работу системы с мощными инструментами лечения; таким

образом, обеспечивается взаимная адаптация объекта, окружающей среды и измерительной системы.

### **Основное содержание работы**

Разработана экспертная система поддержки принятия решений процесса баротерапии, которая представляет собой программный комплекс [6-8]: систему сбора, обработки информации и принятия решений в процессе гипербарической оксигенации [9-12].

В настоящее время в различных областях знания успешно применяют методы машинного обучения. Машинное обучение, как часть задач классификации интеллектуального анализа данных для процесса приобретения знаний, предполагает выявление эмпирических закономерностей во входных данных и их использование для построения прогнозов, принятия решений. Применение методов машинного обучения для решения задач требует обработки больших объемов исходной информации.

В процессе лечения пациентов методом баротерапии на определенных этапах есть необходимость принятия решений: выбора режима работы барокамеры на первом сеансе лечения и последующей корректировки режима в соответствии с состоянием пациента во время сеанса. Для выбора оптимальных настроек аппаратуры, наилучшим образом подходящих конкретному больному, в зависимости от его диагноза, общего состояния, сопутствующих заболеваний, могут быть полезны известные результаты лечения пациентов с подобными показателями, проходивших процедуры терапии ранее.

Анализ причинно-следственных зависимостей процесса баротерапии проведен на базе реальных данных (фрагмент базы - около 4000 сеансов), предоставленных Донецким центром гипербарической оксигенации, в котором хранятся данные о сеансах баротерапии за несколько десятков лет.

Данные о состоянии пациентов во время сеансов были получены на оборудовании Cardio+ и зафиксированы в базе данных программного обеспечения Unicard. Для рассматриваемой задачи (анализ вариабельности сердечного ритма) необходима информация о длительности интервалов между сердечными сокращениями (RR-интервалов), записанными в течение всего сеанса, разбитого на пятиминутные интервалы.

В разработанном в ГУ ИПИИ программном обеспечении реализован импорт информации из базы данных Unicard. Из таблиц форматов MS Access считываются данные о пациентах, проходивших курс лечения в центре ГБО, и проведенных сеансах лечения (используется технология ActiveX Data Objects), а информация о длительности RR-интервалов – из соответствующих бинарных файлов.

Кроме этого, в приложении используются данные из журналов сеансов, которые сотрудниками центра ГБО подготовлены в формате таблиц MS Excel, величина давления в барокамере, время компрессии, изопрессии, декомпрессии, температура. Доступ к этой информации обеспечивается средствами Microsoft OLE.

Вся полученная информация сохраняется в базе данных и используется для дальнейших расчетов:

- определения показателей вариабельности сердечного ритма;
- оценки динамики состояния пациента в ходе лечебного курса.

Впоследствии на основе результатов анализа ВСР в ходе сеансов, а также данных о пациентах и режимах работы барокамеры по алгоритму C4.5 строится дерево решений, фрагмент построения которого представлен на рис.1. Это позволяет выбрать наилучшую стратегию лечения вновь поступающих больных:

- выбор первоначального режима работы барокамеры (при первом сеансе);
- корректировка настроек аппаратуры в последующих сеансах баротерапии.

Алгоритм C4.5 применяют в интеллектуальном анализе данных в качестве классификатора дерева решений, который может использоваться для генерации решения на основе определенной выборки данных (одномерные или многомерные предикторы). Преимущества C4.5 перед другими системами дерева принятия решений: алгоритм по своей сути использует однопроходный процесс сокращения для

уменьшения переобучения; может работать как с дискретными, так и с непрерывными данными; очень хорошо справляется с проблемой неполных данных.

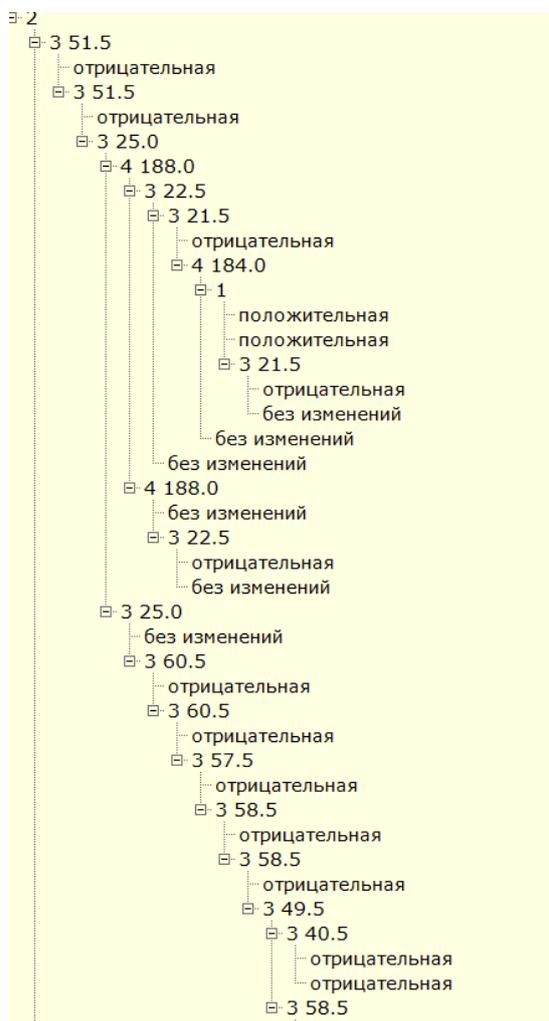


Рисунок 1 - Фрагмент построения дерева решений

Технологии реализации системы: Borland Delphi, SQL, Paradox. Схема обработки и передачи данных, программные модули системы; визуализация процесса баротерапии; оригинальный алгоритм выбора начального режима баротерапии; прогноз динамики показателей вариабельности сердечного ритма пациента для следующих сеансов баротерапии [10-12].

Фрагменты программного кода построения дерева решений представлены ниже.

```
// ***** сумма энтропии числовых признаков *****
Function Sum_EntropyN (attr_num:
integer; Quer: string; var Imax: TImax;
S0: real): real;
var S1, S2, SdMin, SD, valsr: real;
str, name_attr, name_rab, stwhere,
dynam, dynam_next, rabb: string;
```

```

        i, k, kk, признак: smallint;
        n1, n2, value, value_next:
integer;
begin
    With DataModule2 do begin
        SdMin: = 10;
        Imax[attr_num]: = 0;
        name_attr: =
attribute_name[attr_num];
        stwhere: = Quer;
        k: = length(Quer)-1;
        while(Quer[k] = ' ') do DEC(k);
        if (copy (stwhere, k-4,5) =
'WHERE') then Delete (stwhere, k-4,5);
        if (copy (stwhere, k-2,3) = 'AND')
then Delete (stwhere, k-2,3);
        kk: = length(name_attr)-1;
        while(name_attr[kk] <> '.') do
DEC(kk);
        name_rab: = copy (name_attr,
kk+1,20);
        QueryRab.Close;
        QueryRab.SQL.Text: = stwhere+'
ORDER BY ' + name_attr;
        QueryRab.Open;
        QueryRab.FindFirst;
        признак: =0;
        i: =0;
        value: = 0; value_next: =0;
        rabb: = QueryRab.SQL.Text;
        while i<= QueryRab.RecordCount-1 do
begin
            while (value_next = value) do
begin
                if i =
QueryRab.RecordCount-1 then begin
признак: =1; break; end;
                value: =
QueryRab.FieldName (name_rab).
AsInteger;
                QueryRab.FindNext;
                value_next: =
QueryRab.FieldName (name_rab).
AsInteger;
                Inc (i);
            end;
            if признак = 1 then begin
                if Sdmin <> 10 then break;
                Sdmin: = S0;
                Imax[attr_num]: =
value_next;
                break;
            end
            else begin
                valsr: =
(value+value_next)/2;
                str: = Quer+'
('+name_attr+' <= '+
Format('%4.1f', [valsr]) +') AND ';
                S1: = Entropy (str, n1);
                str: = Quer+'
('+name_attr+' > '+ Format ('%4.1f',
[valsr]) +') AND ';
                S2: = Entropy (str, n2);
                if ((n1+n2) <> 0) then Sd:
= SimpleRoundTo ((n1*S1/(n1+n2) +
n2*S2/(n1+n2)), -2)
                else Sd: = 0;
            end;
        end;
        if Sd < SdMin then begin
            Imax[attr_num]: = valsr;
            SdMin: = Sd;
        end;
        if i =
QueryRab.RecordCount-1 then break;
        value: = value_next;
        QueryRab.FindNext;
        value_next: =
QueryRab.FieldName (name_rab).
AsInteger;
        Inc(i);
    end;
end;
Result: = SdMin;
end;
end;
// ***** сумма энтропии текстовых
признаков *****
Function Sum_EntropyS (attr_num:
integer; Quer: string; S0: real): real;
var S: array [1..17] of real;
    sum_info, sumn: array [1..17] of
integer;
    Sum: integer;
    i, nn: smallint;
    SplitInfo, Gain: real;
    name_attr, name_val, str: string;
begin
    Sum: =0; SplitInfo: =0; Gain: =0;
    Result: =0;
    nn: = attribute_size[attr_num]; //
массив размерностей значений атрибутов
    name_attr: =
attribute_name[attr_num];
    for i: = 1 to nn do begin
        name_val: = attribute_value
[attr_num, i];
        str: = Quer+' ('+ name_attr +'
= '+''''+name_val+''''+') AND';
        S[i]: = Entropy (str, sumn[i]);
        Sum: = Sum+sumn[i];
        DataModule2.QueryTree. Close;
        DataModule2.QueryTree.SQL.Text:
= Quer+' ('+ name_attr +' =
+''''+name_val+''''+') ';
        DataModule2.QueryTree. Open;
        sum_info[i]: =
DataModule2.QueryTree. RecordCount;
    end;
    if Sum = 0 then begin Gain: =0;
SplitInfo: =0; Result: =S0; end
    else begin
        for i: = 1 to nn do begin
            Gain: = Gain +
S[i]*sumn[i]/Sum;
            if sum_info[i] <>0 then
SplitInfo: = SplitInfo +
(sum_info[i]/Sum) *
(log2(sum_info[i]/Sum));
        end;
        if SplitInfo <> 0 then Result:
= (S0- Gain)/ -SplitInfo
        else Result: = S0- Gain;
        Result: = SimpleRoundTo
(Result, -2);
    end;
end;
end;

```

## Выводы

Для повышения эффективности, безопасности гипербарической оксигенации и автоматизации процесса баротерапии целесообразно использовать интеллектуальную систему поддержки принятия решения. Разработка экспертной системы поддержки принятия решений для автоматизации процесса баротерапии выполнена в результате совместного сотрудничества ГУ «Институт проблем искусственного интеллекта» (г. Донецк, ДНР) и Донецкого национального медицинского университета им. М. Горького. Разработанная интеллектуальная система формирует базу данных информации о пациентах и параметрах сеансов; позволяет на основе систематизации данных по алгоритму дерева решений C4.5 выбрать начальный режим баротерапии и выполнить прогноз динамики показателей ВСП пациента для следующих сеансов баротерапии.

Разработанная экспертная система поддержки принятия решений для автоматизации процесса баротерапии успешно прошла предварительные испытания и опытную эксплуатацию в Республиканском центре профпатологии и реабилитации МЗ ДНР согласно разработанной ГУ «ИПИИ» Программе и методике испытаний.

## Литература

1. Practical results of creating a multiservice intelligent system automated access to scientific and technical information. / Bondarchuk V.V., Ivanova S.B., Kravchenko N.M. // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 7-8 — 2019. DOI: 10.29013/AJT-19\_7\_8.
2. Технологии реализации цифровых интегрированных платформ. / Бондарчук В.В., Кравченко Н.М., Ключанова Т.Д. // Наука и образование: сохраняя прошлое, создаем будущее: сборник статей XIX Международной научно-практической конференции. В 2 ч. Ч. 1. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2019. – С. 69-71.
3. Практика внедрения многофункциональной системы повышенной безопасности: достижения и перспективы: // В.В. Бондарчук, С.Б. Иванова, Н.М. Кравченко, Т.Д. Ключанова // Инновационное развитие науки и образования: сборник статей VI Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2019. – С. 49-51.
4. Бондарчук, В.В. Принципы построения и реализации экспертных интеллектуальных систем процесса взаимодействия гипербарического состояния и контролируемых параметров объектов. Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). Ежемесячный научный журнал №81/ декабрь 12 / 2020 – С.16-21. DOI: 10 3168/ESU.2020.5.81.1165.
5. Bondarchuk, V. Theoretical aspects of rheocardiography visualization in expert barotherapy systems. Eurasian Union Scientists, 8/89 т.1 / сентябрь, 2021 – С. 3-5. - <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2021.1.89.1427>.
6. Ladaria Elena G. Principles for Implementing an Intelligent Decision Support System in the Barotherapy Process [Текст] / Ladaria Elena G., Bondarchuk Victoria V., Kravchenko Nataliya M. // The 5th International scientific and practical conference “Perspectives of world science and education” (January 29-31, 2020) CPN Publishing Group, Osaka, Japan, 2020. – PP. 114–116.
7. Бондарчук В. В. Методологические аспекты моделирования интеллектуальной системы поддержки принятия решений для формирования режимов гипербарической оксигенации [Текст] / В. В. Бондарчук, Е. Г. Ладария, Н. М. Кравченко // The 6th International scientific and practical conference «Dynamics of the development of world science» (February 19-21, 2020) Perfect Publishing, Vancouver, Canada, 2020. – PP. 391–399.
8. Bondarchuk Victoria V. Generation of the Intellectual Decision-Making Software for Forming Hyperbaric Oxidation Modes Prospects for Development [Текст] / Bondarchuk Victoria V., Ladaria Elena G., Kravchenko Nataliya M. // The 2nd International scientific and practical conference «Eurasian scientific congress» (February 24-25, 2020) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain, 2020. – P. 137–142.
9. Бондарчук В. В. Принципы построения и реализации экспертных интеллектуальных систем процесса взаимодействия гипербарического состояния и контролируемых параметров объектов [Текст] / В. В. Бондарчук // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). Ежемесячный научный журнал. – № 81/ декабрь 12 / 2020 – С. 16–21. DOI: 10 3168/ESU.2020 1.75.8282.
10. Распознавание параметров variability сердечного ритма по кардиосигналу в процессе баротерапии [Текст] / Кравченко Н. М., Ладария Е. Г., Ключанова Т. Д., Бондарчук В. В. // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта», 2020. – № 2 (17). – С. 28–35.
11. Экспертная система процесса баротерапии [Текст] / Кравченко Н. М., Ключанова Т.Д., Бондарчук В.В., Гринцова А.А., Денисенко А.Ф. // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – 2021. – № 2 (21). – С. 34–42.

12. Бондарчук В.В., Кравченко Н.М.  
Интерпретация событий генерирования  
программного обеспечения процесса  
баротерапии / В. В. Бондарчук, Н.М. Кравченко //

Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). Ежемесячный  
научный журнал. – № 90/ октябрь 10 / 2021 – С.  
9-13.

**Кравченко Н.М., Бондарчук В.В., Ключанова Т.Д. Реализация машинного обучения в интеллектуальной системе процесса баротерапии.** Выполнен аналитический обзор современных научных исследований по вопросу автоматизации процесса баротерапии, который подтвердил актуальность проблемы, ее соответствие приоритетным научным направлениям в медицине. Представлена реализация машинного обучения в интеллектуальной системе процесса баротерапии. Приведены фрагменты программного кода алгоритма дерева решений. Разработанная экспертная система поддержки принятия решений для автоматизации процесса баротерапии успешно прошла предварительные испытания и опытную эксплуатацию в Республиканском центре профпатологии и реабилитации.

**Ключевые слова:** баротерапия, машинное обучение, интеллектуальная система, экспертная система, поддержка принятия решений.

**Kravchenko N.M., Bondarchuk V.V., Klyushanova T.D. Implementation of machine learning in the intellectual system of the barotherapy process.** An analytical review of modern scientific research on the automation of the barotherapy process has been carried out, which confirmed the relevance of the problem, its compliance with priority scientific directions in medicine. The implementation of machine learning in the intelligent system of the barotherapy process is presented. Fragments of the program code of the decision tree algorithm are given. The developed expert decision support system for automating the barotherapy process has successfully passed preliminary tests and trial operation at the Republican Center for Occupational Pathology and Rehabilitation.

**Keywords:** barotherapy, machine learning, intelligent system, expert system, decision support.

Статья поступила в редакцию 19.11.2021  
Рекомендована к публикации профессором Шелеповым В. Ю.

## Разработка архитектуры интегрированной системы генерации псевдослучайных тестов цифровых устройств

Т. А. Зинченко, Ю. Е. Зинченко, О. Н. Дяченко  
Донецкий национальный технический университет  
[zinchenko.tatyana@gmail.com](mailto:zinchenko.tatyana@gmail.com)

### Аннотация

*Предлагается архитектура интегрированной системы генерации псевдослучайных тестов цифровых устройств. Приводятся многочисленные функции системы, описывается структура программного обеспечения и интерфейс системы. Анализируются ключевые особенности разрабатываемой системы, выгодно отличающие ее от других систем построения тестов, такие как адаптивное псевдослучайное тестирование, построение в процессе тестирования так называемого альтернативного графа объекта диагностики, параллельное тестирование в локальной компьютерной сети как одного, так и группы объектов диагностики с построением в динамике альтернативных графов объектов диагностики. Эти особенности не имеют аналогов среди систем построения тестов.*

### Введение

Несмотря на то, что задача построения (синтеза) тестов цифровых устройств (ЦУ) радиоэлектронной (РЭА) и электронно-вычислительной (ЭВА) аппаратуры является классической и появилась на рынке диагностики одной из первых, можно сказать, что она до сих пор успешно не решена. Существующие на мировом рынке и СНГ системы автоматического синтеза тестов покрывают всего лишь 50-60% неисправностей, что является далеко не достаточно. При этом компании, занимающиеся построением диагностического обеспечения, вынуждены даже строить тесты вручную, что сопряжено с высочайшей трудоемкостью и высокой квалификацией инженеров-диагностов.

Поэтому разработка эффективных систем построения тестов по-прежнему является актуальной задачей.

Существенный вклад в развитие этого направления внесли отраслевые и академические институты, высшие учебные заведения и научно-производственные организации: ИПУ АН России, ДВНЦ АН России, ЛЭТИ (Ленинград), СГУ (Саратов), ЦКБ "Алмаз-Антей" (Москва), ИПМЭ АН Украины, ИПММ АН Украины, ИК АН Украины, НТУУ "КПИ" (Киев), ХНУРЭ (Харьков), ДонНТУ (Донецк) и др. Наиболее важные теоретические и экспериментальные исследования и разработки были выполнены научными школами под руководством Abramovici M., David R., Zorian Y., Agrawal V., Abraham J., Roth J., Schnider P., Corno F., Goel P., Fujivara H., McCluskey E., Пархоменко П., Гуляева В., Ярмолика, Сперанского Д., Шаршунова С., Убара Р., Скобцова Ю., Хаханова В. и др. [1-4]. Активно исследования и разработки в области диагностики ведутся на

кафедре компьютерной инженерии в ДонНТУ на базе FPGA-лаборатории [5-9].

Данная работа посвящена разработке архитектуры так называемой интегрированной системы автоматического построения тестов цифровых типовых элементов замены (ТЭЗ) средней степени интеграции на основе псевдослучайного тестирования (ИСПСТ) [10-14]. В качестве объекта диагностики (ОД) выступают цифровые устройства, которые представляется принципиальной схемой в EDIF-формате и PSpice-моделями компонент ОД. В качестве моделей неисправностей при синтезе и анализе тестов используются константные неисправности (КН).

### Функции ИСПСТ

Предполагается, что разрабатываемая система должна выполнять следующие основные функции.

- генерация линейных, и нелинейных псевдослучайных тестов, ручное задание тестов;
- анализ полноты теста, измерение активности внешних и внутренних КТ ОД на основе логического моделирования;
- анализ стабильности и критических состязаний теста на основе PSpice-моделирования с реальными задержками ИМС;
- устранение «холостых» векторов и построение псевдослучайного теста, соизмеримого по длине с детерминированным тестом;
- автоматическое построение баз данных тестов и тестовых реакций для внешних и внутренних КТ ОД на основе PSpice-моделирования ТЭЗ на реальных задержках ИМС;

- отображение результатов синтеза и анализа тестов на принципиальной схеме ОД в графическом редакторе;

- поиск неисправностей ТЭЗ с точностью до съемной компоненты на основе сочетания алгоритмов обратного прохода и «галопирования».

Гибкая форма задания ОД и ИМС, поддержка EDIF- и PSpice-форматов, широкая номенклатура ИМС с возможностью расширения библиотек компонент.

Для построения тестов используются сочетание традиционных линейных и нелинейных псевдослучайных тестов, заложена также возможность «ручного» задания теста. Реализованы как традиционный та и авторский подходы анализа стабильности тестов. Возможен синтез тестов как одного, так и группы ТЭЗ.

Система включает в свой состав следующие основные программные компоненты:

- LPRTG – генератор «линейных» псевдослучайных тестов – обеспечивает генерацию тестовых последовательностей с вероятностью следования логических сигналов, близкую к 0,5.

- NPRTG – генератор «нелинейных» псевдослучайных тестов – обеспечивает генерацию тестовых последовательностей с произвольной вероятностью следования логических сигналов.

- StatAnalyzer – статистический анализатор ОД – выполняет анализ статистических (вероятностных) характеристик ОД путем моделирования его логической модели на псевдослучайных тестах с целью поиска распределения входных вероятностей ОД, близких к оптимальным.

- CritState – анализатор критических состояний ОД – отслеживает путем моделирования логической модели ОД критические состояния, которые могут возникнуть в ОД в результате тестовых воздействий.

- InitGen – генератор установочной последовательности ОД – предназначен для получения установочной последовательности ОД, которая должна предшествовать процессу собственно тестирования ОД.

- FaultSim – симулятор неисправностей ОД – выполняет моделирование всевозможных неисправностей ОД на заданном тесте и определяет его полноту.

- TBG – тест-бенч генератор – управляет процессом построения тестов и осуществляет взаимодействие с пользователем.

Программное обеспечение подсистемы автоматизированной генерации тестов и моделирования неисправностей ИСПСТ обеспечивает:

- сопряжение подсистемы генерации тестов с САПР ORCAD (конвертация файлов электронных моделей электрических принципиальных схем ТЭЗов формата ORCAD в файлы САПР-Т, конвертация файлов тестов формата подсистемы ИСПСТ в файлы тестов формата ORCAD);

- автоматическую или полуавтоматическую (в интерактивном режиме) генерацию установочной последовательности ТЭЗа;

- автоматическую генерацию псевдослучайных тестов с возможностью задания произвольной вероятности следования логических сигналов теста;

- возможность учета критических состояний схемы и исключения «неблагоприятных» тестовых последовательностей, приводящих к этим состояниям;

- анализ статистических характеристик ТЭЗа и возможность управления вероятностью следования логических сигналов псевдослучайного теста в интерактивном режиме;

- программный интерфейс пользователя (GUI) для работы оператора с компонентами подсистемы ПТО;

- моделирование константных неисправностей ТЭЗа и оценку полноты теста (число обнаруживаемых неисправностей, соотнесенное к числу всевозможных неисправностей ТЭЗа);

- программную оболочку для организации работы подсистемы ПТО (Тест-бенч генератор (TBG) и проч.).

Структура программного обеспечения разрабатываемой ИСПСТ, которая реализует описанные функции, приведена на рис. 1. На рис.2 приведен ее интерфейс

### **Ключевые свойства ИСПСТ**

В качестве основных (ключевых) свойств разрабатываемой системы должно быть реализовано следующее.

- адаптивное псевдослучайное тестирование;

- параллельное тестирование одного или группы ОД в локальной компьютерной сети;

- синтез тестов, моделирование КН одного или группы ТЭЗ;

- анализ активности теста на внешних входах, выходах и внутренних КТ ОД;

- анализ стабильности и критических состояний ОД на тесте;

- построение базы данных тестов и тестовых реакций ОД на основе моделирования с реальными задержками ИМС;

- сбор статистики о ходе тестирования..

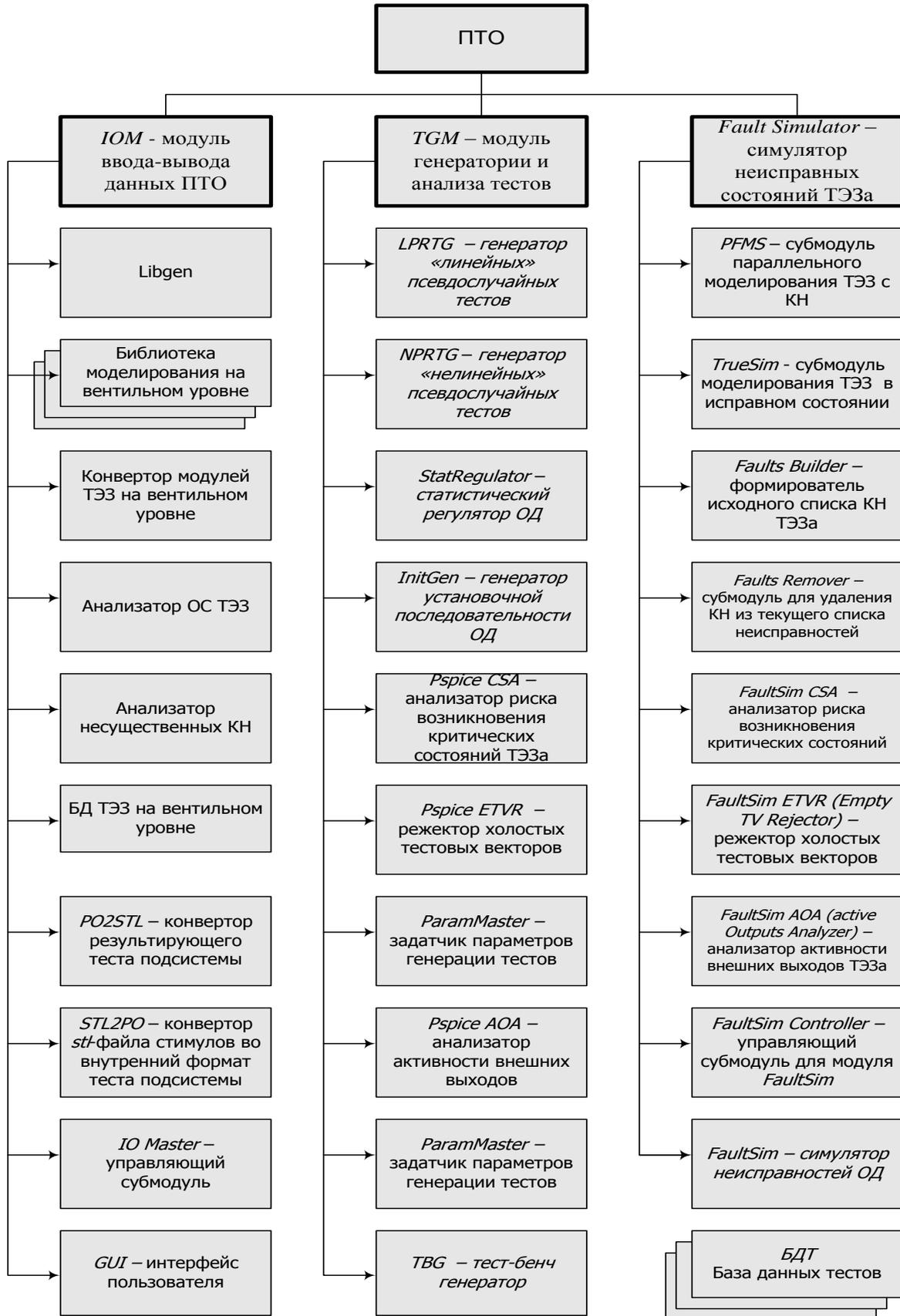


Рисунок 1 – Структура программного обеспечения ИСПСТ

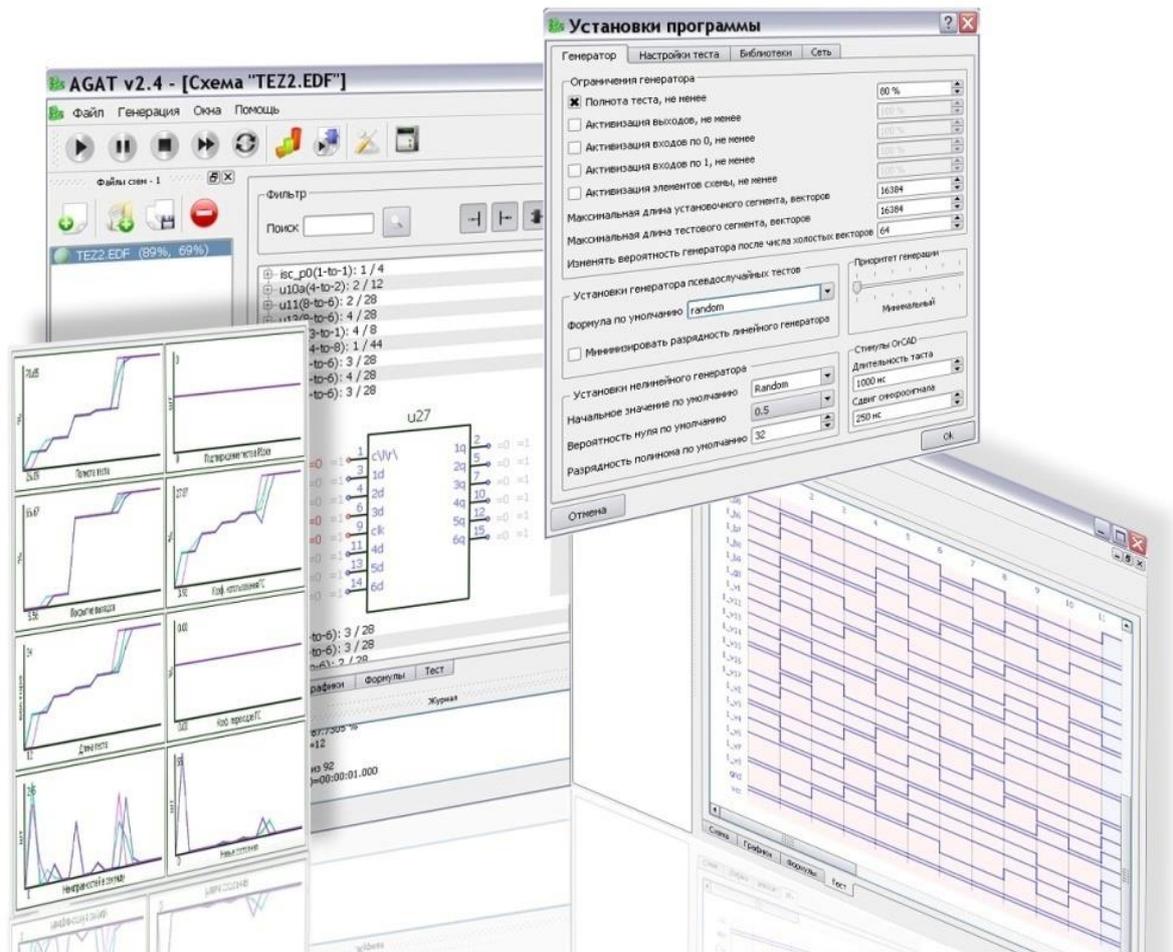


Рисунок 2 – Шаблон интерфейса ИСПСТ

### Адаптивный алгоритм псевдослучайного тестирования

Для повышения эффективности традиционного псевдослучайного тестирования был разработан авторский подход, который состоит в распознавании и построении «адаптивного» графа (АГ) ОД на первом этапе и «блуждании» по этому графу на втором этапе, после того как ПСТ заходит в «тупик». Это позволяет в среднем на 10-15%, а в некоторых случаях существенно выше повысить полноту теста. На рис. 3 приведен пример АГ ОД [11,12,14]

### Распределенное тестирование

Наряду с адаптивным подходом ПСТ эффективность генерации тестов в системе AGAT достигается также за счет использования распределенных вычислений в локальной компьютерной сети. Реализованная также «многопоточность» позволяет задействовать многоядерные процессоры, как автономных ПК, так и ПК, работающих в сети. Это также обеспечивает принципиальную возможность использования комплекса ИСПСТ в многопроцессорных и кластерных системах,

получаемых путем суммирования графов сети. ТЭЗ, так и для одного «тяжелого» объекта, реализуя при этом в динамике распознавание ОД и «блуждание» по АГ, непрерывно Распределенное тестирование может выполняться как для группы. На рис.4 приведен процесс параллельного тестирования ОД с динамическим построением АГ.

### Выводы

Предложена архитектура интегрированной системы автоматического построения тестов ЦУ. В системе закладываются инновационные решения, такие как адаптивное псевдослучайное тестирование, параллельное тестирование одного или группы ОД в локальной компьютерной сети, анализ критических состояний ОД на построенном тесте. Эти решения выгодно отличаются предлагаемую архитектуру от аналогов. Реализация разработанной архитектуры позволяет создавать систему тестирования ЦУ, более эффективную по сравнению с известными аналогами. В настоящее время авторами статьи и другими сотрудниками FPGA-лаборатории ведутся разработки системы построения тестов ЦУ на основе предложенной архитектуры.

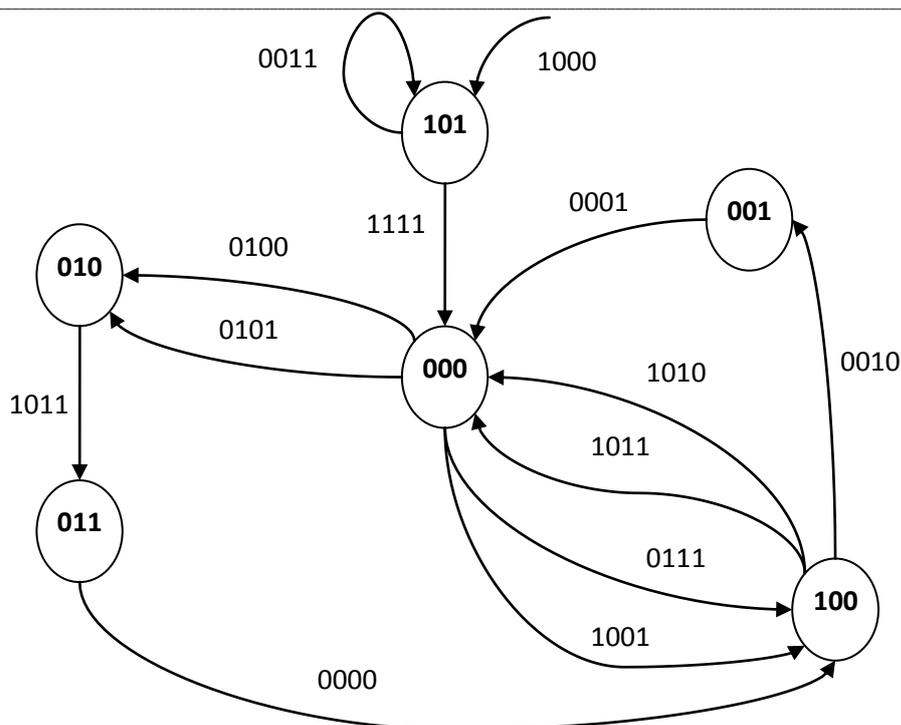


Рисунок 3 – Альтернативный граф цифрового объекта диагностики

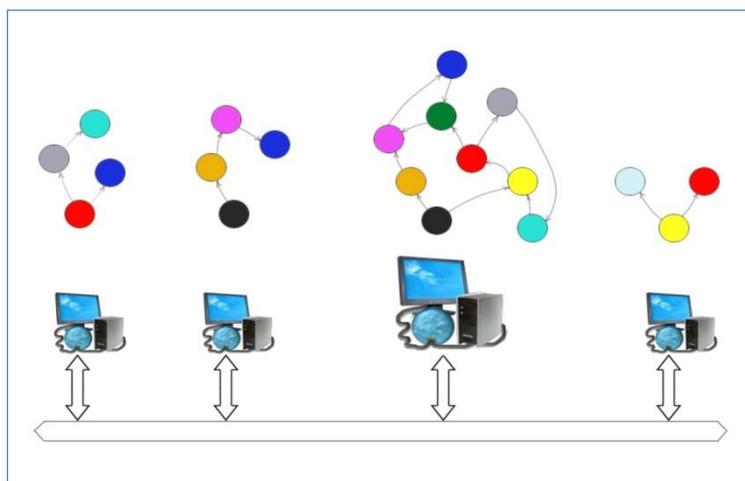


Рисунок 4 – Параллельное тестирование ОД с параллельным построением АГ

### Литература

1. Bushnell, M. L. Essentials of electronic testing for digital, memory and mixed-signal VLSI circuits / M. L. Bushnell, V. D. Agrawal. – Kluwer academic publishers, 2001. – 690 p.
2. Rene, David. Random testing of digital circuits. – CRC Press, 1998. – 496 p.
3. Сперанский, Д. В. Моделирование, тестирование и диагностика цифровых устройств : учебное пособие 3-е изд. / Д. В. Сперанский, Ю. А. Скобцов. — Москва: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Ай Пи Ар Медиа, 2020. — 529 с. // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: URL: <http://www.iprbookshop.ru/94854.html>

(дата обращения: 30.12.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

4. Ярмолик, В. Н. Генерирование и применение псевдослучайных сигналов в системах испытаний и контроля / В. Н. Ярмолик, С. Н. Демиденко. - Минск, 1986.

5. Зинченко, Ю. FPGA-технологии проектирования и диагностика компьютерных систем / Ю. Зинченко, В. Калашников, С. Хайдук и др. // Сборник научных трудов VI Междунар. научн.-практ. конф. «Современные информационные технологии и ИТ-образование». – Москва: МГУ, 2011. – Т. 1. - С. 422-429. - Режим доступа: <http://conf.it-edu.ru/conference/2011/work>

6. Нестеренко, Д. О. Тестирование аналоговых и аналогово-цифровых схем методами цифровой обработки сигналов / Д. О. Нестеренко, Ю. Е. Зинченко, В. Н. Соленов // Информатика и кибернетика. - Донецк: ДонНТУ, 2020. - № 4(22). - С. 77–59.

7. Дяченко, О. Н. Применение методов помехоустойчивого кодирования для компактного тестирования цифровых схем / О. Н. Дяченко, Ю. Е. Зинченко, В. О. Дяченко // Информатика и кибернетика. - Донецк: ДонНТУ, 2017. - № 3(9). - С. 55–59.

8. Зинченко, Ю. Е. Имитация периферийных устройств в системе дистанционного доступа к FPGA-комплексам / Ю. Е. Зинченко, В. С. Ленч, Т. А. Зинченко, В.Н. Павлыш // Информатика и кибернетика. - Донецк: ДонНТУ, 2017. - № 3(9). - С. 60–68.

9. Зинченко, Ю. Е. Детерминированная оценка длины псевдослучайного теста ОЗУ // Сб. научн. тр. ДонНТУ "Информатика, кибернетика и вычислительная техника (ИКВТ)-97". - Донецк: 1998. - Вып. 1. - С. 176-188.

10. Зинченко, Ю. Е. Сопроцессор псевдослучайных тестов для персональной ЭВМ // Докл. научн. техн. конф. «Творческое наследие В.И. Вернадского и современность», секция «Актуальные проблемы Вычислительной техники». - Донецк: ДонНТУ, 1995. - Ч.1. – 62 с.

11. Корченко, А. А. Оптимизация адаптивного подхода генерации псевдослучайных тестов / А. А. Корченко, Ю. Е. Зинченко // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Проблеми моделювання та автоматизації проектування» (МАП-2012). Вип. 10. – Донецьк: ДонНТУ. – 2012. – с. 60-68.

12. Зинченко, Ю.Е. Адаптивный подход к генерации псевдослучайных тестов цифровых устройств / Ю. Е. Зинченко, А. А. Корченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Проблеми моделювання та автоматизації проектування» (МАП-2011). – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 9 (179). – С. 360-365.

13. Зинченко, Ю. Е. Машинно-аналитический способ расчета случайного теста константных неисправностей цифровых устройств / Ю. Е. Зинченко, А. А. Корченко, Т. А. Зинченко // Наукові праці ДонНТУ, сер. «Проблеми моделювання та автоматизації проектування» (МАП-2012), 2012. - № 1 (10)-2(11). - С. 31-38.

14. Зинченко, Ю. Е. АГАТ – система автоматизированной генерации псевдослучайных адаптивных тестов / Ю. Е. Зинченко, А. А. Корченко, Т. А. Зинченко // Матеріали III міжд. наук.-практ. конф. студ., асп. та молод. вчен. «Інформація і керуючі системи в промисловості, економіці та екології», вересень 2011 Северодонецьк: Технол. ін-т Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля, 2011. – 7 с.

**Зинченко Т. А., Зинченко Ю. Е., Дяченко О. Н. Разработка архитектуры интегрированной системы генерации псевдослучайных тестов цифровых устройств.** *Предлагается архитектура интегрированной системы генерации псевдослучайных тестов цифровых устройств. Приводятся многочисленные функции системы, описывается структура программного обеспечения и интерфейс системы. Анализируются ключевые особенности разрабатываемой системы, выгодно отличающие ее от других систем построения тестов, такие как адаптивное псевдослучайное тестирование, построение в процессе тестирования так называемого альтернативного графа объекта диагностики, параллельное тестирование в локальной компьютерной сети как одного, так и группы объектов диагностики с построением в динамике альтернативных графов объектов диагностики. Эти особенности не имеют аналогов среди систем построения тестов.*

**Ключевые слова:** *цифровое устройство, псевдослучайное тестирование, адаптивное тестирование, параллельное тестирование, константная неисправность, типовой элемент замены, альтернативный граф*

**Zinchenko T. A., Zinchenko Yu. E., Dyachenko O. N. Development of the architecture of an integrated system for generating pseudo-random tests of digital devices.** *The architecture of an integrated system for generating pseudo-random tests of digital devices is proposed. The numerous functions of the system are described, the structure of the software and the interface of the system are described. The key features of the system being developed are analyzed, which favorably distinguish it from other test building systems, such as adaptive pseudo-random testing, the construction of the so-called alternative graph of the diagnostic object in the testing process, parallel testing in the local computer network of both one and a group of diagnostic objects with construction in dynamics alternative graphs of diagnostic objects. These features are unparalleled among test building systems.*

**Keywords:** *digital device, pseudo-random testing, adaptive testing, parallel testing, constant fault, typical replacement element, alternative graph*

Статья поступила в редакцию 24.11.2021  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

## Задачи планирования производственно-логистической деятельности предприятия

Т. Г. Дмитрюк, С. А. Зори  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
[e-mail: tnauka@lenta.ru](mailto:tnauka@lenta.ru)

### Аннотация

*В работе рассматривается задача эффективного управления ресурсами предприятия. Выполнено формулирование и решение физической и формальной постановки задач управления производственно-логистической деятельностью предприятия среднего уровня производственной иерархии. Предложена балансовая модель управления ресурсами предприятия, приведены решения оптимизационных задач планирования производства и сбыта продукции потребителям. Разработаны алгоритмы системы управления производством и перевозками продукции предприятия, предложены рекомендации по их реализации.*

### Введение

Приоритетной задачей предприятия в осуществлении производственной и торговой деятельности является повышение эффективности управления его логистической системой за счёт движения сырья (и вспомогательных материалов) и произведенной продукции. Управление ресурсами позволяет предприятию сокращать ненормативные объёмы складированного сырья и готовой продукции и в их потреблении руководствоваться объёмами продукции, заказываемой потребителями (что позволяет избежать дефицита оборотных средств предприятия).

В связи с тем, что для торгово-промышленных предприятий обусловлена объективная необходимость повышения качества транспортно-логистического обслуживания потребителей, максимально удовлетворяющего их потребности в доставке произведенной продукции, настоящее исследование является актуальным.

### Анализ литературных источников

Авторами Згуровским М.З. и Панкратовой Н.Д. [1] предлагаются методы формализации задач, относящихся к различным предметным областям, с позиции системного анализа.

Томашевским В.М. [2] введены основные положения методик разработки математических моделей в системах управления производствами и технологическими процессами.

Автором настоящей работы на основании структурно-функционального подхода системного анализа для производственно-логистической системы предприятия, на примере ООО «Донецкий пивоваренный завод» (ООО «ДПЗ»), ранее разработано следующее:

– установлены взаимосвязи между структурой и функциями элементов производственной системы [3];

– определена схема взаимодействия элементов логистической системы пивоваренного завода [4];

– разработаны математические модели прогнозов производства пива по сортам и розлива по видам тары, а также математические модели доставки произведенной продукции по маршрутам от завода к конечным потребителям [5], [6].

Перечисленное выше позволяет сформулировать постановку задач планирования производства и доставки потребителям продукции предприятия.

### Цель и задачи исследования

Целью работы является формулирование и решение физической и формальной постановки задач управления производственно-логистической деятельностью предприятия. Для достижения поставленной цели в работе предполагается решение следующих задач управления: производственно-логистической деятельностью предприятия, производственной деятельностью и логистическими операциями.

### Основное содержание работы

В анализ характеристик производственной деятельности ООО «ДПЗ», как одного из объектов множества промышленных предприятий среднего уровня производственной иерархии, входит определение пунктов и объёмов реализации заказанной продукции, в соответствии с которыми фиксированы маршруты доставки. На основании анализа заказов осуществлена постановка задач моделирования производства и сбыта и

разработаны модели прогноза планового выпуска и сбыта продукции. В соответствии с правилами системного анализа изложенное выше лежит в основе постановки и формализации задач управления производственно-логистической деятельностью предприятия. На основании анализа характеристик объекта управления обобщенная физическая постановка задачи управления может быть сформулирована следующим образом: определить количество производимой пивоваренным заводом продукции и доставку её потребителям таким образом, чтобы потребительский спрос на доставляемую продукцию был максимально удовлетворён. Формальная постановка обобщенной задачи управления представлена в виде функционала (1):

$$J_1 = \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^{15} f_{jk}(P_j, V_k) =$$

$$= f_{jk}^*(P_j, V_k) \rightarrow \max_{P_j, V_k} f_{jk}^*, j = \overline{1,5}, k = \overline{1,15}, \quad (1)$$

где  $J_1$  — функционал цели задачи планирования производственно-логистической деятельности предприятия;  $P_j$  — объёмы производства пива по сортам  $j$ ;  $V_k$  — общий объём доставки пива всех сортов по каждому из составленных маршрутов  $M_k$ .

В соответствии с тем, что экономико-производственная деятельность предприятия характеризуется объемами производства и логистическими показателями удовлетворения предложения предприятий, реализующих продукцию, удовлетворение функционала (1) проводится посредством решения локальных задач, предусматривающих повышение эффективности реализации продукции и её производства. Обобщенная задача, ввиду особенностей деятельности торгово-промышленного предприятия, может быть представлена в виде балансовой модели (табл. 1):

Таблица 1 — Балансовая модель производственно-логистической деятельности предприятия

Заказчики продукции	Заказы на производство продукции (блок 1)					Произведенная продукция (блок 2)					
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$V_{произв}$
Заказчик 1	$Or_1^1$	$Or_2^1$	$Or_3^1$	$Or_4^1$	$Or_5^1$	$X_1^1$	$X_2^1$	$X_3^1$	$X_4^1$	$X_5^1$	
Заказчик 2	...	...	...	...	...	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	$X_4^2$	$X_5^2$	
Заказчик 3	...	...	...	...	...	$X_1^3$	$X_2^3$				
Заказчик 4	...	...	...	...	...	$X_1^4$	$X_2^4$	$X_3^4$		$X_5^4$	
Заказчик 5	$Or_1^5$	$Or_2^5$	$Or_3^5$	$Or_4^5$	$Or_5^5$	$X_1^5$		$X_3^5$		$X_5^5$	
<b>Итого</b>						$\sum_{i=1}^6 X_1^i$	$\sum_{i=1}^6 X_2^i$	$\sum_{i=1}^6 X_3^i$	$\sum_{i=1}^6 X_4^i$	$\sum_{i=1}^6 X_5^i$	$\sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^6 X_j^i$
Потребители продукции, в соответствии с маршрутами доставки $M_k$	Разлитая продукция		Тара для продукции		Доставленная потребителям по маршрутам продукция, (блок 4)					Условие баланса модели	
	(блок 3)										
	$V_{произв}$		T		$P_1$	...	$P_5$	$V_{дост}$		$V_{произв} = V_{дост}$	
Потребитель 1 ( $M_1 - M_5$ )	$\forall M_k \sum_{j=1}^5 X_j^i$		$\sum_{i=1}^6 \sum_{q=1}^9 Y_q^i$		$Z_{1,1}$	...	$Z_{5,1}$	$\sum_{j=1}^5 Z_{j1}$			
Потребитель 2 ( $M_6 - M_8$ )	$\forall M_k \sum_{j=1}^5 X_j^i$		$\sum_{i=1}^6 \sum_{q=1}^9 Y_q^i$		...	...	...	...			
Потребитель 3 ( $M_9 - M_{10}$ )	$\forall M_k \sum_{j=1}^5 X_j^i$		$\sum_{i=1}^6 \sum_{q=1}^9 Y_q^i$		...	...	...	...			
Потребитель 4 ( $M_{11} - M_{12}$ )	$\forall M_k \sum_{j=1}^5 X_j^i$		$\sum_{i=1}^6 \sum_{q=1}^9 Y_q^i$		...	...	...	...			
Потребитель 5 ( $M_{13} - M_{15}$ )	$\forall M_k \sum_{j=1}^5 X_j^i$		$\sum_{i=1}^6 \sum_{q=1}^9 Y_q^i$		...	...	...	$\sum_{j=1}^5 Z_{j15}$			
<b>Итого</b>	$\sum_{j=1}^5 P_j$		$\sum_{i=1}^6 T^i (Y_q^i)$					$\sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^{15} Z_{jk} = \sum_{k=1}^{15} V_k$		$\sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^6 X_j^i = \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^{15} Z_{jk}$	

В модели автором введены следующие показатели:  $Or_j^p$  — объёмы заказов пивоваренной продукции по сортам пива для каждого из заказчиков  $p$ ,  $p = \overline{1,5}$ ;  $X_j^i$  — объём производства пива  $j$ -го сорта, которое будет разлито в тару  $i$ -го объёма,  $i = \overline{1,6}$ ,  $j = \overline{1,5}$ ;  $T^i$  — общее количество тары объёмом  $i$  для розлива пива;  $Y_q^i$  — количество тары объёмом  $i$  для розлива пива номенклатуры  $q$  ( $q = \overline{1,9}$ );  $Z_{jk}$  — объёмы доставки пива каждого из сортов  $j$  по каждому из маршрутов  $M_k$ ,  $k = \overline{1,15}$ .

Балансовая модель может иметь графическую интерпретацию. Обобщенное представление оптимальных (в любом смысле) систем (согласно [7]) заключается в следующем: любая система управления может быть представлена некоторой геометрической фигурой в трёхмерном пространстве (размеры и конфигурация фигуры определены совокупностью показателей объекта управления). Данное утверждение позволяет представить производственно-логистическую деятельность предприятия среднего уровня производственной иерархии в виде следующей трёхмерной модели (рис. 1).

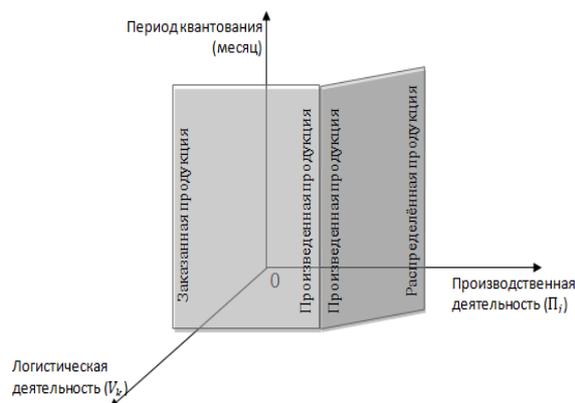


Рисунок 1 — Трёхмерное представление системы управления производственно-логистической деятельностью предприятия

Показатели заказов на производство пивоваренной продукции закладываются в разделы базы данных, характеризующие экономико-производственную деятельность предприятия: от заказа дистрибьюторами продукции — до её производства, а в дальнейшем: от розлива в тару произведённой продукции — до её отгрузки потребителям.

Удовлетворение балансовой модели подчинено решению задач управления

производством и логистикой на предприятии. В соответствии со спецификой торгово-промышленного предприятия и на основе балансовой модели обобщенная постановка задачи управления (1) декомпозируется на две задачи (при условии сбалансированности решений):

1. управления производством;
2. управления логистическими операциями.

Рассмотрим постановки и решения декомпозированных задач.

1. Физическая постановка задачи управления производством: определить такую совокупность технико-экономических показателей деятельности предприятия согласно заказам на производство продукции, при которых доход от реализации произведённой продукции будет принимать максимальные значения.

Формальная постановка первой задачи управления представлена в виде функционала (2):

$$J_1^1 = \sum_{j=1}^5 D(\Pi_j) = f(D(\Pi_j)) \rightarrow \max_{D(\Pi_j)} f, \quad (2)$$

где  $J_1^1$  — функционал цели задачи планирования производственной программы предприятия;  $D(\Pi_j)$  — совокупный доход от производства пива укрупнённых сортов  $\Pi_j$ .

При постановке данной задачи (2) учитывается ограниченность материальных ресурсов (сырья и вспомогательных материалов), соответствующих объёму заказанной продукции (блок 1 балансовой модели). Расход каждого вида ресурса на единицу продукции сорта пива  $\Pi_j$  определяется условием (3):

$$\sum_{j=1}^5 \alpha_{rj} \Pi_j \leq W_r(Or), \quad (3)$$

где  $\alpha_{rj}$  — норма расхода  $r$ -го вида ресурса на производство единицы продукции  $j$ -го сорта;  $W_r(Or)$  — запасы  $r$ -го вида ресурса при суммарном объёме заказа  $Or$ .

Решение задачи (2) осуществляется в рамках блока 2 балансовой модели с учётом ограничений. Система ограничений представлена уравнениями моделей вида (4):

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi_1 = -6967,69 + 7,51X_1^1 + 15,59X_1^2 + 79,55X_1^3 + 8,52X_1^4 + 498,08X_1^5 + 0 \cdot X_1^6, \\ \Pi_2 = -706,78 + 1,67X_2^1 + 3,83X_2^2 + 8,39X_2^3 - 0,002X_2^4, \\ \Pi_3 = -207,35 + 0,94X_3^1 + 1,34X_3^2 + 1,08X_3^3 + 546,16X_3^5, \\ \Pi_4 = -63,03 + 1,50X_4^1 + 2,73X_4^2, \\ \Pi_5 = -278,85 + 1,03X_5^1 + 4,18X_5^2 + 1,29X_5^3 + 340,37X_5^5. \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $\Pi_j$  — объёмы производства пива по сортам  $j$ ,  $j = \overline{1,5}$ ;  $X_j^i$  — объём производства пива  $j$ -го сорта, разлитого в тару  $i$ -го объёма,  $i = \overline{1,6}$ .

предприятия продукция не может превращаться в сырьё, что отражено в условии (6):

$$\Pi_j \geq 0, \quad j = \overline{1,5}. \quad (6)$$

Условия выполнения поставщиками обязательств по договорам могут быть записаны неравенством (5):

$$b_l \leq \Pi_l \leq B_l, \quad l = \overline{1,5}, \quad (5)$$

где  $b_l$  и  $B_l$  — соответственно нижняя и верхняя границы производства пива  $j$ -го сорта.

Для параметрической идентификации математической модели по результатам деятельности предприятия была сформирована обучающая выборка, осреднённый результат которой отражает фактические объёмы сваренного пива по сортам в 2019 году, на основании которых производилась настройка алгоритма (табл. 2).

Причём, в условиях анализируемого

Таблица 2 — Фактические значения показателей объёмов производства пива по сортам, полученные за 2019 год (обучающая выборка)

Сорта пива $\Pi_j$		Предельные ежемесячные значения объёмов производства пива, тыс. л											
		Месяцы											
№	Наименование	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	«Жигулёвское»	38,6	42,3	40	41,5	49,4	50,8	50,1	45,7	39,1	37,7	42,6	44
2	«Легенда Донбасса»	48,2	51,4	50,7	52,6	54,7	56,4	55,2	54,9	52,4	49,3	49,8	50,2
3	«Медведь»	25,9	26,8	25,5	27,5	28	30,8	29,4	26,4	24,2	23,7	24,1	27,1
4	«Кружка Свежего»	5,0	4,7	4,7	5,0	5,2	5,3	5,4	5,4	5,0	4,6	4,4	5,0
5	«Добрый Шубин»	11,6	10,1	11,0	12,1	12,5	12,7	12,7	12,8	11,8	11,5	11,8	11,9

Параметры моделей прогноза производства пивоваренной продукции рассчитывались по статистической выборке ежемесячных показателей производства пива за 72 месяца истекшего периода согласно алгоритму (7):

$$B_1 = (\bar{X}^T \cdot \bar{X})^{-1} \cdot \bar{X}^T \cdot \bar{Y}, \quad (7)$$

где  $\bar{X}$  — информационная матрица, составленная для производства пива в течение 72 месяцев;  $\bar{X}^T$  — транспонированная матрица  $\bar{X}$ ;  $\bar{Y}$  — вектор численных значений количества произведенного пива по сортам и ёмкости тары.

На объекте управления была осуществлена опытно-промышленная эксплуатация алгоритма системы принятия решений, результаты которой отражены в численном решении задачи управления производственной деятельностью ООО «ДПЗ»

(2) с прогнозом значений объёмов производства пива по сортам на 2020 год (табл. 3).

Сопоставление показателей таблиц 2 и 3 в статистическом соотношении отклонений расчётных и фактических значений позволило оценить адекватность модели по контрольной выборке (которая проверялась как по дисперсии остаточной масштабированной, так и по критерию Фишера). Дисперсия остаточная масштабированная, определяющая адекватность моделей по контрольной выборке, не превышает 5%.

С целью иллюстрации качества работы системы управления в течение исследуемого периода на рис. 2–6 представлены графики прогнозируемых объёмов производства пива каждого сорта для рекомендуемых оптимальных и принятых ЛПР решений по планированию производственной деятельности предприятия, сопоставленные с графиками фактических показателей.

Таблица 3 — Расчётные значения прогноза объёмов производства пива по сортам, полученные по моделям за 2020 год (контрольная выборка)

Сорта пива $P_j$		Пределные ежемесячные значения объёмов производства пива, тыс. л											
№	Наименование	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	«Жигулёвское»	38,4	43,5	40,7	47,1	52,1	53,5	53,1	45,3	42,4	37,6	43,6	48
2	«Легенда Донбасса»	50,2	52,4	51,7	53,5	55,2	56,7	56	54,3	52,4	51,3	51,8	52,2
3	«Медведь»	25,4	26,4	25	27,1	28,1	30	29,2	26,5	24,7	23,2	24,4	27,4
4	«Кружка Свежего»	4,9	4,9	4,8	5,1	5,3	5,5	5,5	5,4	5,1	4,8	4,6	5,1
5	«Добрый Шубин»	11,1	11,3	11,5	12,4	12,8	13,1	13	12,9	12,6	11,9	12	12,5

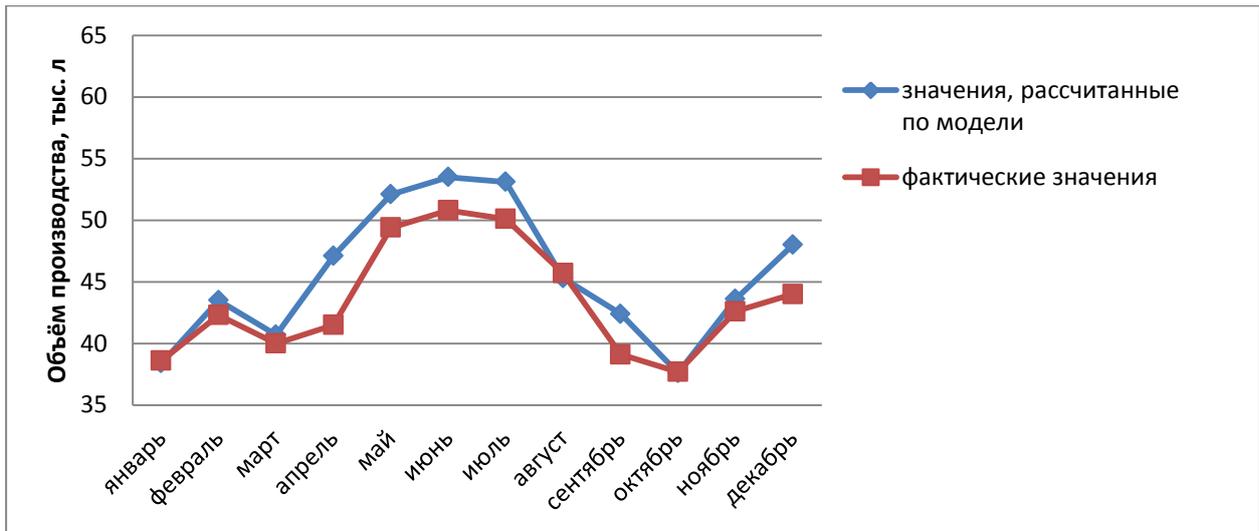


Рисунок 2 — Прогнозные и фактические объёмы производства пива сорта «Жигулёвское» за календарный год

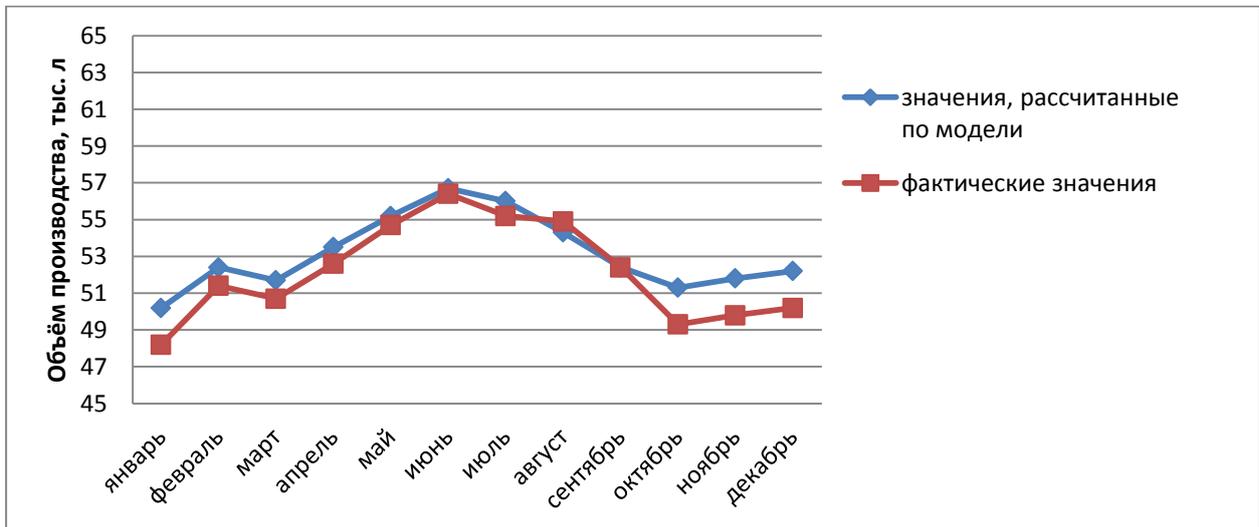


Рисунок 3 — Прогнозные и фактические объёмы производства пива сорта «Легенда Донбасса» за календарный год

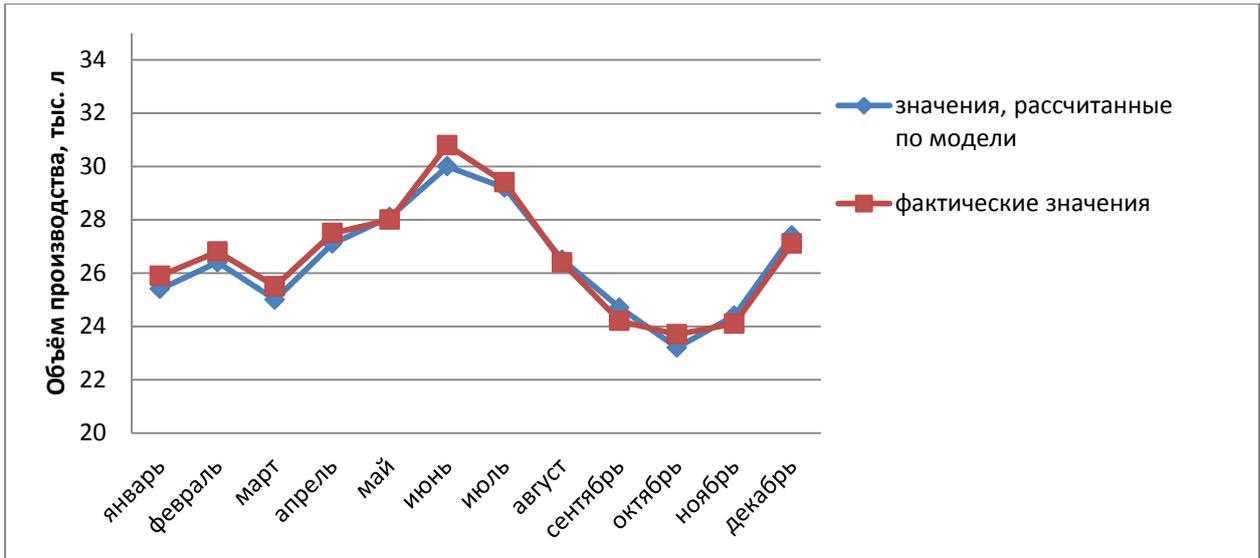


Рисунок 4 — Прогнозные и фактические объемы производства пива сорта «Медведь» за календарный год

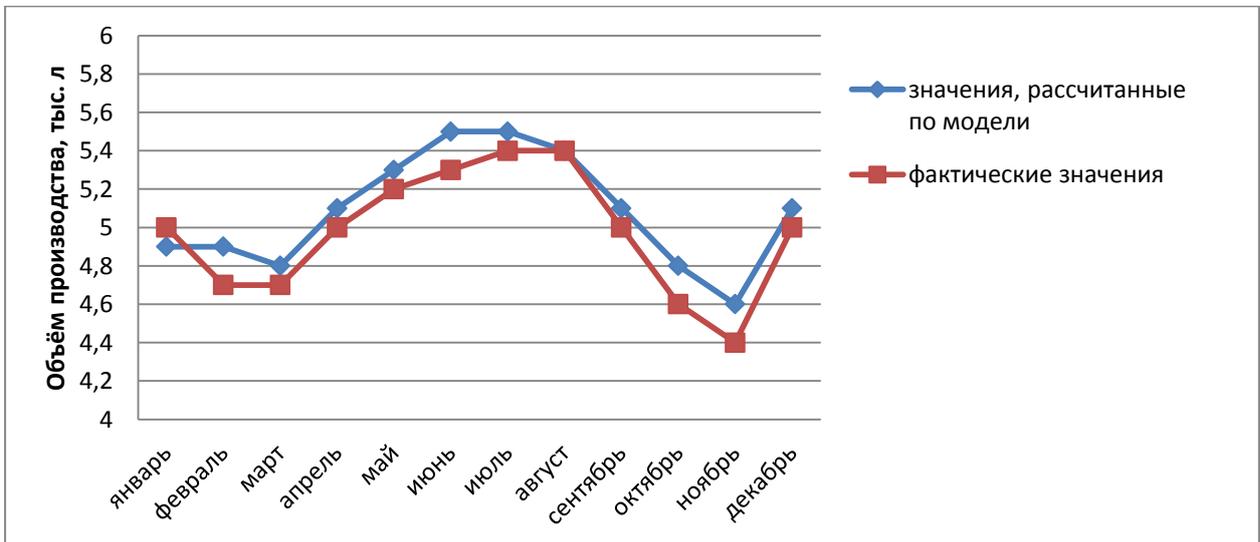


Рисунок 5 — Прогнозные и фактические объемы производства пива сорта «Кружка Свежего» за календарный год

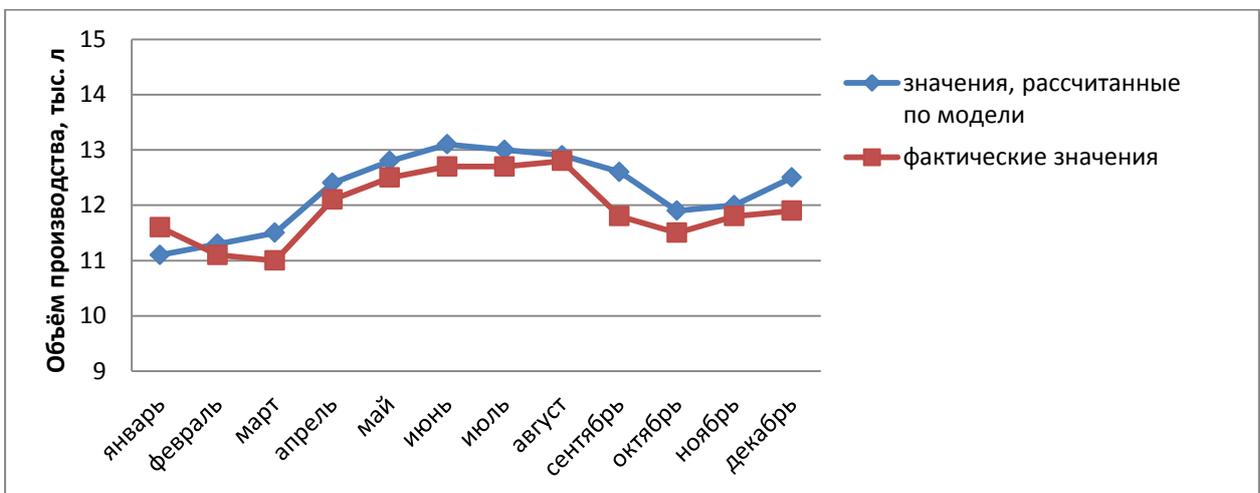


Рисунок 6 — Прогнозные и фактические объемы производства пива сорта «Добрый Шубин» за календарный год

Как видно из рисунков 2–6, спрос на продукцию пивоваренного завода носит сезонный характер. Объёмы производства пива принимают наибольшие значения в мае – августе, наименьшие — в январе, феврале, марте, октябре, ноябре.

Лицами, принимающими решение по разработанному алгоритму, т.е. пользователями данного алгоритма системы управления производством являются менеджеры отдела планирования.

Так как конечная цель предприятия — распределить произведенную продукцию конечным потребителям, это позволяет сформулировать вторую задачу управления его экономической деятельностью.

2. Постановка задачи управления логистическими операциями.

Физическая постановка задачи управления логистическими операциями в соответствии с заказами от точек сбыта продукции: необходимо определить показатели сбыта готовой продукции предприятия по маршрутам таким образом, чтобы спрос на продукцию был максимально удовлетворён. В качестве критерия оптимальности принимается минимум общего объёма грузооборота при полном удовлетворении запросов потребителей на доставку готовой продукции всем потребителям (выполнение условия «один маршрут — один автомобиль»).

Формальная постановка второй задачи управления представлена в виде функционала (8):

$$J_1^2 = \sum_{k=1}^{15} f_k(V_k, M_k) = f_k^*(V_k, M_k) \rightarrow \max_{V_k, M_k} f_k^*, \quad (8)$$

где  $J_1^2$  — функционал цели задачи планирования программы доставки грузов предприятия;  $V_k$  — общий объём доставки пива всех сортов по каждому из составленных маршрутов  $M_k$ ,  $k = \overline{1,15}$ .

Функционалы целей, сформулированные в постановках задач управления, предназначены для того, чтобы решение по балансовой модели выполнялось с наименьшими отклонениями между показателями загрузки производственных мощностей и отгруженной по соответствующим маршрутам готовой продукции конечным потребителям, участвующим в формировании заявок на изготовление продукции.

Выполнение плана поставок пивоваренной продукции потребителям, произведенной и разлитой в тару (блок 3 балансовой модели), осуществляется при выполнении условия (9):

$$\sum_{j=1}^5 \Pi_j(M_k) = V_k, \quad V_k = \sum_{j=1}^5 Z_{jk}, \quad (9)$$

$$j = \overline{1,5}, \quad k = \overline{1,15},$$

где  $Z_{jk}$  — объёмы доставки пива каждого из сортов  $\Pi_j$  по каждому из маршрутов  $M_k$ .

Данная задача подчинена условию, что готовая продукция не может перемещаться обратно от потребителя к поставщику, что отражено в выражении (10):

$$Z_{jk} \geq 0. \quad (10)$$

Решение задачи (8) осуществляется в рамках блока 4 балансовой модели при ограничениях, представленных системой уравнений моделей вида (11).

Для параметрической идентификации математической модели по результатам транспортно-логистической деятельности предприятия была сформирована обучающая выборка, осреднённый результат которой отражает фактические объёмы сбыта пива конечным потребителям по соответствующим маршрутам в 2019 году, на основании которых производилась настройка алгоритма (табл. 4).

Параметры моделей прогноза сбыта пива рассчитывались по статистической выборке ежемесячных показателей доставки пива потребителям за 72 месяца истекшего периода (12):

$$B_2 = (\bar{Z}^T \cdot \bar{Z})^{-1} \cdot \bar{Z}^T \cdot \bar{V}, \quad (12)$$

где  $\bar{Z}$  — информационная матрица, составленная для сбыта пива в течение 72 месяцев;  $\bar{Z}^T$  — транспонированная матрица  $\bar{Z}$ ;  $\bar{V}$  — вектор численных значений количества доставленного пива потребителям по соответствующим маршрутам.

На предприятии была осуществлена опытно-промышленная эксплуатация алгоритма системы принятия решений, результаты которой отражены в численном решении задачи управления транспортно-логистической деятельностью ООО «ДПЗ» (8) с прогнозом значений объёмов сбыта пива потребителям на 2020 год (табл. 5).

$$\forall M_k \left\{ \begin{aligned}
 V_1 &= -218,55 + 3,29Z_{11} + 2,74Z_{21} + 15,02Z_{31} + 28,39Z_{41} + 15,67Z_{51}, \\
 V_2 &= -195,66 + 1,56Z_{12} + 4,33Z_{22} + 29,67Z_{32} + 35,04Z_{42} + 12,88Z_{52}, \\
 V_3 &= -368,32 + 10,12Z_{13} + 6,54Z_{23} + 37,72Z_{33} + 25,69Z_{43} + 20,15Z_{53}, \\
 V_4 &= -249,35 + 4,80Z_{14} + 3,16Z_{24} + 18,91Z_{34} + 24,62Z_{44} + 14,18Z_{54}, \\
 V_5 &= -263,38 + 4,68Z_{15} + 5,84Z_{25} + 15,71Z_{35} + 32,22Z_{45} + 16,49Z_{55}, \\
 V_6 &= -388,65 + 15,50Z_{16} + 10,84Z_{26} + 95,36Z_{36} + 58,99Z_{46} + 61,03Z_{56}, \\
 V_7 &= -596,34 + 22,46Z_{17} + 20,13Z_{27} + 86,33Z_{37} + 47,59Z_{47} + 58,31Z_{57}, \\
 V_8 &= -477,85 + 17,25Z_{18} + 19,64Z_{28} + 82,23Z_{38} + 51,57Z_{48} + 58,98Z_{58}, \\
 V_9 &= -42,50 + 2,47Z_{19} + 3,08Z_{29} + 21,09Z_{39} + 20,15Z_{49} + 13,26Z_{59}, \\
 V_{10} &= -74,59 + 4,19Z_{110} + 3,07Z_{210} + 8,40Z_{310} + 15,66Z_{410} + 9,32Z_{510}, \\
 V_{11} &= -38,18 + 0,98Z_{111} + 1,16Z_{211} + 9,28Z_{311} + 5,06Z_{411} + 4,14Z_{511}, \\
 V_{12} &= -39,02 + 2,15Z_{112} + 1,80Z_{212} + 13,44Z_{312} + 3,69Z_{412} + 4,87Z_{512}, \\
 V_{13} &= -173,58 + 11,23Z_{113} + 6,84Z_{213} + 25,12Z_{313} + 22,17Z_{413} + 17,17Z_{513}, \\
 V_{14} &= -115,28 + 3,06Z_{114} + 3,11Z_{214} + 19,19Z_{314} + 15,54Z_{414} + 13,54Z_{514}, \\
 V_{15} &= -220,99 + 3,46Z_{115} + 4,85Z_{215} + 30,32Z_{315} + 24,04Z_{415} + 15,21Z_{515}.
 \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Таблица 4 — Фактические значения показателей объёмов сбыта пива потребителям, полученные за 2019 год (обучающая выборка)

Маршруты $M_k$		Предельные ежемесячные значения объёмов сбыта пива, тыс. л											
Месяцы													
№	Наименование	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Донецк-1	21,8	22,3	22,5	21,2	22,0	22,5	23,0	23,4	22,5	21,3	21,0	21,4
2	Донецк-2	19,2	19,0	19,6	19,8	20,1	20,5	20,8	20,9	20,4	19,3	19,1	19,2
3	Донецк-3	36,9	36,4	36,8	36,9	37,4	37,6	37,7	37,6	37,1	36,9	36,5	36,5
4	Донецк-4	24,9	24,5	24,8	25,1	25,3	25,4	25,4	25,4	25,0	24,6	24,3	24,3
5	Донецк-5	26,2	26,4	26,4	26,6	27,0	27,1	27,2	27,2	27,1	26,5	26,4	26,5
6	Донецк – Макеевка-1	38,8	38,4	38,6	38,9	39,2	39,3	39,5	39,7	39,0	38,5	38,1	38,4
7	Донецк – Макеевка-2	59,4	59,1	59,3	59,7	59,9	60,1	60,3	60,2	60,1	59,5	59,5	59,9
8	Донецк – Макеевка-3	47,4	47,0	47,2	47,6	47,9	48,2	48,2	48,1	47,6	47,5	47,3	47,6
9	Донецк – Докучаевск	4,4	4,2	4,3	4,4	4,6	4,8	4,8	4,8	4,7	4,4	4,2	4,3
10	Донецк – Новоазовск	7,3	7,1	7,3	7,5	7,6	7,9	8,0	8,1	7,7	7,4	7,1	7,2
11	Донецк – Амвросиевка	3,6	3,6	3,7	3,9	4,0	4,2	4,3	4,2	4,1	4,0	3,8	3,6
12	Донецк – Снежное	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,3	4,3	4,3	4,0	4,0	4,0	4,2
13	Донецк – Горловка	17,1	17,0	17,5	17,6	17,9	18,0	18,0	17,8	17,6	17,4	17,3	17,3
14	Донецк – Дебальцево	11,4	11,1	11,3	11,3	11,5	11,8	11,9	12,0	11,8	11,4	11,3	11,3
15	Донецк – Луганск	22,0	21,8	21,9	22,0	22,5	22,8	22,9	22,9	22,7	22,5	22,5	22,4

Таблица 5 — Расчётные значения прогноза объёмов сбыта пива потребителям, полученные по моделям за 2020 год (контрольная выборка)

Маршруты $M_k$		Предельные ежемесячные значения объёмов сбыта пива, тыс. л											
№	Наименование	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Донецк-1	21,8	22,4	22,5	21,5	22,2	22,6	23,0	23,7	22,4	21,4	21,3	21,8
2	Донецк-2	19,7	19,2	19,9	19,9	20,3	20,7	20,9	20,8	20,5	19,6	19,1	19,4
3	Донецк-3	36,9	36,3	36,9	37,0	37,4	37,8	37,8	37,6	37,3	36,7	36,6	36,9
4	Донецк-4	25,0	24,8	24,8	25,3	25,4	25,5	25,7	25,7	25,4	24,9	24,4	24,8
5	Донецк-5	26,4	26,8	26,6	26,9	27,4	27,5	27,8	27,8	27,2	26,5	26,5	27,0
6	Донецк – Макеевка-1	38,7	38,3	38,7	39,1	39,3	39,4	39,7	39,8	39,2	38,6	38,4	39,0
7	Донецк – Макеевка-2	59,7	59,4	59,5	59,8	59,9	60,4	60,6	60,5	59,8	59,5	59,6	60,0
8	Донецк – Макеевка-3	47,9	47,4	47,5	47,6	47,8	48,4	48,5	48,3	47,9	47,6	47,3	47,8
9	Донецк – Докучаевск	4,4	4,2	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	4,8	4,6	4,4	4,6
10	Донецк – Новоазовск	7,6	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	8,3	7,9	7,5	7,3	7,5
11	Донецк – Амвросиевка	3,7	3,5	3,7	4,0	4,1	4,3	4,4	4,4	4,3	4,0	3,9	4,0
12	Донецк – Снежное	3,8	3,7	3,9	4,0	4,1	4,3	4,5	4,4	4,2	3,9	4,0	4,1
13	Донецк – Горловка	17,6	17,1	17,8	17,9	18,0	18,2	18,3	18,2	18,0	17,7	17,6	17,9
14	Донецк – Дебальцево	11,6	11,2	11,2	11,4	11,7	11,8	12,0	12,1	11,9	11,5	11,4	11,6
15	Донецк – Луганск	22,4	22,1	22,1	22,3	22,6	22,9	23,1	23,2	22,9	22,6	22,5	22,7

Адекватность моделей по контрольной выборке, полученная при сопоставлении показателей таблиц 4 и 5 в статистическом соотношении отклонений расчётных и фактических значений, подтверждается показателями дисперсии остаточной масштабированной, не превышающей 4,5%.

Для удобства графического представления данных маршруты сгруппированы следующим образом: 1) Донецкое направление — включает точки сбыта для ( $M_1 - M_5$ ), 2) Макеевское направление — ( $M_6 - M_8$ ), 3) «южное» —

( $M_9 - M_{10}$ ), 4) «восточное» — ( $M_{11} - M_{12}$ ) и 5) «северное» — ( $M_{13} - M_{15}$ ). Таким образом, качество работы системы управления в течение исследуемого периода можно проиллюстрировать рис. 7 – 11, где представлены графики прогнозируемых объёмов доставки пива потребителям по укрупнённым направлениям маршрутов для рекомендуемых оптимальных и принятых ЛПР решений по планированию сбытовой деятельности предприятия, сопоставленные с графиками фактических показателей.

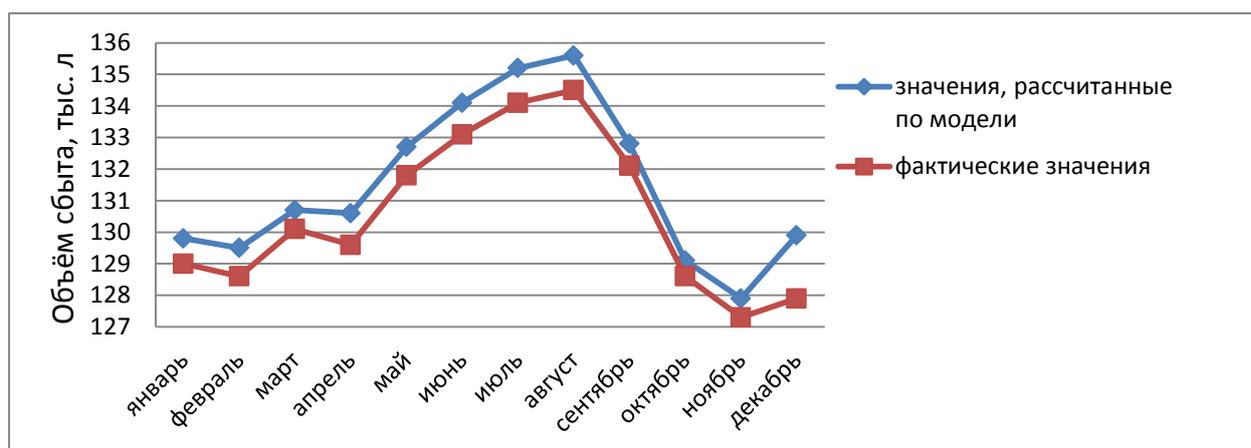


Рисунок 7 — Прогнозные и фактические объёмы сбыта пива по г. Донецку за календарный год

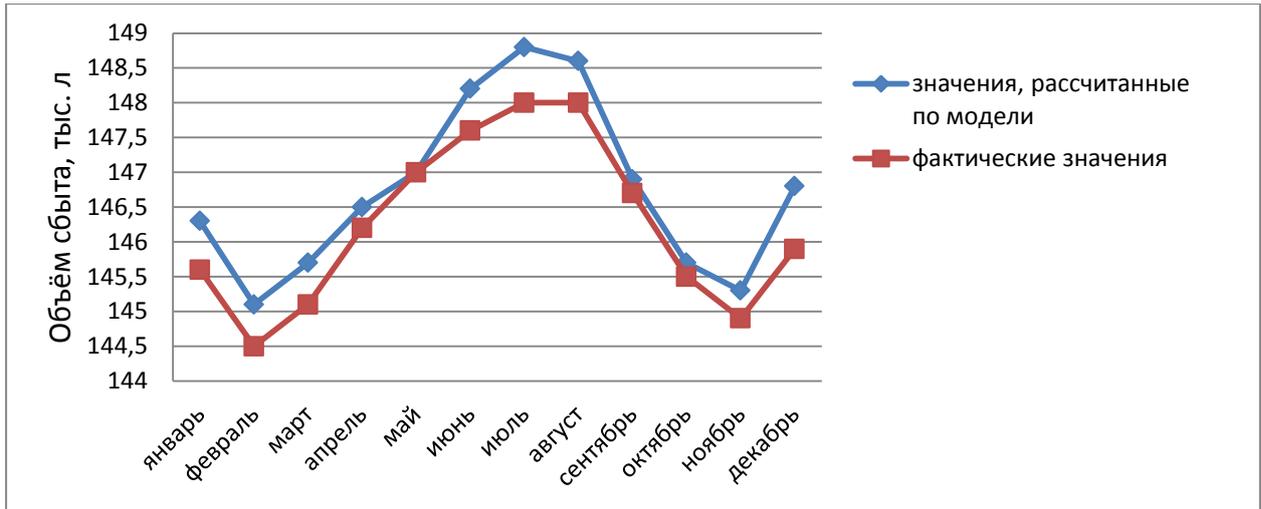


Рисунок 8 — Прогнозные и фактические объемы сбыта пива по г. Макеевке за календарный год

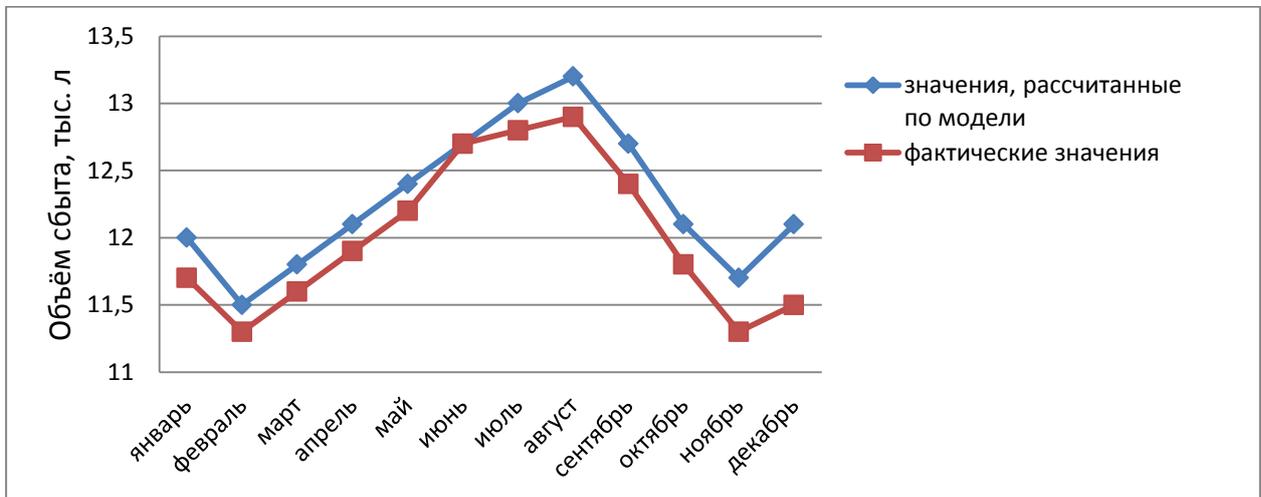


Рисунок 9 — Прогнозные и фактические объемы сбыта пива в «южном» направлении за календарный год

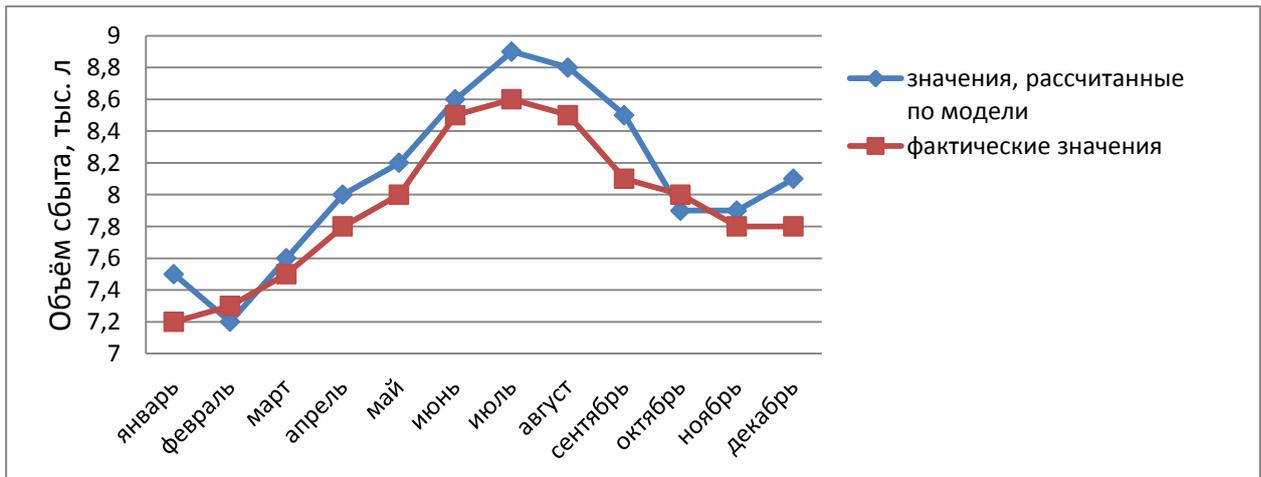


Рисунок 10 — Прогнозные и фактические объемы сбыта пива в «восточном» направлении за календарный год

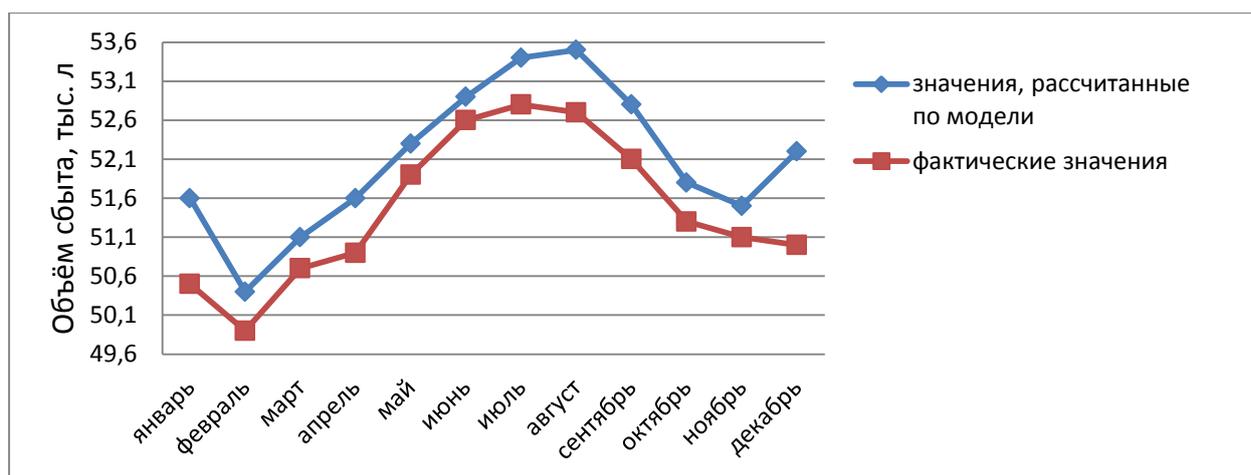


Рисунок 11 — Прогнозные и фактические объемы сбыта пива в «северном» направлении за календарный год

Как видно из рис. 7–11 доставка пивоваренной продукции конечным потребителям также носит сезонный характер. Объёмы сбыта пива принимают наибольшие значения в мае–августе, наименьшие — в феврале, октябре, ноябре.

Пользователями в задаче логистики перемещения грузов предприятия являются менеджеры транспортного отдела и службы продаж предприятия.

Обобщение численных решений, полученных в задачах управления производственной деятельностью и логистическими операциями на предприятии, даёт численное решение обобщенной задачи управления производственно-логистической деятельностью ООО «ДПЗ» с определёнными значениями объемов производства пива по сортам и доставки готовой продукции предприятия потребителям по составленным маршрутам за исследуемый период. Представленные таблично и графически значения решений, рекомендуемых системой управления, и их сопоставление с фактическими показателями деятельности предприятия за аналогичные периоды подтверждает адекватность приведенных рассуждений и алгоритмов, позволяющих осуществлять эффективное управление экономико-производственной деятельностью предприятия.

### Выводы

Научная новизна данной работы заключается в формулировании и решении постановок задач управления производственно-сбытовой деятельностью предприятия среднего уровня производственной иерархии. Теоретическая значимость исследования заключается в формализации и декомпозиции методов решения оптимизационных задач планирования программ производства пива и

доставки готовой продукции потребителям. Практическая значимость работы состоит в разработке алгоритмов системы управления производством и перевозками продукции пивоваренного завода. Реализация разработок предполагается к использованию менеджерам отдела планирования, транспортного отдела и службы продаж ООО «ДПЗ».

### Литература

1. Згуровский, М. З. Системный анализ: проблемы, методология, приложения / М. З. Згуровский, Н. Д. Панкратова. – К.: Наук. думка, 2005. – 744 с.
2. Томашевский, В. М. Моделирование систем / В. М. Томашевский. — К.: Издательская группа BVV, 2005. — 352 с.
3. Дмитрюк, Т. Г., Зори, С. А. Анализ структуры производственной деятельности предприятия как объекта управления / Т. Г. Дмитрюк, С. А. Зори // Проблемы искусственного интеллекта. – Донецк: ГУ ИПИИ. – 2020. – №1 (16). – С. 37–52.
4. Дмитрюк, Т. Г., Зори, С. А. Анализ характеристик транспортно-логистической системы предприятия / Т. Г. Дмитрюк, С. А. Зори // Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем (ПИИВС-2020): сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции студенческая секция), Том. 2. 25-26 ноября 2020 г. – Донецк, ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», 2020. – С. 93–100.
5. Дмитрюк, Т. Г. Математическая модель планирования производственной программы предприятия / Т. Г. Дмитрюк // Проблемы искусственного интеллекта. – Донецк: ГУ ИПИИ. – 2020. – № 2 (17). – С. 26–42.
6. Дмитрюк, Т. Г. Проблемы прогноза и управления планированием производственной

программы предприятия / Т. Г. Дмитриук // Искусственный интеллект: теоретические аспекты и практическое применение: материалы Донецкого международного круглого стола. – Донецк: ГУ ИПИИ, 2020. – С. 16–21.

7. Фельдбаум, А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем / А. А. Фельдбаум. – М.: Наука, 1966. – 624 с.

*Дмитриук Т. Г., Зори С. А. Задачи планирования производственно-логистической деятельности предприятия. В работе рассматривается задача эффективного управления ресурсами предприятия. Выполнено формулирование и решение физической и формальной постановок задач управления производственно-логистической деятельностью предприятия среднего уровня производственной иерархии. Предложена балансовая модель управления ресурсами предприятия, приведены решения оптимизационных задач планирования производства и сбыта продукции потребителям. Разработаны алгоритмы системы управления производством и перевозками продукции предприятия, предложены рекомендации по их реализации.*

**Ключевые слова:** задача управления, балансовая модель, алгоритм системы управления, производство, логистика.

*Dmitriuk T., Zori S. Tasks of planning production and logistics activities of the enterprise. The paper is devoted the task of effective enterprise resource control. Formulation and solution of physical and formal tasks of control of production and logistics enterprise activities at the middle level of the production hierarchy is performed. A balance sheet model of enterprise resources control is proposed, optimization tasks solutions of production planning and sales of products to consumers is done. Algorithms of the enterprise production and transportation control system is developed, recommendations for their implementation is proposed.*

**Key words:** task of control, balance sheet model, control system algorithm, production, logistics.

Статья поступила в редакцию 24.11.2021  
Рекомендована к публикации профессором Мальчевой Р. В.

## АНАЛИЗ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОТОКОЛОВ УДАЛЕННОГО ДОСТУПА К ПК

К. Н. Ефименко<sup>1</sup>, Д. В. Пауков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>доцент кафедры прикладной математики, <sup>2</sup>магистрант гр. ПМКм-21  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк)  
e-mail: [KN\\_Efimenko@mail.ru](mailto:KN_Efimenko@mail.ru), [denshik591@gmail.com](mailto:denshik591@gmail.com)

### Аннотация

*Выполнен краткий сравнительный анализ основных характеристик, особенностей использования и преимуществ современных криптографических протоколов, обеспечивающих защищённую передачу данных между узлами в сети Интернет и при удалённом доступе к ПК. TLS/SSL – протокол для шифрования передаваемой информации и аутентификации. IPSec – набор протоколов для безопасного обмена информацией по сетевому протоколу IP. SSH – протокол для удалённого управления операционными системами и туннелирования. TCP-соединения. Описаны этапы установления соединения.*

### Введение

Сетевой протокол – это комплекс установок, благодаря которым определяется и регулируется процесс информационного обмена между компьютерами, подключёнными к Интернету.

Функционирование сети основывается на работе сразу нескольких протоколов, располагаемых на разных уровнях. В настоящее время распространены две сетевые модели передачи данных.

TCP/IP – сетевая модель передачи данных, которая описывает способ передачи данных от источника информации к получателю. Модель предусматривает прохождение информации через четыре уровня, каждый из которых описывается протоколом передачи данных, на которых базируется Интернет.

OSI/ISO – сетевая модель стека сетевых протоколов, с помощью которой различные сетевые устройства взаимодействуют между собой. Модель предусматривает семь уровней взаимодействия систем. Каждый уровень выполняет определённые функции при таком взаимодействии.

Наиболее часто используемыми криптографическими протоколами, обеспечивающими защищённую передачу данных между узлами в сети Интернет, являются: TLS/SSL, IPSec и SSH-соединения. Каждый из перечисленных протоколов имеет свои особенности использования, достоинства и недостатки, но все они были приняты как Интернет-стандарт.

Целью данной работы является выполнение краткого анализа наиболее распространённых современных криптографических протоколов удалённого доступа к ПК, выбор и углублённое изучение которых должны помочь будущим

специалистам в области прикладной математики стать востребованными на рынке труда.

### Криптографические протоколы удалённого доступа

Проанализируем особенности использования и преимущества трех современных криптографических протоколов удалённого доступа.

#### 1. Протокол TLS/SSL.

В настоящее время все более актуальным становится использование цифровых сертификатов. Особенностью данной технологии является использование протоколов TLS/SSL. На рынке IT-услуг появились компании, которые бесплатно предоставляют цифровые сертификаты всем желающим, чтобы гарантировать шифрование трафика между посещаемыми сайтами и браузером клиента.

Сетевые протоколы SSL и TLS являются криптографическими протоколами, обеспечивающими аутентификацию и защиту от несанкционированного доступа, нарушения целостности передаваемых данных. Протоколы SSL/TLS предназначены для исключения подмены идентификатора на клиентской или серверной стороне, раскрытия или искажения данных. Для этих целей используется надёжный метод аутентификации, применяются шифрование канала связи и коды целостности сообщений.

Протокол TLS/SSL изначально был разработан компанией Netscape для защиты данных между сервисными и транспортными протоколами. Первая обнародованная версия была выпущена в 1995 году. Широко используется для VoIP-приложений, сервисов обмена мгновенными сообщениями. TLS/SSL представляет собой безопасный частный аутентифицированный ка-

нал. При транспортировке сообщений осуществляется проверка целостности с использованием MAC. Протокол TLS/SSL использует как симметричный, так и асимметричный ключи [1].

Протокол TLS/SSL обеспечивает решение двух задач – шифрование передаваемой информации и передача информации именно туда, куда требуется (аутентификация). Основное назначение протокола – предоставление надежного способа обмена данными между приложениями. Реализация SSL выполнена в виде многослойной среды, которая используется для безопасной передачи информации посредством незащищенных каналов связи.

Установка соединения обеспечивается в несколько этапов [2]:

1) Клиент устанавливает соединение с сервером и запрашивает защищенное подключение. Это может обеспечиваться либо установлением соединения на порт, который изначально предназначен для работы с SSL/TLS, например, 443, либо дополнительным запросом клиентом установки защищенного соединения после установки обычного.

2) При установке соединения клиент предоставляет список алгоритмов шифрования, которые он «знает». Сервер сверяет полученный список со списком алгоритмов, которые «знает» сам сервер, и выбирает наиболее надежный алгоритм, после чего сообщает клиенту, какой алгоритм использовать

3) Сервер отправляет клиенту свой цифровой сертификат, подписанный удостоверяющим центром, и открытый ключ сервера.

4) Клиент может связаться с сервером доверенного центра сертификации, который подписал сертификат сервера, и проверить, валиден ли сертификат сервера. Но может и не связываться. В операционной системе обычно уже установлены корневые сертификаты центров сертификации, с которыми сверяют подписи серверных сертификатов, например, браузеры.

5) Генерируется сеансовый ключ для защищенного соединения. Это делается следующим образом:

– клиент генерирует случайную цифровую последовательность;

– клиент шифрует ее открытым ключом сервера и посылает результат на сервер;

– сервер расшифровывает полученную последовательность при помощи закрытого ключа.

Учитывая, что алгоритм шифрования является асимметричным, расшифровать последовательность может только сервер. При использовании асимметричного шифрования используется два ключа – приватный и публичный. Публичным отправляемое сообщение шифруется, а приватным расшифровывается. Расшифровать сообщение, имея публичный, ключ нельзя.

6) Таким образом, устанавливается за-

шифрованное соединение. Данные, передаваемые по нему, шифруются и расшифровываются до тех пор, пока соединение не будет разорвано.

TLS/SSL имеет множество мер безопасности [3]:

– защита от понижения версии протокола к предыдущей (менее защищенной) версии или менее надежному алгоритму шифрования;

– нумерация последовательных записей приложения и использование порядкового номера в коде аутентификации сообщения (MAC);

– использование ключа в идентификаторе сообщения (только владелец ключа может сгенерировать код аутентификации сообщения). Алгоритм вычисления кода аутентификации (HMAC), используемый во многих сессиях TLS, определен в RFC 2104;

– сообщение, которым заканчивается подтверждение связи («Finished»), используется для подтверждения аутентичности ранее переданных сообщений и, таким образом, выбранных параметров TLS-соединения.

В общем случае применение криптографии в протоколах TLS/SSL значительно снижает производительность приложений, зато обеспечивает надежную защиту передачи данных. Протоколы не требуют практически никаких настроек с клиентской стороны, считаются самыми распространенными протоколами защиты в сети интернет. Последними версиями протокола являются TLS 1.2, опубликованная в 2008 году и TLS 1.3 – 2018 года.

## 2. Протокол IPSec.

Протоколы прикладного уровня, поддерживающие шифрование (например, HTTPS) не могут охватить все возможные сценарии использования. Поэтому реализация шифрования на сетевом уровне обеспечивает большую гибкость.

*IPSec* (Internet Protocol Security) – набор (стек) протоколов для безопасного обмена информацией по сетевому протоколу IP. Позволяет осуществлять подтверждение подлинности (аутентификацию), проверку целостности и/или шифрование IP-пакетов. IPSec также включает в себя протоколы для защищенного обмена ключами в сети Интернет. IPSec является набором стандартов Интернета и своего рода «настройкой» над IP-протоколом. В основном, применяется для организации VPN-соединений [3].

Базовой особенностью протокола является понятие SA (Security Association) – это набор параметров о том, как стороны будут в дальнейшем использовать те или иные свойства протоколов из состава IPSec.

Набор служб безопасности, которые может предоставлять IPSec, включает в себя контроль доступа, целостность без установления соединения, аутентификацию источника данных, отказ от повторных пакетов (форма частичной целостности последовательности), конфиденци-

альность (шифрование) и ограниченность конфиденциальности трафика. Поскольку эти услуги предоставляются на уровне IP, они могут использоваться любым протоколом более высокого уровня, например TCP, UDP и т.д. [4].

IPSec использует два протокола для обеспечения безопасности трафика:

– *AH* (Authentication Header) обеспечивает целостность без установления соединения, аутентификацию источника данных и дополнительную службу защиты от повтора. AH использует хэш-алгоритм для вычисления значения хэша, как для полезной нагрузки, так и для заголовка пакета, обеспечивая целостность пакета. Однако это вызывает очень специфическую проблему. AH не будет работать через NAT-устройство. NAT изменяет IP-заголовок пакета во время перевода, но значение хэша не изменяется. Таким образом, принимающее устройство будет полагать, что пакет был изменен при передаче и произойдет отклонение пакета;

– *ESP* (Encapsulating Security Payload) обеспечивает как полную, так и ограниченную конфиденциальность (шифрование) трафика, а также может обеспечивать подключение. Протокол обеспечивает целостность без установления соединения, аутентификацию источника данных и службу защиты от повтора. Таким образом, ESP выполняет шифрование и по своей сути более безопасен, чем AH. ESP вводит в пакет как дополнительный заголовок, так и трейлер. ESP также использует алгоритм хеширования для целостности данных. Однако хэш не включает IP-заголовок пакета, и, таким образом, ESP будет (обычно) работать через NAT-устройство.

Оба протокола AH и ESP являются транспортными средствами для контроля доступа на основе распределения криптографических ключей и управления потоками трафика по отношению к этим протоколам безопасности. Эти протоколы могут применяться отдельно или в сочетании друг с другом для обеспечения требуемого набора служб безопасности [4].

Каждый протокол поддерживает два режима: транспортный и режим туннеля. В транс-

портном режиме протоколы обеспечивают защиту в основном для протоколов верхнего уровня; в туннельном режиме протоколы применяются к туннелированным IP-пакетам. IPSec позволяет пользователю (или системному администратору) контролировать степень детализации, в которой предлагается служба безопасности. Например, можно создать один зашифрованный туннель для переноса всего трафика между двумя шлюзами безопасности или отдельный зашифрованный туннель, который может быть создан для каждого TCP-соединения между каждой парой хостов, взаимодействующих через эти шлюзы. Руководство IPSec должно включать средства для указания:

- какие службы безопасности использовать и в каких комбинациях;
- гранулярность, при которой должна применяться данная защита;
- алгоритмы, используемые для обеспечения криптографической безопасности [4].

Поскольку эти службы безопасности используют общие секретные значения (криптографические ключи), IPSec опирается на отдельный набор механизмов для размещения этих ключей (ключи используются для служб аутентификации/целостности и шифрования). Этот документ требует поддержки как ручного, так и автоматического распределения ключей. Он определяет конкретный подход на основе открытого ключа для автоматического управления ключами, но могут использоваться другие автоматизированные методы распространения ключей.

Каждый протокол IPSec (AH или ESP) может работать в двух режимах – транспортном и туннельном [4].

Транспортный режим – используется для шифрования поля данных IP пакета, содержащего протоколы транспортного уровня (TCP, UDP, ICMP). Исходные IP-заголовки остаются нетронутыми (рис. 1). Используется при обеспечении связи с одного устройства на другое одно устройство.

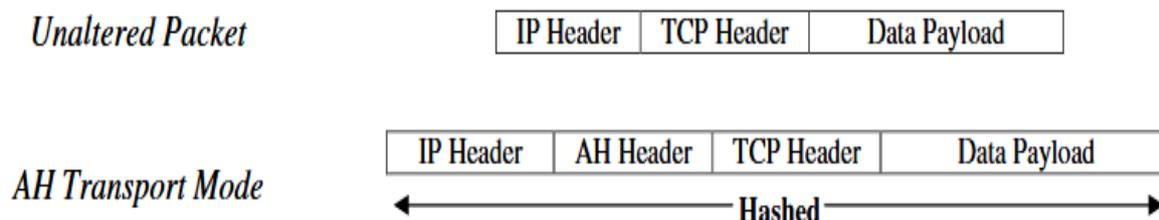


Рисунок 1 – Изменение IP-пакета протоколом AH

Туннельный режим – предполагает шифрование всего пакета, включая заголовок сетевого уровня. Во время транзита к пакету применяется временный IP-заголовок (рис. 2). Туннель-

ный режим применяется в случае необходимости скрытия информационного обмена организации с внешним миром.

Взаимодействие двух узлов начинается с

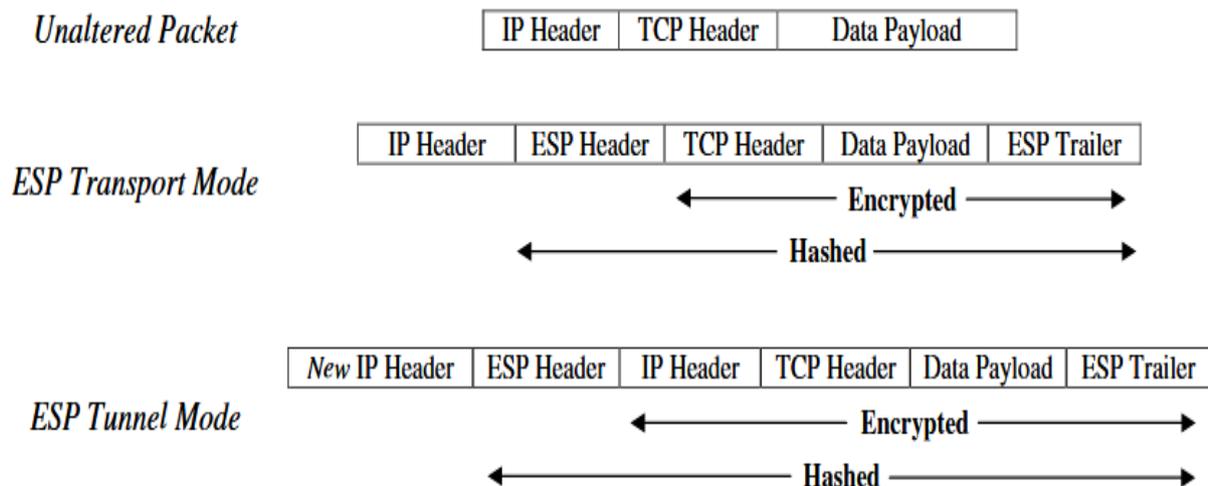


Рисунок 2 – Изменение IP-пакета протоколом ESP

установления SA. Точнее с двух согласований – для протокола AH и ESP причем в одну и в другую стороны. SA начинается с аутентификации и затем стороны согласовывают будущие параметры сессии [5]:

1) для протокола AH – используемый алгоритм аутентификации, ключи, время жизни ключей и другие параметры;

2) для протокола ESP – алгоритмы шифрования и аутентификации, ключи, параметры инициализации, время жизни ключей и другие параметры.

При этом стороны договариваются о туннельном или транспортном режиме работы IPSec.

Установка соединения проходит две фазы [5]:

На фазе 1 происходит установление SA первой фазы. В первой фазе стороны договариваются о методе идентификации, алгоритме шифрования, алгоритме хэширования и группе Диффи-Хеллмана. Эта фаза может пройти путем обмена тремя нешифрованными пакетами (агрессивный режим) или шестью нешифрованными пакетами – стандартный режим. Если все прошло успешно, то создается SA фазы 1 под названием IKE SA (IKE – протокол, связывающий все компоненты IPSec в работающее целое) и осуществляется переход ко второй фазе.

На фазе 2 стороны договариваются о политике и создаются сами ключи. Эта фаза, в отличие от первой полностью шифруется и она наступает только в случае успешного окончания первой фазы. В связи с тем, что трафик этой фазы полностью шифрован, становится сложно осуществлять поиск неполадок, однако если все прошло успешно, то создается SA фазы 2 под названием IPSec SA. В этот момент можно сказать, что туннель установлен.

Согласованные на двух фазах ключи должны работать оговоренное политикой время. Это означает, что сторонам возможно предстоит

пережить процедуру смены ключей (rekeying), а иначе согласованные SA распадутся. Как было сказано выше, у сторон есть ключи в рамках процесса фазы 1 (IKE) и фазы 2 (IPsec). Процедуры их смены различны, как и таймеры, которые за это отвечают. Для того, чтобы не было перерыва связи в процессе смены ключей стороны сначала согласовывают параметры новой SA и лишь после этой успешной процедуры уничтожают старую SA [5].

Важным аспектом является способность IPsec устанавливать соединение заново. Для этого существуют настройки в ipsec.conf, однако детали этих настроек могут отличаться от версии ПО.

### 3. Протокол SSH.

SSH (Secure Shell) – это протокол удаленного администрирования, разработанный для осуществления удаленного управления операционными системами и туннелирования TCP-соединения. Использование этого протокола допускает использование разных алгоритмов шифрования, что позволяет безопасно работать практически в любой незащищенной среде: работать с ПК через командную оболочку, передавать по зашифрованному каналу любой тип данных [6]. Протокол относится к прикладному уровню сетевой модели передачи данных.

Протокол SSH организует безопасное соединение над небезопасными каналами передачи данных. Особенностью протокола является шифрование по выбранному алгоритму всего передаваемого трафика, в том числе и паролей.

Первый релиз протокола состоялся в 1995 г, а уже в 1996 г была представлена усовершенствованная его версия, которая и стала основой для дальнейшего развития продукта. Протокол SSH-1 имел некоторые ошибки в схеме обеспечения безопасности. Он был средством безопасной аутентификации. Протокол второй версии, то есть SSH-2, отвечает всем современным требованиям к шифрованию и обеспечивает

невозможность подмены трафика путем пересылки контрольных сумм [7].

SSH – это коммерческий продукт и предоставляется на платной основе. Присутствует и бесплатная версия – *OpenSSH*, которую использует большинство программистов. Обе версии схожи между собой командами. Релиз последнего обновления протокола OpenSSH 8.6 за апрель 2021 г. можно найти по ссылке <http://www.openssh.com/txt/release-8.6>.

Сегодня для всех сетевых ОС доступны SSH сервер и SSH клиент, а сам протокол SSH является одним из самых популярных решений для удаленного управления системами и передачи важной информации.

SSH-сервер обычно прослушивает соединения на TCP-порту 22. Для аутентификации сервера в SSH используется протокол аутентификации сторон на основе алгоритмов электронно-цифровой подписи RSA или DSA, но допускается также аутентификация при помощи и даже IP-адреса [3].

Аутентификация по паролю наиболее распространена. При каждом подключении подобно HTTPS вырабатывается общий секретный ключ для шифрования трафика.

При аутентификации по ключевой паре предварительно генерируется пара открытого и закрытого ключей для определённого пользователя. На машине, с которой требуется произвести подключение, хранится закрытый ключ, а на удалённой машине – открытый. Эти файлы не передаются при аутентификации, система лишь проверяет, что владелец открытого ключа также владеет и закрытым. При данном подходе, как правило, настраивается автоматический вход от имени конкретного пользователя в ОС.

Аутентификация по IP-адресу небезопасна, эту возможность чаще всего отключают.

Для создания общего сеансового ключа используется алгоритм Диффи-Хеллмана. Для шифрования передаваемых данных используется симметричное шифрование, алгоритмы AES, Blowfish или 3DES. Целостность передачи данных проверяется с помощью CRC32 в SSH1 или HMAC-MD5 в SSH2.

Для сжатия шифруемых данных может использоваться алгоритм LempelZiv (LZ77), который обеспечивает такой же уровень сжатия, что и архиватор ZIP. Сжатие SSH включается лишь по запросу клиента, и на практике используется редко [3].

Одной из основных особенностей протокола является туннелирование. SSH-туннель – это туннель, создаваемый посредством SSH-соединения и используемый для шифрования туннелированных данных. Используется для того, чтобы обезопасить передачу данных в Интернете (аналогичное назначение имеет IPsec). При пересылке через SSH-туннель незашифрованный

трафик любого протокола шифруется на одном конце SSH-соединения и расшифровывается на другом.

Основным недостатком протокола SSH является то, что он не имеет средств защиты от действий злоумышленника, получившего root-доступ. Одной из мер предосторожности является запрет на удалённый root-доступ.

Один из наиболее популярных SSH-клиентов – программа Putty. Она используется для обеспечения удаленного доступа. Клиент FireSSH реализован как расширение браузера Firefox. Такой способ делает возможным использование программы в разных ОС. Для браузера Google Chrome есть другой официальный клиент – Secure Shell. Для использования в UNIX подходит программа OpenSSH. Для ее применения желателен опыт работы с командной оболочкой SSH. Для Windows подходит эмулятор терминалов Xshell, который позволяет отправлять команды нескольким серверам одновременно [6].

Алгоритм установления соединения в протоколе SSH можно разделить на три уровня, каждый из которых располагается над предыдущим: транспортный (открытие защищённого канала), аутентификация, подключение. В качестве предварительного уровня можно добавить уровень установки сетевого соединения, хотя официально этот уровень находится ниже SSH.

## Выводы

При использовании SSL/TLS одним из основных методов является метод MITM (Man In The Middle – человек посередине). Этот метод основывается на использовании серверного сертификата и ключа на каком-то узле, который будет прослушивать трафик и расшифровывать информацию, которой обмениваются сервер и клиент. Для организации прослушивания можно использовать, например, программу *sslsniff*. Поэтому корневой сертификат и ключ обычно желательно хранить на машине, которая не подключена к сети, для подписания приносить запросы на подпись на флэшке, подписывать и так же уносить.

Использование IPsec протокола имеет как положительные стороны: высокая криптоустойчивость; возможность использования L2TP внутри IPsec для аутентификации по имени пользователя и паролю, так и отрицательные: сложен для настройки и поиска неисправностей; большие накладные расходы на передачу трафика в канале за счет заголовков.

Протокол IPsec используется, в основном, для организации VPN-туннелей. В этом случае протоколы ESP и AH работают в режиме туннелирования.

Использование SSH подключения имеет ряд преимуществ: безопасная работа на удалённом ПК с использованием командной оболочки;

использование разных алгоритмов шифрования (симметричного, асимметричного и хеширования); возможность безопасного использования любого сетевого протокола, что позволяет передавать по защищенному каналу файлы любого размера [6]. Таким образом, SSH – один из самых безопасных протоколов для реализации удаленного доступа к ПК, что делает его самым популярным вариантом для удаленного администрирования компьютеров и безопасной передачи данных.

Область применения протокола SSH практически не ограничена. Исходя из его основной функции – удаленного входа в операционную систему, протокол используют: системные администраторы для удаленной настройки компьютеров локальной сети; для настройки почтовых служб; для скрытого обмена внутри сети массивными файлами; для Интернет-игр.

Таким образом, без использования криптографических протоколов при удаленном доступе не возможна работа ни одной компании. Удаленный доступ требуется повсеместно как для сотрудников, так и для технического персонала.

## Литература

1. Starlink [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.starlink.ru/articles/ssl-tls>. – Загл. с экрана.
2. Блог про Linux, Bash и другие информационные технологии [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://mnorin.com/tls-ssl-neobhodimu-j-minimum-znaniy.html>. – Загл. с экрана.
3. Свободная энциклопедия Википедия [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org>. – Загл. с экрана.
4. Сайт lanmarket.ua [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://lanmarket.ua/entsiklopediya/telekommunikatsionnye-tekhnologii/ipsec.html>. – Загл. с экрана.
5. VPNKI [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://ua.vpnki.ru/questions/technologies/ipsec>. – Загл. с экрана.
6. Хостинг Freehost [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://freehost.com.ua/faq/wiki/chto-takoe-ssh/>. – Загл. с экрана.
7. Сила технологий [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://ipipe.ru/info>. – Загл. с экрана.

*Ефименко К. Н., Пауков Д. В. Анализ криптографических протоколов удаленного доступа к ПК. Выполнен краткий сравнительный анализ основных характеристик, особенностей использования и преимуществ современных криптографических протоколов, обеспечивающих защищенную передачу данных между узлами в сети Интернет и при удаленном доступе к ПК. TLS/SSL – протокол для шифрования передаваемой информации и аутентификации. IPSec – набор протоколов для безопасного обмена информацией по сетевому протоколу IP. SSH – протокол для удаленного управления операционными системами и туннелирования. TCP-соединения. Описаны этапы установления соединения.*

**Ключевые слова:** анализ, криптографический протокол, TLS/SSL, IPSec, SSH.

*Efimenko K. N., Paukov D. V. Analysis of cryptographic protocols for remote PC access. Performed a brief comparative analysis of the main characteristics, uses and advantages of modern cryptographic protocols that provide secure transmission of data between nodes on the Internet and with remote access to the PC. TLS/SSL – protocol for encrypting transmitted information and authentication. IPSec – a set of protocols for the secure exchange of information over a network protocol IP. SSH – protocol for remote control of operating systems and tunneling. The steps to establish a connection are described.*

**Keywords:** analysis, cryptographic protocol, TLS/SSL, IPSec, SSH.

*Статья поступила в редакцию 20.11.2021  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.*

УДК 517.927.2:517.925.44:538.93:537.533.9

## О моделировании диффузии неравновесных неосновных носителей заряда, генерированных электронным пучком в многослойной полупроводниковой мишени

М.А. Степович<sup>1\*</sup>, Д.В. Туртин<sup>2\*\*</sup>, В.В. Калманович<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, Калуга

<sup>2</sup> Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,  
Ивановский филиал, Иваново

[\\*m.stepovich@mail.ru](mailto:m.stepovich@mail.ru), [\\*\\*turtin@mail.ru](mailto:turtin@mail.ru), [\\*\\*\\*v572264@yandex.ru](mailto:v572264@yandex.ru)

### Аннотация

*Изучены некоторые аспекты математического моделирования и качественного анализа стационарного процесса диффузии неравновесных неосновных носителей заряда, обусловленного взаимодействием широкого пучка киловольтных электронов с многослойными планарными структурами конечной толщины с произвольным числом слоёв. Рассмотрены вопросы корректности этих математических моделей и приведён обзор результатов таких качественных исследований за последнее время.*

### Введение

В полупроводниковом материаловедении при проведении исследований материалов с использованием пучков киловольтных электронов наиболее часто (пожалуй, за исключением рентгено-спектрального микроанализа [1]) в качестве информативного регистрируется сигнал, обусловленный внешним воздействием и связанный с генерацией и диффузией в полупроводниковой мишени неравновесных неосновных носителей заряда (ННЗ) и/или регистрируются сигналы, характеристики которых существенно зависят от ННЗ – например ток, наведённый электронным зондом или катодолюминесценция (КЛ) [2, 3]. Ранее вопросы количественной оценки влияния внешнего воздействия на распределение ННЗ в результате их диффузии в однородном полупроводнике в сочетании с рассмотрением единственности решения дифференциальных уравнений тепломассопереноса и корректности используемых математических моделей рассматривались весьма редко. Пожалуй, наиболее подробно такие задачи рассматривались для остро сфокусированных пучков: моделировалась нестационарная диффузия неравновесных ННЗ в методе времяпролётной КЛ полупроводников [4-7] и результаты математического моделирования сравнивались с результатами экспериментальных исследований [6-10]. Также для времяпролётной КЛ проводилась оценка влияния изменений во внешнем воздействии на распределение ННЗ после диффузии ННЗ, а для КЛ и излучательной рекомбинации в полупроводнике [11-14], в ряде работ проводилось доказательство единственности решения дифференциальных уравнений диффузии и оценка корректности рассматриваемых моделей [15-

17]. Для широких электронных пучков количественный анализ подобных задач не проводился, пожалуй, за исключением рассмотрения некоторых возможностей качественного анализа процессов диффузии ННЗ в многослойных планарных полупроводниковых структурах, образованных тонкими слоями в объёме толстой полупроводниковой подложки [18-22], а также рассмотрение корректности математической модели т.н. коллективной диффузии неосновных носителей заряда в однородной полупроводниковой мишени конечной толщины [23].

### Постановка задачи

В настоящей работе методами математического моделирования продолжены исследования диффузионных процессов, обусловленных взаимодействием широких электронных пучков с полупроводниками. Объектами изучения являются математические модели, описывающие процессы диффузии неравновесных ННЗ, генерированных широким пучком киловольтных электронов в многослойных планарных структурах конечной толщины с произвольным числом слоёв.

### **Математическая модель одномерной диффузии неравновесных ННЗ, генерированных плоским бесконечно тонким источником, некоторые возможности её использования и оценки**

Для тонкого планарного источника ННЗ, находящегося на глубине  $z_0$ ,  $z_0 \in [0, \infty)$ , рассматриваемая математическая модель может быть записана как [24, 25]:

$$D \frac{d^2 \Delta p(z, z_0)}{dz^2} - \frac{\Delta p(z, z_0)}{\tau} = -\rho(z) \delta(z - z_0) \quad (1)$$

с граничными условиями

$$D \left. \frac{d \Delta p(z, z_0)}{dz} \right|_{z=0} = v_s \Delta p(0, z_0), \Delta p(\infty, z_0) = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\Delta p(z, z_0)$  – распределение ННЗ после их диффузии в однородной полупроводниковой мишени.

Искомое распределение по глубине неравновесных ННЗ  $\Delta p(z)$  в однородной мишени может быть получено как

$$\Delta p(z) = \int_0^\infty \Delta p(z, z_0) dz_0. \quad (3)$$

Отметим, что данный подход может быть использован для нахождения распределений ННЗ в результате их диффузии как в однородных, так и в планарных двух- [26, 27] и трехслойных [28-30] полупроводниковых мишенях. В принципе решение может быть получено и для большего числа слоев многослойной полупроводниковой мишени, однако это сопряжено с существенными трудностями технического характера и потому этот способ к положительному результату не привёл: на основании рассмотрения решений для двух- и трёхслойных структур нам не удалось найти закономерность в формулах для решения дифференциальных уравнений и описать алгоритм решения задачи для произвольного числа слоёв многослойной структуры.

При наличии внешних воздействий на изучаемый полупроводник для математической модели будем иметь различные функции  $\rho_1(z)$  и  $\rho_2(z)$  в правой части дифференциального уравнения (1) и, соответственно, два различных его решения  $\Delta p_1(z, z_0)$  и  $\Delta p_2(z, z_0)$ , а, следовательно, для  $\Delta p_1(z)$  и  $\Delta p_2(z)$ . Можно показать, что для однородной мишени при выполнении условия

$$|\rho_2(z) - \rho_1(z)| \leq \varepsilon \quad (4)$$

справедливы оценки

$$|\Delta p_2(z, z_0) - \Delta p_1(z, z_0)| \leq \varepsilon \tau / L$$

и

$$|\Delta p_2(z) - \Delta p_1(z)| \leq \varepsilon \tau.$$

Отсюда следуют существование и единственность решения дифференциального уравнения (1) с граничными условиями (2), т.е. корректность математической модели (1)-(3) и многослойных математических моделей, построенных на основе модели (1)-(3).

### Математическая модель одномерной диффузии неравновесных ННЗ в многослойной планарной мишени конечной толщины, некоторые возможности её использования и оценки

Рассматриваемая математическая модель может быть записана как [32-34]

$$\frac{d}{dz} \left( D^{(i)}(z) \frac{d \Delta p^{(i)}(z)}{dz} \right) - \frac{\Delta p^{(i)}(z)}{\tau^{(i)}(z)} = -\rho^{(i)}(z), \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

с граничными условиями

$$\begin{cases} D^{(1)} \left. \frac{d \Delta p^{(1)}(z)}{dz} \right|_{z=0} = v_s^{(1)} \Delta p^{(1)}(0), \\ D^{(n)} \left. \frac{d \Delta p^{(n)}(z)}{dz} \right|_{z=l} = -v_s^{(n)} \Delta p^{(n)}(l). \end{cases} \quad (6)$$

Верхний индекс в скобках указывает номер слоя. Для многослойной структуры используются обозначения:  $z_1 = 0$ ,  $z_{n+1} = l$  – внешние границы полупроводника,  $z_2, z_3, \dots, z_n$  – координаты границ раздела слоев;  $D^{(i)}$ ,  $L^{(i)}$ ,  $\tau^{(i)}$  – электрофизические параметры: коэффициент диффузии, диффузионная длина и время жизни ННЗ в  $i$ -м слое соответственно, при этом  $L^{(i)} = \sqrt{D^{(i)} \tau^{(i)}}$ . На границах полупроводника (при  $z = 0$  и при  $z = l$ ) приведенные скорости поверхностной рекомбинации  $S^{(1)} = L^{(1)} v_s^{(1)} / D^{(1)}$ ,  $S^{(n)} = L^{(n)} v_s^{(n)} / D^{(n)}$ , где  $v_s^{(1)}$  и  $v_s^{(n)}$  – скорости поверхностной рекомбинации ННЗ в первом и  $n$ -ом слоях соответственно.

В отличие от модели (1)-(3), такой подход позволяет получить точное аналитическое решение для произвольного числа слоёв [32-34]. Для постоянных коэффициента диффузии и времени жизни ННЗ в каждом слое дифференциальное уравнение (5) может быть записано в виде

$$y_i''(z) - b_i y_i(z) = f_i(z), \quad i = \overline{1, n}, \quad (7)$$

с граничными условиями

$$y_1(0) = g_1, \quad (8)$$

$$y_i'(z_i) = a_i y_i(z_i), \quad i = \overline{1, n}, \quad (9)$$

$$y_i(z_i) = y_{i+1}(z_i) \quad i = \overline{1, n-1}. \quad (10)$$

В результате для рассматриваемой задачи получим:

1) решением (7) являются функции

$$y_i(z) = a_{1i} \exp(b_i z) + a_{2i} \exp(-b_i z) +$$

$$+ \frac{1}{b_i} \int_{z_i}^z f_i(t) \operatorname{sh}[b_i(z-t)] dt, i = \overline{1, n};$$

2) из граничных условий (9) и (10) получаем систему рекурсивных уравнений, позволяющих сделать заключение о существовании и единственности рассматриваемой задачи:

$$\begin{aligned} a_{1i}(b_i - a_i) \exp(b_i z_i) &= a_{2i}(a_i + b_i) \exp(-b_i z_i), \\ a_{1i} \exp(b_i z_i) + a_{2i} \exp(-b_i z_i) &= \\ a_{1,i+1} \exp(b_{i+1} z_i) + a_{2,i+1} \exp(-b_{i+1} z_i) + \\ + \frac{1}{b_i} \int_{z_{i+1}}^{z_i} f_{i+1}(t) \operatorname{sh}[b_{i+1}(z_i - t)] dt, i &= \overline{1, n-1}; \end{aligned}$$

3) решение задачи (7)-(10) существует и оно единственно;

4) предварительное рассмотрение показало, что, используя описанный подход, могут быть получены оценки, аналогичные полученным оценкам в задаче одномерной коллективной диффузии неравновесных ННЗ, генерируемых широким электронным пучком в однородной полупроводниковой мишени конечной толщины.

### Заключение

Изучены математические модели стационарной диффузии неравновесных неосновных носителей заряда, генерируемых широким электронным пучком в планарных многослойных полупроводниковых материалах.

Получены оценки решений рассматриваемых задач, позволяющие использовать их в электронно-зондовых технологиях.

### Перспективы дальнейшего развития в данном направлении

По мнению авторов, основная проблема в развитии данного направления состоит в количественном описании правой части дифференциальных уравнений (5). Для многослойных структур, состоящих из слоёв материалов с близкими параметрами, прежде всего – близкими постоянными решёток слоёв – в правой части всех дифференциальных уравнений (5) (т.е.  $\forall i = \overline{1, n}$ ) можно использовать одну и ту же функцию  $\rho(z)$ , рассчитываемую для параметров, характерных для подложки. Такой подход может быть использован, например, для твёрдых растворов замещения, широко используемых в полупроводниковой оптоэлектронике [35, 20-21, 36]. Однако в общем случае необходимо учитывать немонохроматичность электронного пучка после прохождения первого и каждого из последующих слоёв структуры [37-39], что само по себе до сих пор является непросто задачей.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-03-00271), а также РФФИ и правительства Калужской области (проект № 18-41-400001).

### Литература

1. Llovet Xavier, Moy Aurelien, Pinar Philippe T., Fournelleb John H. Electron probe microanalysis: a review of recent developments and applications in materials science and engineering // Progress in Materials Science. 2021. V. 116. Art. No. 100673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100673>
2. Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применение / Под ред. Жу У., Уанга Ж.Л. М.: БИНОМ, 2013. 582 с.
3. Yacobi B.G., Holt D.B. Cathodoluminescence microscopy of inorganic solids. New York: Plenum Press, 1990. 354 p.
4. Поляков А.Н., Noltemeyer M., Hempel T., Christen J., Степович М.А. Двумерная диффузия и катодолуминесценция экситонов, генерированных электронным пучком в полупроводниковом материале: результаты математического моделирования // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2012. № 11. С. 35-40.
5. Polyakov A.N., Noltemeyer M., Hempel T., Christen J., Stepovich M.A. Two Dimensional Diffusion and Cathodoluminescence of Excitons Generated by an Electron Beam in a Semiconductor Material: Results of Mathematical Modelling // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2012. V. 6. No. 6. P. 901.
6. Поляков А.Н., Noltemeyer M., Hempel T., Christen J., Степович М.А. Оценка значений электрофизических параметров полупроводниковых материалов по результатам измерений катодолуминесценции экситонов // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 41-46.
7. Поляков А.Н., Степович М.А., Туртин Д.В. Трёхмерная диффузия экситонов, генерированных электронным пучком в полупроводниковом материале: результаты математического моделирования // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 12. С. 48-52. DOI: [10.7868/S0207352815120148](https://doi.org/10.7868/S0207352815120148)
8. Polyakov A.N., Stepovich M.A., Turtin D.V. Three-Dimensional Diffusion of Excitons Generated by an Electron Beam in a Semiconductor Material: Results of Mathematical Modeling // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2015. V. 9. No. 5. P. 1251-1255. DOI: [10.1134/S1027451015060361](https://doi.org/10.1134/S1027451015060361)
9. Поляков А.Н., Noltemeyer M., Hempel T., Christen J., Степович М.А. Катодолуминесцентные экспериментальные исследования транспорта экситонов в нитриде галлия // Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. № 9. С. 1082-1085.

10. Polyakov A.N., Noltemeyer M., Hempel T., Christen J., Stepovich M.A. Experimental Cathodoluminescence Studies of Exciton Transport in Gallium Nitride // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics.* 2012. V. 76. No. 9. P. 970-973.
11. Polyakov A.N., Smirnova A.N., Stepovich M.A., Turtin D.V. Qualitative properties of a mathematical model of the diffusion of excitons generated by electron probe in a homogeneous semiconductor material // *Lobachevskii Journal of Mathematics.* 2018. V. 39. No. 2. P. 259-262. DOI: 10.1134/S199508021802021X.
12. Туртин Д.В., Серегина Е.В., Степович М.А. Качественный анализ одного класса дифференциальных уравнений теплопереноса в конденсированном веществе // *Проблемы математического анализа: Межвузовский сборник.* 2020. Вып. 104. С. 149-156.
13. Turtin D.V., Seregina E.V., Stepovich M.A. Qualitative Analysis of a Class of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in a Condensed Material // *Journal of Mathematical Sciences (United States).* 2020. V. 250. Issue 1. P. 166-174. DOI: 10.1007/s10958-020-05008-4
14. Туртин Д.В., Степович М.А., Калманович В.В. // *Таврический вестник информатики и математики.* 2020. № 1 (46). С. 92-107. DOI: 10.37279/1729-3901
15. Stepovich, Mikhail A., Turtin Dmitry V., Seregina Elena V., Kalmanovich Veronika V. On the correctness of mathematical models of time-of-flight cathodoluminescence of direct-gap semiconductors // *ITM Web of Conferences.* 2019. V. 30. Art. No. 07014. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20193007014>
16. Stepovich M.A., Turtin D.V., Seregina E.V., Polyakov A.N. On the qualitative characteristics of a two-dimensional mathematical model of diffusion of minority charge carriers generated by a low-energy electron beam in a homogeneous semiconductor material // *Journal of Physics: Conf. Series.* 2019. V. 1203. Art. No. 012095. DOI: 10.1088/1742-6596/1203/1/012095
17. Turtin D.V., Stepovich M.A., Kalmanovich V.V., Seregina E.V. The Use of the Hankel Transform to Solve Nonstationary Diffusion Problem // *Journal of Mathematical Sciences (United States).* 2021. V. 255. No. 6. P. 773-778. DOI: 10.1007/s10958-021-05414-2
18. Серегина Е.В., Калманович В.В., Степович М.А. О моделировании распределений неосновных носителей заряда, генерированных широким электронным пучком в многослойных планарных полупроводниковых структурах // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2020. № 7. С. 69-74. DOI: 10.31857/S102809602007016X
19. Seregina E.V., Kalmanovich V.V., Stepovich M.A. On Modeling the Distributions of Minority Charge Carriers Generated by a Wide Electronic Beam in Planar Multilayer Semiconductor Structures // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* 2020. V. 14. No. 4. P. 713-717. DOI: 10.1134/S1027451020040163.
20. Калманович В.В., Серегина Е.В., Степович М.А. Математическое моделирование явлений теплопереноса, обусловленных взаимодействием электронных пучков с многослойными планарными полупроводниковыми структурами // *Известия РАН. Серия физическая.* 2020. Т. 84. № 7. С. 1020-1026. DOI: 10.31857/S0367676520070133
21. Kalmanovich V.V., Seregina E.V., Stepovich M.A. Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer Phenomena Caused by Interaction between Electron Beams and Planar Semiconductor Multilayers // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2020. V. 84. No. 7. P. 844-850. DOI: 10.3103/S1062873820070138
22. Stepovich M.A., Seregina E.V., Kalmanovich V.V., Filippov M.N. On some problems of mathematical modeling of diffusion of non-equilibrium minority charge carriers generated by kilovolt electrons in semiconductors // *Journal of Physics: Conf. Series.* 2021. V. 1740. Art. No. 012035. DOI: 10.1088/1742-6596/1740/1/012035
23. Степович М.А., Туртин Д.В., Калманович В.В. О корректности математической модели коллективной диффузии неосновных носителей заряда в однородной полупроводниковой мишени конечной толщины // *Научные труды Калужского государственного университета им. К.Э. Циолковского. Естественные и технические науки.* Калуга: КГУ им. К.Э. Циолковского, 2021. С. 219-225.
24. Белов А.А., Петров В.И., Степович М.А. Использование модели независимых источников для расчета распределений неосновных носителей заряда, генерированных в полупроводниковом материале электронным пучком // *Известия РАН. Серия физическая.* 2002. Т. 66. № 9. С. 1317-1322.
25. Belov A.A., Petrov V.I., Stepovich M.A. Model of independent sources used in calculation of minority charge carriers generated by electron beam in semiconductor // *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Ser. Fizicheskaya.* 2002. V. 66. No. 9 P. 1317-1323.
26. Степович М.А., Снопина М.Г., Хохлов А.Г. Использование модели независимых источников для расчёта распределения неосновных носителей заряда, генерированных в двухслойном полупроводнике электронным пучком // *Прикладная физика.* 2004. № 3. С. 61-65.
27. Stepovich M.A., Khokhlov A.G., Snopina M.G. Model of independent sources used for calculation of distribution of minority charge carriers generated in two-layer semiconductor by electron beam // *Proc. SPIE.* 2004. V. 5398. P. 159-165.
28. Снопина М.Г., Бурялова И.В., Петров В.И., Степович М.А. Анализ модели распределений неосновных носителей заряда, генерированных в трехслойной полупроводниковой

структуре широким электронным пучком // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2007. № 7. С. 1-6.

29. Snopova M.G., Burylova I.V., Petrov V.I., Stepovich M.A. Analysis of a Model of Minority Charge-Carrier Distributions Generated in a Three-Layer Semiconductor Structure by a Wide Electron Beam // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2007. V. 1. No. 4. P. 406-410.

30. Burylova I. V., Petrov V. I., Snopova M. G., Stepovich M. A. Mathematical simulation of distribution of minority charge carriers, generated in multi-layer semiconducting structure by a wide electron beam // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41. Вып. 4. С.458-461.

31. Burylova I.V., Petrov V.I., Snopova M.G., Stepovich M.A. Mathematical simulation of distribution of minority charge carriers, generated in multi-layer semiconducting structure by a wide electron beam // Semiconductors. 2007. V. 41. No. 4. P.444-447. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782607040161>

32. Гладышев Ю.А., Калманович В.В., Степович М.А. О возможности приложения аппарата Берса к моделированию процессов тепломассопереноса, обусловленного электронами в планарной многослойной среде // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 10. С. 105-110. DOI: 10.7868/S020735281710016X

33. Gladyshev Yu.A., Kalmanovich V.V., Stepovich M.A. On the Possibility of Applying the Bers Apparatus to Modeling the Processes of Heat and Mass Transfer Caused by Electrons in a Planar

Multilayer Medium // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2017. V. 11. Issue 5. P. 1096-1100. DOI: 10.1134/S1027451017050263

34. Stepovich M.A., Seregina E.V., Kalmanovich V.V., Filippov M.N. On some problems of mathematical modeling of diffusion of non-equilibrium minority charge carriers generated by kilovolt electrons in semiconductors // Journal of Physics: Conf. Series. 2021. V. 1740. Art. No. 012035. DOI: 10.1088/1742-6596/1740/1/012035

35. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фоторезисторы и фотоприемные устройства. М.: Физматкнига, 2012. 368 с.

36. Seregina E.V., Stepovich M.A., Kalmanovich V.V. Modeling of heating in the epitaxial structure  $Cd_xHg_{1-x}Te/CdTe$  with the projection least squares method // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. V. 1163. Art. No. 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1163/1/012013.

37. Михеев Н.Н., Степович М.А., Петров В.И. Энергетический спектр электронов, прошедших плёночную мишень // Известия РАН. Серия физическая. 1993. Т. 57. № 9. С. 7-11.

38. Mikheev N.N., Stepovich M.A., Petrov V.I. Energy Spectrum of Electrons Passing through a Film Target // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 1993. V. 57. No. 9. P. 1494-1497.

39. Mikheev N.N., Stepovich M.A. The Energy Spectrum of Electrons Passing through a Film Targets and some of its Applications to Electron Beam Engineering // Materials Science and Engineering B. 1995. V. 32. Nos. 1-4. P. 11-16.

**Степович М.А., Туртин Д.В., Калманович В.В. О моделировании диффузии неравновесных неосновных носителей заряда, генерированных электронным пучком в многослойной полупроводниковой мишени.** Изучены некоторые аспекты математического моделирования и качественного анализа стационарного процесса диффузии неравновесных неосновных носителей заряда, обусловленного взаимодействием широкого пучка киловольтных электронов с многослойными планарными структурами конечной толщины с произвольным числом слоёв. Рассмотрены вопросы корректности этих математических моделей и приведён обзор результатов таких качественных исследований за последнее время.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, широкий электронный пучок, полупроводниковая мишень, взаимодействие, неравновесные неосновные носители заряда, диффузия, корректность.

**Stepovich M.A., Turtin D.V., Kalmanovich V.V. On modeling the diffusion of nonequilibrium minority charge carriers generated by an electron beam in a multilayer semiconductor target.** Some aspects of mathematical modeling and qualitative analysis of the stationary diffusion process of nonequilibrium minority charge carriers caused by the interaction of a wide beam of kilovolt electrons with multilayer planar structures of finite thickness with an arbitrary number of layers are studied. The questions of the correctness of these mathematical models are considered and an overview of the results of such qualitative studies in recent years is given.

**Key words:** mathematical modeling, wide electron beam, semiconductor target, interaction, nonequilibrium minority charge carriers, diffusion, correctness.

Статья поступила в редакцию 22.11.2021  
Рекомендована к публикации профессором Федяевым О. И.

УДК 004.932:004.383.3/.5

## АНАЛИЗ АППАРАТНЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. И. Секирин, Н. Ф. Вустяк  
Донецкий национальный технический университет, Донецк  
e-mail: [krama59@yandex.ru](mailto:krama59@yandex.ru)

### **Аннотация**

*В статье рассматриваются вопросы эффективности применения различных аппаратных платформ для построения алгоритмов высокоскоростной обработки изображений. Рассматриваются платформы графических процессоров, платформы процессоров обработки сигналов и платформы программируемых логических интегральных схем. Для каждой платформы рассмотрены средства разработки программного обеспечения, что является неотъемлемой частью проектирования высокоскоростных алгоритмов обработки изображений и выбора платформы для реализации этих алгоритмов. Рациональный выбор платформы для высокоскоростной обработки изображений позволит значительно сократить время разработки и ресурсы готового изделия.*

### **Введение**

В последнее время широкое распространение получили методы анализа быстротекущих процессов при помощи высокоскоростной обработки видеоизображений [1]. Это стало возможным благодаря тому, что современные высокоскоростные цифровые камеры, основанные на матричных фотодиодных приемниках или приемниках на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС), представляют собой сверхбольшие интегральные схемы с внутрикристалльным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), что дает следующие преимущества:

- на выходе матриц формируется уже оцифрованный видеосигнал, причем матрицы могут быть как монохромные, так и цветные (RGB);

- наличие интегрированного АЦП в матрице значительно снижает шумы сигнальных цепей между аналоговой матрицей и самим АЦП;

- производитель матрицы уже оптимизировал тип используемого АЦП под решаемые задачи;

- применение таких матриц значительно упрощает разработку блока цифровой обработки видеоизображения.

Для реализации высокоскоростных алгоритмов цифровой обработки изображений требуются значительные вычислительные ресурсы. Обеспечение требуемых характеристик и быстродействия алгоритмов можно осуществить двумя способами: конструкторским (аппаратным) или алгоритмическим (программным). Учитывая специфичность портативного оборудования, как электронного изделия, для дальнейших разработок выбран

аппаратный способ реализации высокоскоростных алгоритмов обработки изображений.

Основной задачей выбора платформы для высокоскоростной обработки изображений является получение потока видеоизображения с помощью аппаратного блока, позволяющего производить ряд стандартных преобразований, использующего минимальное количество памяти и не имеющего существенной задержки выходного (преобразованного) изображения, при этом обладающего таким энергопотреблением, которое позволяет использовать данный блок в портативных (мобильных) устройствах.

Необходимость разработки аппаратного блока обработки видеоизображения обусловлена все возрастающей потребностью в использовании портативных систем, применяемых в мобильных устройствах, что свидетельствует об актуальности проводимых исследований.

### **Анализ платформы графических процессоров**

Использование CPU (Central Processing Unit) для реализации высокоскоростных алгоритмов обработки изображений не предусматривается. Основные причины такого подхода можно сформулировать в нескольких тезисах. Если современные CPU имеют суперскалярную архитектуру и внеочередное исполнение команд (out-of-order execution), то GPU (Graphics Processing Unit) выполняют инструкции по порядку (in-order) и имеют VLIW-архитектуру (very long instruction word) с возможностью распараллеливания процессов, что значительно упрощает вычислительные блоки, повышает быстродействие (в разы) и снижает

потребление энергии. Более того, CPU имеют сравнительно короткие векторные команды, а широкие векторы в GPU их сглаживают.

Также CPU-ядра обычно оптимизированы для работы на высокой частоте с высокими токами утечек (leakage), а GPU оптимизированы для работы на низкой частоте и при низком напряжении питания с меньшими утечками. В общем, в отличие от CPU, большая часть энергии в случае расчетов на GPU тратится именно на вычисления.

Современные CPU могут выполнять загрузку двух 256-битных регистров из кэша L1 параллельно или 64 байта за такт. GPU обладает унифицированным блоком разделяемой памяти/кэша L1.

Производительность блока одинакова для двух архитектур CPU и GPU. Но, GPU в составе имеет несколько блоков параллельной обработки процессов, а CPU только от 1 до 4 на ядро. Отсюда следует, что CPU менее производительны в сравнении с GPU для реализации высокоскоростных алгоритмов обработки изображений и требуют больших затрат на быстродействие и энергопотребления.

На рынке графических процессоров (GPU), в основном, представлены производители Intel, NVIDIA и AMD. На основе этих чипов строятся различные видеокарты, выпускаются встраиваемые (SoC) в процессор видео процессоры. Не каждый графический процессор может использоваться для пиксельной высокоскоростной обработки изображений.

Не все графические процессоры допускают программирование вычислительных процессов. Основным критерием выбора графического процессора (с учетом его быстродействия, объема оперативной памяти) является структура процессора (т.е. сколько потоков он обрабатывает за один такт) и возможность доступа к программированию вычислительных процессов в шейдерных процессорах.

Количество потоков GPU может быть от нескольких сотен до нескольких тысяч, в зависимости от чипа. Так, например, ядро чипа видеокарты GeForce RTX 2080 Ti (Turing) имеет конфигурацию 4352:272:88, что означает: 4352-унифицированных шейдерных процессора (независимых потоков), 272 текстурных блока и 88 блоков растеризации.

Список платформ был бы не полный, если не вспомнить платформы для мобильных устройств типа планшетов и мобильных телефонов. Наиболее распространенным представителем этого направления являются SoC процессоры от производителя Qualcomm. Основное отличие процессоров Qualcomm от других платформа это наличие сразу двух блоков DSP и GPU. Блок DSP отвечает за

вычислительные процессы (обработку изображений в пиксельной графике), а блок GPU за обработку векторной графики. Эти блоки связаны друг с другом. Блок DSP имеет VLIW-архитектуру, когда несколько исполнительных блоков исполняют одну и ту же инструкцию в параллели, а некоторые математические операции дополнительно ускорены при помощи специальных инструкций, чтобы обеспечить быстрое исполнение типичных операций при обработке сигналов типа быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier Transform - FFT).

Хотя производитель не указывает точных характеристик и структуры блоков DSP и GPU, по результатам работы алгоритмов обработки видеоизображений производительность этих блоков выше производительности CPU в сотни раз при низкой частоте обработки (от 300 до 500 МГц).

Среда программирования GPU является основным этапом реализации высокоскоростных алгоритмов обработки изображений. В настоящее время на рынке программного обеспечения существует несколько сред разработки для реализации высокоскоростных алгоритмов обработки изображений.

Отметим, что DirectX 11.1 и OpenGL 4.1 не реализуют в полном объеме обработку пиксельной графики. Эти среды предназначены для обработки векторной графики. Программировать вычислительные процессы, тем более по разработанным алгоритмам, - не реализуемая задача. Использование OpenCL 1.2 возможно, но его возможности для пиксельной графики ограничены.

На сегодняшний день рекомендована среда разработки Vulkan API, созданная компанией Khronos Group (разработчик OpenCL). Vulkan API, предоставляет улучшенную абстракцию для программирования графики на современных видеокартах. Vulkan API создана для программистов, которым нужно больше производительности, несмотря на более сложный и кропотливый процесс написания приложения. Среда Vulkan предназначена для программирования и вычислительных процессов алгоритмов обработки изображений и векторной графики. Эта среда универсальна для различных операционных систем (Windows, Linux, Android, Apple и др.), предназначена для, практически, всех видов и производителей GPU.

Но этот универсализм имеет недостаток. Компилятор автоматически не разбрасывает процессы по структуре GPU. Разбираться с архитектурой GPU программисту придется самостоятельно по документации на GPU и самому конфигурировать вычислительные потоки. Изначально, Vulkan была «заточен» под чипы GPU и SoC для процессоров GPU от AMD.

Для видеокарт с чипом NVIDIA используется среда разработки CUDA SDK. В основе интерфейса программирования приложений CUDA лежит язык Си с некоторыми расширениями. Для успешной трансляции кода на этом языке в состав CUDA SDK входит собственный Си-компилятор командной строки от компании NVIDIA. Компилятор создан на основе открытого компилятора Open64 и предназначен для трансляции host-кода (главного, управляющего кода) и device-кода (аппаратного кода, файлов с расширением \*.cu) в объектные файлы, пригодные для сборки конечной программы или библиотеки в любой среде программирования. В CUDA имеется возможность подключения к приложениям, использующим OpenGL и Direct3D. CUDA кроссплатформенное программное обеспечение для таких операционных систем, как LINUX, MacOSX и WINDOWS.

Для видеочипов GPU и SoC процессоров GPU от производителя Intel используется программная среда Intel C for Metal (ICM). Сам язык ICM представляет собой язык C++ с некоторыми ограничениями и расширениями. По сравнению с C++ в ICM отсутствуют указатели, выделение памяти и статические переменные. Под запретом рекурсивные функции.

Зато присутствует явная модель векторного программирования: векторные типы данных, матрицы и поверхности. Векторные операции на этих типах данных, векторные условия if/else, независимо выполняются для каждого элемента вектора.

Также присутствуют встроенные функции для доступа к аппаратной фиксированной функциональности Intel GPU. Работу с векторами, матрицами и поверхностями в реальных задачах облегчают объекты подмножеств. Из базовых объектов можно выбирать только интересующие блоки или, как частный случай, отдельные элементы по маске.

Процессоры GPU являются наиболее эффективной платформой для реализации высокоскоростных алгоритмов обработки видеоизображений. Но избыточность их аппаратной и программной реализации не всегда может быть использовано в портативной аппаратуре.

### **Анализ платформы процессоров обработки сигналов**

К особенностям цифровых высокоскоростных алгоритмов обработки видеоизображений следует отнести большой объем информации, поступающей в реальном времени в виде непрерывного потока данных [2, 3]. Их обработка требует от аппаратных средств высокой производительности и обеспечения возможности интенсивного обмена

данными с внешними устройствами. Выполнение указанных требований достигается благодаря использованию специальных процессоров с проблемно-ориентированной системой команд. Такие процессоры называются процессорами обработки сигналов (Digital Signal Processors - DSP). Они унаследовали от универсальных процессоров ряд свойств. В них широко используются методы сокращения длительности командного цикла, характерные для RISC-процессоров, такие как конвейеризация на уровне отдельных команд и микрокоманд, размещение операндов большинства команд в регистрах (регистровая адресация), использование теневых регистров для сохранения состояния вычислений при переключении контекста, разделение памяти и шин для команд и данных (гарвардская архитектура). Для DSP-процессоров присущ ряд особенностей:

- наличие аппаратного умножителя, позволяющего выполнять умножение двух чисел за один командный такт, в то время как в универсальных процессорах на умножение обычно затрачивается несколько тактов для выполнения последовательности операций сдвига и сложения;

- включение в систему команд таких операций, как умножение с накоплением ( $B = A * X + B$ ), инверсия бит адреса и другие функции над битами;

- аппаратная поддержка программных циклов и кольцевого буферирования.

Использование формата с плавающей точкой, при котором данные представляются в виде экспоненциальной функции, с одной стороны, существенно упрощает и ускоряет обработку изображений, повышает надежность программы, при этом не требуется выполнения операций округления и нормализации данных, отслеживания ситуаций переполнения и потери значимости данных; с другой стороны, усложняет функциональные устройства и технологию производства микросхем, увеличивает процент отбраковки готовых изделий и, как следствие, стоимость процессоров.

Основными производителями DSP являются Texas Instruments (54% рынка), Freescale Semiconductor (14,1% рынка) и Analog Device (8% рынка).

Производители DSP, проектируя новые микросхемы, достаточно четко позиционируют их для использования в тех или иных приложениях. Это оказывает влияние и на их архитектуру, и на быстродействие, и на оснащение процессора тем или иным набором периферийных модулей.

Для обработки видеоизображений, видеонаблюдения, цифровых камер и 3D графики наиболее часто используются процессоры Texas Instruments (серии: TMS320DM64x/DaVinci,

TMS320C64xx, TMS320C62xx), Philips (серии: PNX1300, PNX1500, PNX1700), Freescale (серия MPC52xx).

Для обработки видеозображений в медицинских приборах (для биометрии, измерительных систем в медицине) используются процессоры Texas Instruments (серии: TMS320C62xx, TMS320C67xx, TMS320C55xx, TMS320C28xx) и Analog Device серии SHARC+.

При выборе DSP-процессора для реализации высокоскоростных алгоритмов обработки изображений следует акцентировать внимание на его характеристиках.

Как и при выборе GPU, следует обратить внимание на число потоков, обрабатываемых процессором DSP. Проведем, для примера, сравнение процессора Texas Instruments (TI) TMS320C6748 с процессором Analog Device (AD) SHARC+ Dual-Core (серия ADSP-SC570/SC571/SC572/SC573/ADSP-21571/21573). В процессоре TI 8 функциональных блоков, два файловых регистра и два маршрута данных. Всего в этом процессоре  $2 \times 2 \times 8 = 32$  потока, при скорости ядра 456 МГц. В рассматриваемом процессоре SHARC+ Analog Device 2 ядра и 1 поток на ядро при частоте ядра 500 МГц. Понятно, что процессор TI можно использовать для реализации высокоскоростных алгоритмов обработки изображений. Процессор SHARC+ для наших задач использовать невозможно, невзирая на наличие в ядре ускорителей КИХ и БИХ фильтров.

Важной характеристикой при выборе сигнального процессора является формат данных и разрядность. Все процессоры DSP работают либо с целыми числами, либо с числами в формате с плавающей точкой, причем для целых чисел разрядность составляет 16 или 32 бита, а для чисел с плавающей точкой она равна 32 бита.

При выборе DSP необходимо тщательно анализировать алгоритм обработки и входные сигналы для правильного выбора разрядности и типа арифметики. Иногда, при невозможности подобрать подходящий процессор с плавающей точкой, используют DSP с фиксированной точкой и сжатие динамического диапазона обрабатываемых сигналов (компрессию). Но это приводит к увеличению сложности алгоритма обработки сигнала и повышает требования к быстродействию.

Ключевой параметр при выборе процессора - это скорость. Она влияет на время выполнения обработки входного сигнала и, следовательно, определяет его максимальную частоту.

Организация системы памяти процессора влияет на его производительность. Это связано с тем, что ключевые команды DSP-процессора являются многооперандными, и ускорение их

работы требует одновременного чтения нескольких ячеек памяти. Например, команда MAC требует одновременного чтения 2 операндов и самой команды для того, чтобы ее можно было выполнить за 1 такт. Это достигается различными методами, среди которых применение многопортовой памяти, разделение на память программ и память данных (Гарвардская архитектура), использование кэша команд.

Процессор DSP с плавающей точкой, обычно, предполагает работу с большими массивами данных и сложными алгоритмами, имеет либо встроенную память большого объема, либо большую разрядность адресных шин для подключения внешней памяти (а иногда и то, и другое). Выбор типа и объема памяти должен быть результатом тщательного анализа алгоритма, для которого используется DSP.

Степень сложности разработки алгоритмов для реализации высокоскоростных алгоритмов обработки изображений определяется средствами разработки. При этом необходимо иметь в виду, что удобства в разработке кода программы для разработчика (обычно связываемые с использованием при программировании DSP языков высокого уровня) в большинстве случаев оборачивается получением менее компактного и менее быстрого кода.

В современных условиях скорость разработки (и, следовательно, выхода нового изделия на рынок) может принести больше выгод, чем затраты времени на оптимизацию кода при написании программы на ассемблере.

При выборе DSP-процессора и средств разработки необходимо учитывать особенности архитектуры.

Пользователи компиляторов языков высокого уровня иногда замечают, что они генерируют лучший код для процессоров с плавающей точкой. Это происходит по нескольким причинам: во-первых, большинство языков высокого уровня изначально не поддерживают арифметику с фиксированной точкой, во-вторых, система команд DSP с фиксированной точкой более ограничена, и в-третьих, процессоры с плавающей точкой обычно накладывают меньшие ограничения на объем используемой памяти.

Оптимальный и быстродействующий код получается при компиляции программ на языках высокого уровня для VLIW-процессоров DSP (процессоры со сверхдлинным словом команды) с простой ортогональной RISC-системой команд и большими регистровыми файлами. Однако даже для этих процессоров генерируемый компилятором код получается более медленным по сравнению с оптимизированным вручную ассемблерным кодом. Возможность сначала смоделировать процесс обработки сигнала в

MathLab [8] с дальнейшей автоматической трансляцией его в программу для DSP позволяет избавиться от множества серьезных ошибок еще на начальном этапе разработки.

Тщательный выбор цифрового процессора еще на начальном этапе разработки может помочь избавиться от излишних затрат, связанных с выбором неподходящего DSP, и сократить как время разработки в целом, так и время и средства на выявление ошибок.

### **Анализ платформы ПЛИС**

Применение ПЛИС (программируемых логических интегральных схем) актуально для встраиваемых приложений реального времени, где важными факторами являются быстродействие и энергозатраты аппаратуры. Аппаратный параллелизм процессов в ПЛИС наиболее применим для реализации высокоскоростных алгоритмов обработки изображений. Однако простой перенос последовательных алгоритмов в ПЛИС не приводит к увеличению быстродействия, так как такие алгоритмы предназначены для последовательных (однопоточных) CPU. Для эффективного использования ПЛИС необходимо преобразовать последовательные алгоритмы в ракурсы параллелизма процессов и ресурсы конкретной ПЛИС. Все требования к аппаратуре, изложенные выше, сохраняются в ПЛИС.

Анализ эффективности аппаратуры для реализации высокоскоростных алгоритмов обработки изображений в ПЛИС невозможно в отрыве от анализа их конкретных производителей. Основные разработчики ПЛИС: АСТЕЛ, ALTERA, XILINX. Подход к анализу интересующих нас характеристик ПЛИС одинаков для всех моделей и версий, поэтому ограничимся рассмотрением продуктов разработчика XILINX. В рамках статьи не рассматриваются встраиваемые в ПЛИС процессоры: NIOS, NIOS II, PicoBlaze, MicroBLAZE. Эти процессоры, в основном, предназначены для управления, а не для обработки изображений в принципе.

Минимальные характеристики ПЛИС для реализации алгоритмов высокоскоростной обработки видеоизображений:

- системная тактовая частота, не менее 500 МГц;
- наличие аппаратных кэшей: L1 около 32К и L2 около 512К;
- количество DSP блоков, не менее  $54 \times$  число последовательных звеньев в каждом потоке алгоритма, допустим не менее  $54 \times 4 = 216$ ;
- DSP блок должен работать с арифметикой в формате 16/32 бит Float point;
- объем блочной памяти (BRAM) не менее  $216 \times 32 = 1728$  Kbit;

- возможность работы с памятью DDR2 или DDR3.

В XILINX такой чип находится в серии ZYNG-7000 [4, 5] – это NEON со встроенным SoC процессором. Этот процессор предназначен для обработки видео изображений. Согласно документации [6] на этот процессор, он имеет 32 параллельных потока и 32-х разрядный вектор вычислений. Алгоритм обработки изображений можно разбить на 32 параллельных потока и  $2^{32} = 4\,294\,967\,296$  вычислений. Так как NEON встроен в ZYNG-7000, то необходимые, перечисленные выше, характеристики ПЛИС для реализации высокоскоростных алгоритмов обработки изображений есть в наличии. Процессор NEON имеет возможность работать с изображениями с разрешением до 1080р. Наличие процессора NEON в серии ПЛИС ZYNG-7000 упрощает разработку высокоскоростных алгоритмов обработки изображений, так как видео процессор уже встроен в ПЛИС, оптимизирован, то разрабатывать его нет необходимости. Процессоров NEON в чипе может быть один (Z-7007S - Z-7014S) или два (Z-7010 - Z7100).

В статье [7] описан процессор IPPro. Авторы описывают эффективный 16-битный целочисленный процессор, способный работать на частоте 337 МГц, специально нацеленный на поток данных, наблюдаемый в сложных высокоскоростных алгоритмах обработки изображений.

Представленная архитектура использует выделенные инструкции доступа к потоку на входе и выходе, с 32-битной локальной памятью для хранения пикселей, промежуточных результатов и отдельной 32-битной памятью ядра для хранения коэффициентов фильтра, других параметров и констант.

Использование как параллелизма на уровне данных, так и параллелизма на уровне задач демонстрируется посредством сопоставления алгоритма кластеризации K-средних на архитектуру, показывая хорошую масштабируемость скорости обработки с использованием нескольких ядер IPPro.

В статье рассмотрен пример реализации разделения потока данных между ядрами IPPro и процессором ARM с этапами преобразования цвета и морфологической фильтрации, отображенными в IPPro. Опять же, реализация параллельных ядер IPPro может значительно ускорить высокоскоростные алгоритмы обработки изображений по сравнению с обычным программным обеспечением, не прибегая к утомительным усилиям по проектированию специального оборудования на других аппаратных платформах. Ядро IPPro может быть реализовано на других сериях XILINX, например на SPARTAN 3A.

Следует сделать замечание о программных средах для разработки алгоритмов. Во-первых, алгоритмы можно разрабатывать в MathLab [8] и в дальнейшем интегрировать в среду программирования ПЛИС. Во-вторых, среды программирования ПЛИС для ALTERA (QUARTUS) и XILINX (ISE и VIVADO) доступны в WEB версии и хорошо документированы, что вполне достаточно для пробных разработок. В эти среды программирования встроен симулятор, что упрощает отладку проектов до схемной разработки и изготовления образцов.

В ПЛИС можно реализовать алгоритм высокоскоростной обработки изображения любой сложности и быстродействия в рамках системной тактовой частоты.

### **Заключение**

Рассмотренные платформы реализации высокоскоростных алгоритмов обработки видеоизображений можно применить в аппаратуре различных отраслей народного хозяйства и в медицине:

- текстильная промышленность - оценка качества и текстуры полотна в реальном режиме времени до его выхода из цикла изготовления [9];

- металл литейное производство - визуальная (компьютерная) оценка качества литья с использованием медианных методов распознавания образов;

- железнодорожный транспорт - в задачах распознавания состояния несущих труб различных систем (системы отопления, кабели электроснабжения), по визуальной оценке их состояния на компьютере моделируются технологии их ремонта или замены [10];

- железнодорожный транспорт - распознавание лиц в потоке пассажиров в целях безопасности на транспорте [10];

- промышленная дефектоскопия - в системах контроля следующими методами: визуальным, спектроскопии, тепловизионного контроля, рентгенографии, ультразвуковой (все указанные методы используют быстродействующие алгоритмы распознавания образов);

- в медицине широко применяется платформа ПЛИС для реализации высокоскоростных алгоритмов обработки видеоизображений в таких приборах как визуализатор вен (трансиллюминатор), капилляроскоп (прибор для наблюдения циркуляции крови в капиллярах и поверхностных венах), в приборах визуализации различных тканей человека (тканей груди женщин, глазного яблока) для выявления злокачественных опухолей;

- при разработке систем тестирования аналоговых и аналого-цифровых схем методами цифровой обработки сигналов [11].

### **Литература**

1. Кестер, У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов. – М. : Техносфера, 2010. – 328 с.

2. Bier, Jeff. Choosing a Processor: Benchmarks and Beyond. - Berkeley Design Technology, Inc., 2006.

3. Choosing a DSP Processor. - Berkeley Design Technology, Inc., 1996-2000.

4. Zynq-7000 product selection product selection guide [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.xilinx.com/search/site-keyword-search.html?q=zynq-7000-product-selection-guide.pdf>.

5. Zynq-7000 SoC Data Sheet: Overview [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.xilinx.com/support/documentation/data\\_sheets/ds190-Zynq-7000-Overview.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds190-Zynq-7000-Overview.pdf)

6. Qin, Haoliang Boost Software Performance on Zynq-7000 AP SoC with NEON [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.xilinx.com/support/documentation/application\\_notes/xapp1206-boost-sw-performance-zynq7soc-w-neon.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp1206-boost-sw-performance-zynq7soc-w-neon.pdf)

7. Lu, Rui. The Design of FPGA-based Digital Image Processing System and Research on Algorithms / Rui Lu, Xiaohui Liu, Xiaodan Wang, Jin Pan, Kuangyi Sun, Hellen Waynes // International Journal of Future Generation Communication and Networking, 2017. - Vol. 10. - No. 2 (2017). - PP. 41-54.

8. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техно-сфера, 2006. – 616 с.

9. Новиков, А. Н. Разработка теоретических и методологических принципов создания систем компьютерного зрения для автоматизации контроля качества текстильных материалов : дис. ... доктора техн. наук : 05.13.06 / А. Н. Новиков. - Москва, 2014. – 287 с.

10. Локтев, Д. А. Методы и моделирование измерительной системы контроля объектов транспорта по их изображениям : дис. ... доктора техн. наук : 05.13.18 / Д. А. Локтев. - Москва, 2020. – 336 с.

11. Нестеренко, Д. О. Тестирование аналоговых и аналого-цифровых схем методами цифровой обработки сигналов / Д. О. Нестеренко, Ю. Е. Зинченко, В. Н. Соленов // Информатика и кибернетика, 2020. - №4(22). – С. 73-76.

**Секирин А. И., Вустяк Н. Ф. Анализ аппаратных платформ для обработки изображений.** В статье рассматриваются вопросы эффективности применения различных аппаратных платформ для построения алгоритмов высокоскоростной обработки изображений. Рассматриваются платформы графических процессоров, платформы процессоров обработки сигналов и платформы программируемых логических интегральных схем. Для каждой платформы рассмотрены средства разработки программного обеспечения, что является неотъемлемой частью проектирования высокоскоростных алгоритмов обработки изображений и выбора платформы для реализации этих алгоритмов. Рациональный выбор платформы для высокоскоростной обработки изображений позволит значительно сократить время разработки и ресурсы готового изделия.

**Ключевые слова:** высокоскоростная обработка изображений, процессоры обработки сигналов, системы на кристалле, программируемые логические интегральные схемы.

**Sekirin A. I., Vustyak N. F. Analysis of hardware platforms for image processing.** The article discusses the effectiveness of the use of various hardware platforms to build algorithms for high-speed image processing. It covers graphics processing unit (GPU) platforms, signal processor (DSP) platforms, and Field-Programmable Gate Array (FPGA) platforms. For each platform, software development tools are considered, which is an integral part of the design of high-speed image processing algorithms and the choice of a platform for implementing these algorithms. Rational choice of a platform for high-speed image processing will significantly reduce development time and finished product resources.

**Keywords:** high-speed image processing, digital signal processors, systems on a chip, field programmable gate arrays.

Статья поступила в редакцию 08.11.2021  
Рекомендована к публикации профессором Мальчевой Р. В.

## Разработка модифицированного алгоритма измерения физических величин для сенсорных систем

А. А. Койбаш

Донецкий национальный технический университет  
mr.koibash@gmail.com

### Аннотация

*С целью улучшения характеристик сенсорных систем выполнен анализ основных источников погрешностей микроэлектромеханических датчиков. Определено взаимное влияние датчиков внутри интеллектуальной сенсорной системы, а также выявлена важность сохранения информации о точности самих сенсоров. Для определения погрешности, связанной с непосредственными характеристиками устройства, проведён эксперимент с использованием датчика температуры и микроконтроллера на плате STM32F407G Discovery. На основании результатов эксперимента предложен модифицированный алгоритм измерения физических величин в сенсорных системах.*

### Введение

Современный мир сложно представить без цифровых устройств. И всё более серьёзную роль в нём занимают датчики, играющие роль сенсорной составляющей всей информационно-компьютерной инфраструктуры [1]. Сенсорные устройства уже получили большое распространение в повседневности (смартфоны и различные умные устройства), однако спектр их применения лишь продолжит расширяться [2, 3].

С целью поиска перспектив развития сенсоров в статье [4] рассмотрены характеристики отдельных видов датчиков фирмы Analog Devices. Так, анализ процесса развития акселерометров с начала их серийного производства (1991-й год) показал экспоненциальное снижение веса и тока питания. Для гироскопов обнаружены тенденции к уменьшению габаритов и улучшению шумовых характеристик. Эти процессы также примечательны ещё и тем, что происходят на фоне общего экспоненциального развития элементов всей информационно-компьютерной инфраструктуры [1, 5, 6].

На основании статистических данных выявлены закономерности, позволяющие путём экстраполяции прогнозировать развитие на ближайшее будущее. В результате прогноза можно сделать вывод о дальнейшей миниатюризации датчиков. При этом, согласно документации ряда устройств [7–9], наблюдается всё более плотная интеграция между датчиками различных видов для взаимной компенсации слабых сторон каждого из них. Например, в современные микроэлектромеханические акселерометры и гироскопы интегрированы датчики температуры. Это позволяет в достаточно большой степени компенсировать изменения чувствительности и смещение нуля остальных сенсоров.

Учитывая выявленные закономерности и общие тенденции в микроэлектронике, можно утверждать, что процесс взаимной интеграции датчиков в дальнейшем будет продолжаться и даже наращивать темпы. Вследствие этого возникает ситуация, при которой датчики зависят друг от друга, и точность одних сенсоров напрямую зависит от точности других. Таким образом, неточности аккумулируются со всех этапов процесса получения информации с устройства: от непосредственного измерения физической величины до компенсации значения на основании показаний другого датчика.

Данная проблема усиливается с растущей степенью интеграции датчиков в единые системы. В дополнение к этому можно отметить тот факт, что достаточно часто точностью жертвуют ради удешевления производства или ещё большего уменьшения габаритов. Вследствие этого необходим анализ влияния точности измерений на работу сенсорных систем.

### Анализ точности современных сенсоров

Точность является общим параметром для всех датчиков. Она представляет собой разницу между реальным значением измеряемой величины и значением, полученным в результате измерения. При серии измерений в идентичных условиях такие различия будут представлять собой случайную погрешность.

Появление таких погрешностей применительно к датчикам в большинстве случаев описывается законом нормального распределения Гаусса-Лапласа (рисунок 1), что следует из центральной предельной теоремы теории вероятностей – сумма бесконечно большого числа бесконечно малых случайных возмущений с любыми распределениями имеет нормальное распределение плотности вероятности. При измерении датчиком физической величины такими

бесконечно малыми случайными возмущениями является множество внешних факторов, ни один из которых не является преобладающим [10].

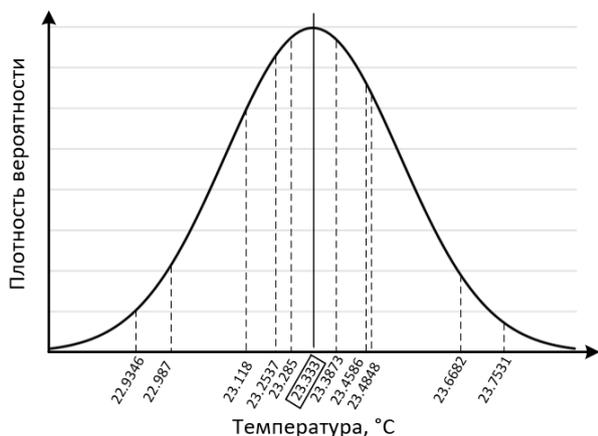


Рисунок 1 – Нормальное распределение Гаусса-Лапласа на примере значений температуры

Основными причинами, из-за которых изменяется точность измерений в сенсорных системах, являются следующие:

- внешние параметры окружающей среды;
- внутренние параметры самого датчика;
- конечная разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Как было описано ранее, результаты измерений одних датчиков могут оказывать влияние на сопутствующие вычисления при измерении других датчиков, входящих в ту же сенсорную подсистему. Поэтому для поиска путей решения данной проблемы необходимо определить, погрешность какой величины может возникать в датчиках электронных устройств, а также с какой причиной она может быть связана.

Так, в работе [11] описаны изменения внутри акселерометра при колебаниях температуры для следующих параметров:

- диэлектрической проницаемости;
- зазора между пластиной маятника и крышками;
- коэффициента упругости;
- теплового расширения.

Вышеописанные факторы вносят существенную погрешность. Поэтому с целью коррекции дополнительной температурной погрешности в сенсорных системах используются встроенные датчики температуры. Следовательно, исследование целесообразно выполнить на примере датчика температуры, поскольку он представляет собой хороший пример вспомогательного датчика в сенсорных системах, благодаря которому значительно расширяется температурный диапазон работы микроэлектромеханических акселерометров, гироскопов и магнитометров. Терморезистор обладает следующими особенностями:

- высокая чувствительность;
- небольшие размеры;

– удовлетворяющий целям эксперимента температурный диапазон  $[-50\text{ }^{\circ}\text{C}; +100\text{ }^{\circ}\text{C}]$ .

Для эксперимента использован микроконтроллер на плате STM32F407G Discovery, изображённый на рисунке 2. К аналоговому входу платы подсоединён терморезистор, преобразующий значение температуры в выходное напряжение (1). Квантование сигнала производится посредством 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя, обладающего диапазоном значений от 0 до 4095. Для уменьшения влияния разброса температуры был использован сосуд с веществом в жидком агрегатном состоянии с высокой удельной теплоёмкостью. Схема эксперимента отображена на рисунке 3.

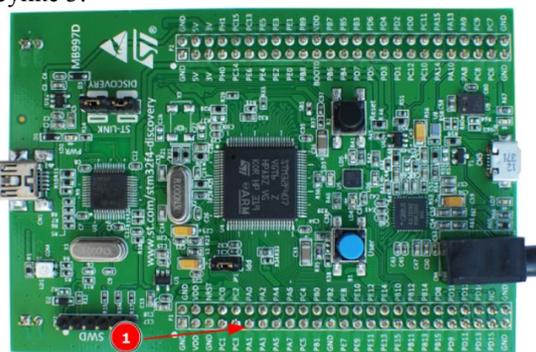


Рисунок 2 – Плата STM32F407G Discovery

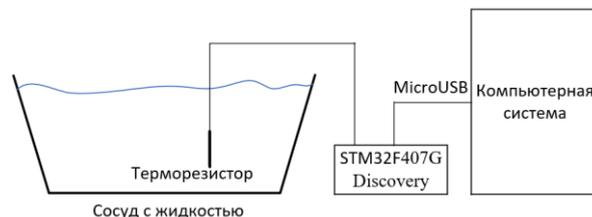


Рисунок 3 – Схема эксперимента

Поскольку в данном эксперименте интерес представляет величина погрешности непосредственно, то прецизионностью (общим смещением всех результатов измерений относительно истинного значения) можно пренебречь. Таким образом, для конвертирования значения АЦП в величину температуры использован вспомогательный аквариумный термометр с заводской калибровкой.

В ходе эксперимента терморезистор был погружён в жидкость. Произведено несколько серий из 10 измерений. Все измерения внутри каждой серии проводились автоматически с интервалом в 60 мс. Результаты эксперимента зафиксированы в компьютерной системе в значениях аналого-цифрового преобразователя и представлены на рисунке 4 и 5 для температур  $\approx 18\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\approx 49\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Вне зависимости от температуры жидкости, в которую помещён терморезистор, результаты измерений характеризуются достаточно серьёзной погрешностью. Амплитуда её распределения составляет достигает 39 единиц АЦП, или же 1.02

°С. Таким образом, данная погрешность связана с базовыми характеристиками датчика, поскольку влияние окружающей среды в ходе эксперимента минимизировано использованием большого количества теплоёмкого вещества, а разрядности АЦП достаточно для фиксации широкой амплитуды распределения результатов измерений.

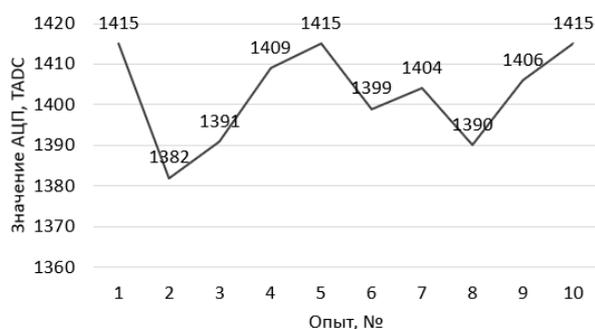


Рисунок 4 – Серия измерений при температуре  $\approx 18$  °С

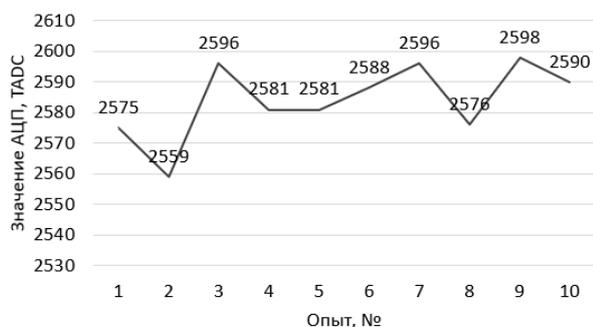


Рисунок 5 – Серия измерений при температуре  $\approx 49$  °С

Подобные неточности будут влиять на ход дальнейших вычислений, в особенности в тех случаях, когда результат с погрешностью выступает входным параметром при решении последующих задач (например, компенсации смещения нуля для микроэлектромеханических датчиков). Поэтому на следующем шаге целесообразно проанализировать уже существующие численные зависимости между датчиками различных видов.

### **Влияние точности сенсорной информации на точность вычислительной обработки информации**

Помимо упомянутых температурных зависимостей для датчиков характерны зависимости и других видов. Следовательно, как и в случае с терморезистором, эти погрешности возможно компенсировать посредством данных, получаемых другими сенсорами в режиме реального времени. Таким образом, для определения масштаба подобного взаимного влияния между датчиками разных видов необходимо составить список главных источников их погрешностей. Анализ в данном

направлении проведён с уже рассмотренных в статье [4] микроэлектромеханических датчиков.

Основными источниками погрешностей для акселерометров являются:

- температурные;
- магнитные;
- вибрационные;
- частотные.

Хотя микроэлектромеханический гироскоп имеет похожую на микроэлектромеханический акселерометр структуру, его внутреннее устройство представляет собой более сложный механизм. Из этого можно сделать вывод, что его характеристики подвержены аналогичным факторам, как и в случае с акселерометром. Так, компенсация дрейфа нуля гироскопа до сих пор является актуальной проблемой [12].

На формирование погрешностей магнитометров оказывают влияние следующие факторы [13]:

- магнитное наклонение (связанное с магнитным полем Земли);
- магнитные поля вокруг сенсора;
- наличие неподалёку ферромагнитных материалов.

Погрешности магнитометра также поддаются корректировке. Например, посредством добавления/вычитания магнитного склонения представляется возможным компенсировать влияние магнитного наклонения. Так, в своей статье [14] авторы предлагают установку микроэлектромеханических акселерометров совместно с магнитометром. Это даст возможность алгоритмической коррекции инструментальных погрешностей магнитометров и превращает совокупность датчиков в интеллектуальную сенсорную систему.

Проследить конкретные численные значения можно на примере интеллектуальных датчиков давления. Они также имеют достаточно высокую зависимость от температуры, и для компенсации погрешностей также ставят соответствующие датчики. Это даёт возможность использовать математические методы, что позволяет повысить точность устройства.

Так, в статье [15] авторами исследованы источники дополнительной погрешности для интеллектуальных датчиков давления. Они имеют следующие причины появления:

- температурный диапазон;
- электромагнитные помехи;
- вибрация;
- долговременная стабильность.

Для датчика Honeywell ST 3000 серии 100 обнаружено, что влияние температуры на нуль и шкалу на каждые 28° С составляет  $\pm 0,4625\%$  от шкалы. Это также подтверждается официальной документацией производителя по устройству [16].

Для датчиков «Метран-100» производителем указана формула (1), для каждых 10 °С:

$$\Delta t = \pm \left( 0,05 + 0,04 \frac{P_{max}}{P_B} \right), \quad (1)$$

где  $P_{вх}$  – максимальный верхний предел измерений, а  $P_B$  – верхний предел измерений модели, выбранный из ряда верхних значений пределов измерений.

Подытоживая вышесказанное, можно сделать вывод, что точность измерения вспомогательных сенсоров может иметь существенное влияние на точность измерения основных датчиков. При этом, как видно из примера с датчиком давления, сама величина погрешности может также иметь важное значение, поскольку является показателем такой важной характеристики, как долговременная стабильность. Благодаря сохранению такой информации можно вести статистический учёт и своевременно определить необходимость технического обслуживания датчика, либо же полной его замены.

Таким образом, существует необходимость в повышенной точности измерений физических величин при сохранении информации об исходной погрешности путём модификации алгоритмов измерения физических величин и способов хранения информации.

### **Модификация алгоритма измерения физических величин**

Блок-схема предлагаемого алгоритма представлена на рисунке 6. После модификации в алгоритме можно выделить 3 процедуры:

- нахождение среднего арифметического из значений, полученных в результате серии измерений;
- формирование и нормализация интервала из максимального и минимального значения в серии;
- постбинарное кодирование интервала.

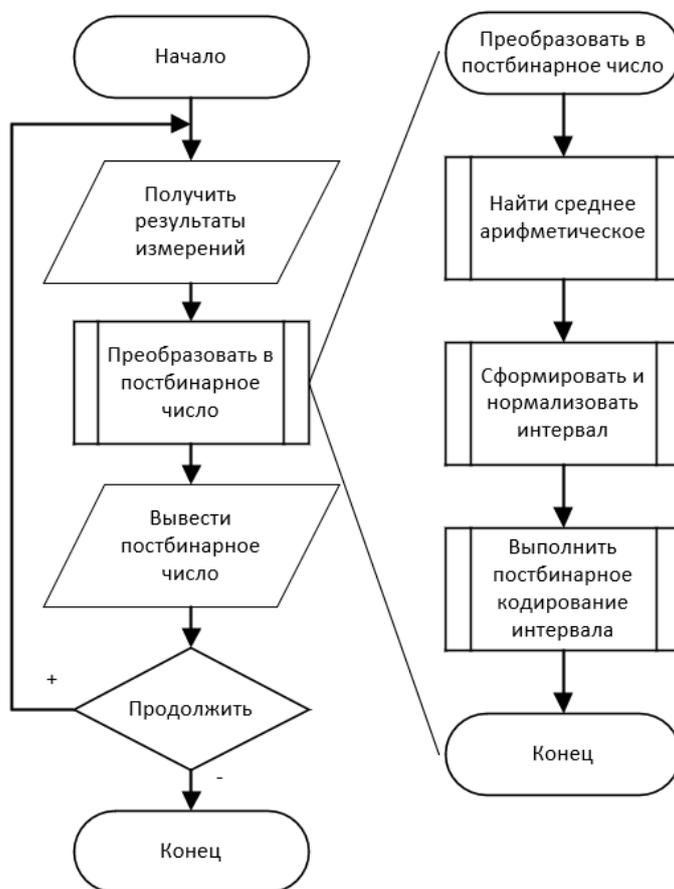


Рисунок 6 – Блок-схема модифицированного алгоритма измерения физических величин для сенсорной системы

На первом этапе будет получен более точный результат измерений. Так как распределение результатов подчиняется закону распределения, близкого к нормальному, то среднее арифметическое расположено близко к математическому ожиданию.

Второй этап позволяет рационализировать способ хранения информации. Благодаря этому

параллельно с улучшением точности результатов измерений датчиков внутри сенсорной системы появляется возможность эффективно хранить информацию об исходной погрешности.

Третий этап путём постбинарного кодирования интервала повысит эффективность представления информации, что даст возможность в полной мере пользоваться доказанными

преимуществами постбинарного компьютеринга [17-18]. В рамках первого этапа целесообразно определить необходимое количество повторных измерений, производимых сенсорной системой за небольшой промежуток времени. Следовательно, нужно найти количество измерений  $n$ , необходимых для попадания в доверительный интервал с вероятностью  $\beta$  (формула 2):

$$n \geq \left(k_{\beta} \frac{\sigma_x}{\varepsilon}\right)^2, \quad (2)$$

где  $k_{\beta}$  – значение функции Лапласа;  $\sigma_x$  – среднеквадратическое отклонение (постоянная величина для одного и того же датчика);  $\varepsilon$  – точность.

Рассмотрены следующие варианты:

– точность равна среднеквадратическому отклонению ( $\varepsilon = \sigma_x$ ). Тогда  $\sigma_x/\varepsilon = 1$ . Следовательно,  $n \geq k_{\beta}^2$ .

– точность равна половине среднеквадратического отклонения  $\varepsilon = \sigma_x/2$  (в два раза более узкий интервал). Тогда  $\sigma_x/\varepsilon = 2$ . Следовательно,  $n \geq 4k_{\beta}^2$ .

Значения количества измерений  $n$  просчитаны для вероятностей попадания в доверительный интервал со значением в 95%, 99% и 99,993%. Результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения количества измерений физической величины

$\sigma_x/\varepsilon$	$\beta$	95%	99%	99,993%
1		4	7	<u>16</u>
2		<u>16</u>	27	64

Для сенсорной системы выбрана величина в 16 измерений за небольшой интервал времени, поскольку в данном случае результат будет расположен:

- с вероятностью 99.993% в доверительном интервале  $[-\sigma_x; +\sigma_x]$ ;
- с вероятностью 95% в доверительном интервале  $[-0.5\sigma_x; +0.5\sigma_x]$ .

Для реализации второго шага составлена процедура нормализации интервала. Допустим, за временной интервал  $T$  будет получено множество значений, как указано в формуле 3:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{15}, x_{16}\}. \quad (3)$$

Тогда границы интервала представлены минимальным и максимальным значением из серии измерений (формула 4):

$$x \in [x_{\min}, x_{\max}]. \quad (4)$$

Наиболее точное значение, как было описано ранее, является значением среднего арифметического элементов из серии измерений  $\bar{x}$ .

Таким образом, точное значение вместе с погрешностью представляют три величины:

- среднее арифметическое  $\bar{x}$ ;
- левая граница интервала  $x_{\min}$ ;
- правая граница интервала  $x_{\max}$ .

С целью рационализации способа хранения информации необходимо произвести нормализацию интервала. В таком случае среднее арифметическое результатов измерений  $\bar{x}$  должно совпадать с центром интервала  $x_c$ . Подготовленный к нормализации интервал изображён на рисунке 7 а нормализованный – на рисунке 8.

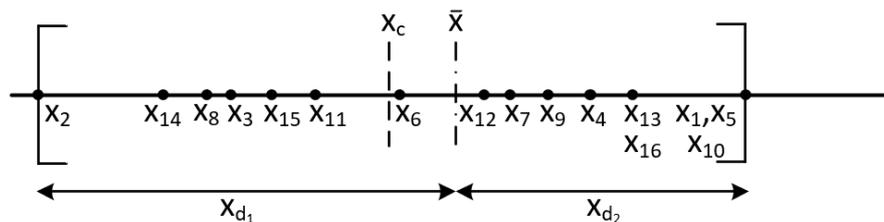


Рисунок 7 – Подготовленный к нормализации интервал

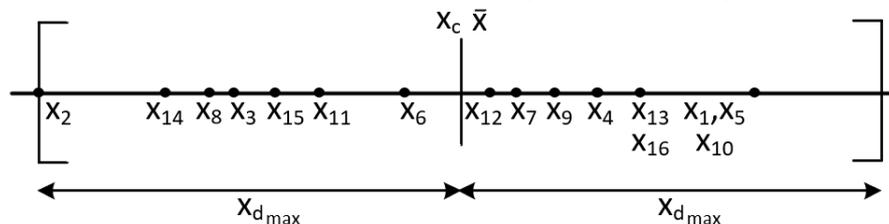


Рисунок 8 – Нормализованный интервал

Данная процедура выполняется в три шага:

– вычисление расстояний до границ интервала (формулы 5, 6):

$$x_{d1} = |\bar{x} - x_{\min}| \quad (5)$$

$$x_{d2} = |\bar{x} - x_{\max}| \quad (6)$$

– поиск максимального расстояния из предыдущего шага (формула 7):

$$x_{d_{max}} = \max\{x_{d_1}, x_{d_2}\}, \quad (7)$$

– расширение границ интервала (формула 8):

$$x \in [\bar{x} - x_{d_{max}}, \bar{x} + x_{d_{max}}] \quad (8)$$

Из рисунков видно, что среднее арифметическое значений вычислений совпадает с центром интервала, и вычисляется как полусумма границ. Таким образом, необходимую информацию предоставляют всего два значения:

- левая граница интервала  $x_{\min}$ ;
- правая граница интервала  $x_{\max}$ .

Третий этап модифицированного алгоритма представляет собой кодирование нормализованного интервала с использованием алгоритмов постбинарного компьютеринга. В этой логике 4 состояний, кроме состояния истины (1) и лжи (0) присутствуют ещё 2:

– А – ни истина, ни ложь (неопределённость);

17.0134	0	1 0 0 0 0 0 1	1	0 0 0 1 0 0 0	0 0 0 1	1 0 1 1	0 1 1 1	1 0 0 1
17.8780	0	1 0 0 0 0 0 1	1	0 0 0 1 1 1 1	0 0 0 0	0 1 1 0	0 0 1 0	0 1 0 1
Rb64/32p	0	1 0 0 0 0 0 1	1	0 0 0 1	M M M	M M M M	A A A A	A A A A A A M 0
17.0078	0	1 0 0 0 0 0 1	1	0 0 0 1	0 0 0 0	0 0 0 0	1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 0 0
17.9922	0	1 0 0 0 0 0 1	1	0 0 0 1	1 1 1 1	1 1 1 1	0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 1 0
	Знак	Порядок			Мантисса			

Рисунок 9 – Пример кодирования и декодирования интервала

## Выводы

Таким образом, обоснована целесообразность использования модифицированного алгоритма измерения физических величин в сенсорных системах. Приведение интервала к необходимому формату даст возможность эффективно хранить точное значение наряду с информацией о погрешности, а переход к постбинарному кодированию позволит использовать все преимущества, связанные с таким форматом хранения данных.

## Литература

1. Койбаш А. А. Пути повышения эффективности устройств сенсорной составляющей информационно-компьютерной инфраструктуры / А. А. Койбаш // Информатика и кибернетика. – Д.: ДонНТУ, – 2019. – № 2(16). – С. 51-57.
2. Velasquez, J. A Talk With Janusz Bryzek: The Father of Sensors / J. Velasquez // Available at: <https://www.alleywatch.com/2013/12/a-talk-with-janusz-bryzek-the-father-of-sensors/> (accessed 25 August 2021)
3. Аноприенко, А. Я. Анализ эффективности устройств сенсорной составляющей

– М – и истина, и ложь (множественность).

Структурную единицу представления информации, аналогично биту для двоичной логики, в постбинарной логике представляет тетрит.

Таким образом, интервал из двух чисел кодируется в одно постбинарное число. Для этого используется следующий алгоритм:

- первое несовпадение в битах чисел интервала даёт начало серии множественности (М);
- последний элемент серии множественности (М) даёт старт серии неопределённости (А), которая распространяется до конца числа.

Впоследствии данное постбинарное число понадобится декодировать для различных нужд. По законам постбинарного компьютеринга результатом будет пара чисел, представляющих интервал. Состояния конвертируются по следующим правилам:

- для нижней границы: М => 0; А => 1;
- для верхней границы: М => 1; А => 0.

Пример кодирования и декодирования интервала отображён на рисунке 9.

образовательной системы умного города / А. Я. Аноприенко, А. А. Койбаш, Е. И. Приходченко // Информатика и кибернетика. – Д.: ДонНТУ, – 2020. – № 1(19). – С. 5-11.

4. Аноприенко, А. Я. Закономерности развития инерциальных датчиков информационно-компьютерной инфраструктуры / А. Я. Аноприенко, А. А. Койбаш, Н. С. Максименко, К. А. Сидоров // Информатика и кибернетика. – Д.: ДонНТУ, – 2021. – № 1 - 2 (23 - 24). – С. 14-21.

5. Аноприенко, А. Я. Основные закономерности эволюции компьютерных систем и сетей / А. Я. Аноприенко // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Проблемы моделирования и автоматизации проектирования. – № 1-2. – С. 10-32.

6. Аноприенко, А. Я. Системный анализ закономерностей мирового развития компьютерных систем / А. Я. Аноприенко, К. А. Сидоров, Н. С. Максименко, А. А. Койбаш // Информатика и кибернетика. – Д.: ДонНТУ, – 2019. – № 4(18). – С. 41-48.

7. ADXL354/ADXL355: Low Noise, Low Drift, Low Power, 3-Axis MEMS Accelerometers Data Sheet (Rev. B). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical->

documentation/data-sheets/adx1354\_355.pdf (accessed 24 August 2020).

8. ADXRS290: Ultralow Noise, Dual-Axis Gyroscope Data Sheet (Rev. A). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS290.pdf> (accessed 11 October 2020).

9. ADXRS645: High Temperature, Vibration Rejecting  $\pm 2000^\circ/\text{sec}$  Gyroscope Data Sheet (Rev. B). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS645.pdf> (accessed 11 October 2020).

10. Шабалдин, Е. Д. Метрология и электрические измерения: Учеб. пособие / Е. Д. Шабалдин, Г. К. Смолин, В. И. Уткин, А. П. Зарубин // Под ред. Е. Д. Шабалдина. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т». – 2006. – 282 с.

11. Максюзин, Г. В. Учет погрешностей МЭМС-акселерометра при его моделировании / Г. В. Максюзин, Н. С. Соболева // Политехнический молодежный журнал. – 2019. – С. 1-7.

12. Крылов, А. А. Технологические подходы к устранению смещения нуля МЭМС гироскопов в составе гироинерциального блока / А. А. Крылов, Д. В. Корнюк // Труды МАИ. Выпуск № 103. – С. 1-18.

13. Горянина, К. И. Стохастический подход к уменьшению ошибок калибровки MEMS датчиков

ориентации / К. И. Горянина. – С. 16-24.

14. Астраханцев, Ю. Г. Алгоритмическая коррекция инструментальных погрешностей магнитометра / Ю. Г. Астраханцев, Н. А. Белоглазова // Измерительная техника № 5, 2020. – С. 50-57.

15. Пьявченко, О. Н. Погрешности интеллектуальных датчиков давления / О. Н. Пьявченко, Е. В. Удод // Известия ТРТУ. Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении. – С. 126-132.

16. Интеллектуальные датчики давления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/tech-specs/34-ST-03-60-RU.pdf> (дата обращения: 17.07.2021)

17. Аноприенко, А. Я. Введение в постбинарный компьютеринг. Арифметикологические основы и программно-аппаратная реализация / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница – Донецк: ДонНТУ. – УНИТЕХ, 2017. — 308 с.

18. Аноприенко, А. Я. Пример Румпа в контексте традиционных, интервальных и постбинарных вычислений / А. Я. Аноприенко, В. А. Гранковский, С. В. Иваница // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования» (МАП-2011). Выпуск: 9 (179). – Донецк: ДонНТУ. – 2011. – 356 с.

***Койбаш А. А. Разработка модифицированного алгоритма измерения физических величин для сенсорных систем.*** С целью улучшения характеристик сенсорных систем выполнен анализ основных источников погрешностей микроэлектромеханических датчиков. Определено взаимное влияние датчиков внутри интеллектуальной сенсорной системы, а также выявлена важность сохранения информации о точности самих сенсоров. Для определения погрешности, связанной с непосредственными характеристиками устройства, проведён эксперимент с использованием датчика температуры и микроконтроллера на плате STM32F407G Discovery. На основании результатов эксперимента предложен модифицированный алгоритм измерения физических величин в сенсорных системах.

***Ключевые слова:*** сенсоры, сенсорные системы, МЭМС, алгоритм измерения физических величин, микроконтроллер, постбинарный компьютеринг.

***Koibash A. Development of modified algorithm for measuring physical quantities for sensor systems.*** In order to improve the characteristics of sensor systems analysis of the main sources of errors was made in microelectromechanical sensors. The mutual influence of sensors within an intelligent sensor system is determined, and the importance of maintaining information about the accuracy of the sensors themselves is revealed. To determine the error associated with the direct characteristics of the device, an experiment was conducted using a temperature sensor and a microcontroller on the STM32F407G Discovery board. The modified algorithm is proposed for measuring physical quantities in sensor systems based on the results of the experiment.

***Keywords:*** sensors, sensor systems, MEMS, algorithm for measuring physical quantities, microcontroller, post-binary computing.

Статья поступила в редакцию 18.11.2021  
Рекомендована к публикации профессором Аноприенко А. Я.

### Об авторах

**Аноприенко Александр Яковлевич** (1957 г.р.) – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры и заведующий кафедрой компьютерной инженерии факультета интеллектуальных систем и программирования, директор института компьютерных наук и технологий, ректор Донецкого национального технического университета.

**Вустяк Николай Филиппович** – аспирант кафедры автоматизированных систем управления факультета информационных систем и технологий Донецкого национального технического университета.

**Дмитрюк Татьяна Григорьевна** – аспирант кафедры программной инженерии факультета интеллектуальных систем и программирования Донецкого национального технического университета.

**Дяченко Олег Николаевич** (1964 г. р.) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерной инженерии факультета интеллектуальных систем и программирования Донецкого национального технического университета

**Ефименко Константин Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики факультета интеллектуальных систем и программирования Донецкого национального технического университета

**Зинченко Юрий Евгеньевич** (1959 г. р.) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерной инженерии факультета интеллектуальных систем и программирования Донецкого национального технического университета

**Зинченко Татьяна Анатольевна** (1965 г. р.) – старший преподаватель кафедры прикладной математики факультета интеллектуальных систем и программирования Донецкого национального технического университета

**Зори Сергей Анатольевич** (1968 г.р.) - доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой программной инженерии факультета интеллектуальных систем и программирования Донецкого национального технического университета

**Койбаш Александр Андреевич** (1995 г. р.) – ассистент кафедры компьютерной инженерии факультета интеллектуальных систем и программирования Донецкого национального технического университета.

**Крахмаль Мария Вячеславовна** (1996 г. р.) – аспирант кафедры компьютерной инженерии факультета интеллектуальных систем и программирования Донецкого национального технического университета.

**Павлыш Владимир Николаевич** (1948 г. р.) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры и заведующий кафедрой прикладной математики факультета интеллектуальных систем и программирования Донецкого национального технического университета, председатель Совета Д 01.024.04 по защите докторских и кандидатских диссертаций, член Совета Д 01.008.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций.

**Секирин Александр Иванович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления факультета информационных систем и технологий Донецкого национального технического университета.

**Черников Вадим Геннадиевич** (1966 г. р.) – старший преподаватель кафедры «Системы программного управления и мехатроника» электротехнического факультета Донецкого национального технического университета.

**Требования к статьям,  
направляемым в редакцию научного журнала  
«Информатика и кибернетика»**

Редколлегией принимаются к рассмотрению статьи, в которых рассматриваются важные вопросы в области информатики и кибернетики. Научный журнал издаётся с 2015 года, периодичность издания – 4 раза в год.

В журнале предусмотрены следующие рубрики:

- информатика и вычислительная техника;
- компьютерные и информационные науки;
- инженерное образование.

В соответствии с номенклатурой специальностей научных работников МОН ДНР первые две рубрики соответствуют следующим укрупненным группам специальностей научных работников:

05.01 – «Инженерная геометрия и компьютерная графика»,

05.13 – «Информатика, вычислительная техника и управление».

С 01.02.2019 Научный журнал включён в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (приказ МОН ДНР № 135) по группам специальностей 05.01.00 и 05.13.00.

Рубрика «Инженерное образование» предназначена опубликования сотрудниками научно-методических статей.

Журнал также включён в базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) (лицензионный договор № 425-07/2016 от 14.07.2016).

Статьи, представляемые в данный сборник, должны отвечать следующим требованиям. **Содержание статьи** должно быть посвящено актуальным научным проблемам и включать следующие необходимые элементы:

- постановку проблемы в общем виде, её связь с важными научными и практическими задачами;
- анализ последних исследований и публикаций, в которых решается данная задача и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается статья;
- формулировка цели статьи и постановка задач, решаемых в ней;
- изложение основного материала с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы и перспективы последующих исследований в данном направлении.

Каждый элемент должен быть выделен соответствующим названием раздела, например, «введение», «постановка задачи», «цель и задачи работы», «цель статьи», «цель исследования», «цель разработки», «анализ ... », «сравнительная оценка ... », «разработка ... », «проектирование ... », «программная реализация», «тестирование ... », «полученные результаты», «выводы», «литература». Разделы «введение», «выводы», «литература» являются **обязательными**. Включать в названия разделов нумерацию не разрешается.

В основном тексте статьи формулируются и обосновываются полученные авторами утверждения и результаты. Выводы должны полностью соответствовать содержанию основного текста. Языки публикаций: русский, английский.

**Объём статьи, формат страницы**

Для оформления статьи следует использовать листы формата А4 (210x297 мм) с полями по 2,5 см со всех сторон. Нумерацию страниц выполнять не нужно.

Рекомендуемый объём статьи – 6-12 страниц. Рукописи меньшего объёма могут быть рекомендованы к публикации в качестве коротких сообщений.

Последняя страница текста статьи должна быть заполнена не менее чем на две трети, но содержать не менее трёх пустых строк в конце.

### ***Форматирование текста***

Подготовка статьи осуществляется в текстовом редакторе Microsoft Office Word.

Весь текст статьи оформляется шрифтом Times New Roman 10 пт с одинарным междустрочным интервалом, если ниже в требованиях не сказано иного. Абзацный интервал «перед» – 0 пт, «после» – 0 пт.

На первой строке с выравниванием по левому краю располагается УДК.

Заголовок (название) статьи оформляется шрифтом Times New Roman 14 пт, полужирное начертание, с выравниванием по центру (без абзацных отступов). Заголовок статьи следует печатать с прописной буквы без точки в конце, переносы слов не допускаются. Абзацный интервал «перед» – 12 пт, «после» – 12 пт.

После названия статьи следует информация об авторах, которая выравнивается по центру (без абзацных отступов). На одной строке указываются инициалы и фамилии всех авторов через запятую. Между двумя инициалами ставится пробел. С новой строки указывается название вуза (организации) и город (для каждого автора, если не совпадают). На следующей строке указываются адреса электронной почты (один адрес либо каждого автора – по желанию). Адрес электронной почты оформляется в виде гиперссылки.

К тексту аннотации применяется курсивное начертание, с выравниванием по ширине, отступы слева и справа по 1 см. Заголовок «Аннотация» выделяется полужирным начертанием. Объём аннотации – 450-550 символов (без пробелов). Абзацный интервал «перед» – 12 пт, «после» – 12 пт.

Основной текст статьи разбивается на две колонки шириной по 7,5 см (промежуток между столбцами – 0,99 см), выравнивается по ширине. Абзацный отступ первой строки – 1 см. Автоматический перенос слов не применяется.

Заголовки разделов выполняются шрифтом Arial 10 пт, полужирное курсивное начертание. Абзацный отступ отсутствует, интервал перед абзацем – 12 пт, после абзаца – 6 пт. Для заголовка «Введение» установить интервал «перед» – 0 пт, «после» – 6 пт.

### ***Таблицы в тексте статьи***

Название следует помещать над таблицей с абзацного отступа (1 см) в формате: слово «Таблица», пробел, номер таблицы, пробел, тире, пробел, название таблицы. Название таблицы записывают с прописной буквы без точки в конце строки и выравнивают по ширине. В ячейках таблицы устанавливается выравнивание текста по центру по вертикали. По горизонтали текст выравнивается по центру либо по левому краю. Границы ячеек таблицы должны быть только чёрного цвета, толщина линии – 1 пт. На все таблицы должны быть приведены ссылки в тексте статьи, при ссылке следует писать слово «табл.» с указанием её номера, например, «... данные приведены в табл. 5». Таблицы нумеруются в пределах статьи. Таблица располагается сразу после ссылки на неё, если это возможно (например, после окончания абзаца). Если же таблица не помещается на текущей странице, то она должна быть расположена в начале следующей страницы (или колонки). При необходимости допускается включение в статью таблицы, ширина которой превышает ширину колонки. В этом случае таблица и её название размещаются по центру страницы. Таблица не должна выступать за границы полей страницы. Таблица и её название отделяются от основного текста статьи одной пустой строкой до и после.

### ***Рисунки в статье***

Ссылки на иллюстрации по тексту статьи обязательны и оформляются в виде «... на рис. 2» и т. п. Рисунок и его подпись выравниваются по центру колонки (без абзацных отступов), положение рисунка – «в тексте». Размещается рисунок после его первого упоминания в тексте, если это возможно (например, после окончания абзаца). Если же иллюстрация не помещается на текущей странице, то она должна быть расположена в начале следующей страницы (или колонки). При необходимости допускается включение в статью рисунка, ширина которого превышает ширину колонки. В этом случае рисунок и его подпись выравниваются по центру страницы. Иллюстрация не должна выступать за границы полей страницы. Подпись рисунка оформляется в формате: слово «Рисунок», пробел, номер иллюстрации, пробел, тире, пробел, название рисунка. Название рисунка записывают с прописной буквы без точки в конце строки. Для подписи иллюстрации применяют курсивное

начертание. Иллюстрация и её подпись отделяются от основного текста статьи одной пустой строкой до и после. Не допускается выполнять рисунки с помощью встроенного графического редактора Microsoft Office Word. Если на иллюстрации имеется текст, размер шрифта должен быть не менее чем аналогичный текст, набранный шрифтом Times New Roman 10-го размера. Иллюстрация не должна содержать много незаполненного пространства.

### **Формулы**

Формулы и уравнения рекомендуется набирать с использованием MathType (предпочтительно) или MS Equation. Формулы и математические символы не должны существенно отличаться по размеру от основного текста. Обязательной является нумерация формул, на которые имеется ссылка в тексте статьи. Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в скобках, например, «... согласно формуле (2)». Формулы размещаются по центру колонки, а их номера – по правому краю. Как для строки с формулой, так и для первой строки пояснений (при наличии), абзацный отступ убирается. Первая строка пояснения начинается со слова «где», после которого следует поставить табуляцию на 1 см, затем само пояснение в формате: символ, подлежащий объяснению, пробел, тире, пробел, поясняющий текст, запятая, обозначение единицы измерения физической величины. Пояснения перечисляются через точку с запятой, выравниваются по ширине. Вторая и последующие строки пояснений начинаются с абзацного отступа (1 см). Весь блок текста, связанный с формулой (только формула, несколько формул подряд или формула с пояснениями), отделяется от основного текста одной пустой строкой до и после. Переносить формулы на следующую строку допускается только на знаках выполняемых операций, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке умножения применяют знак «×». Формулы и математические уравнений могут быть записаны в тексте документа, если их высота не превышает высоту строки. При этом следует учитывать, что знаки математических операций отделяются от чисел или символов пробелами с обеих сторон. Например, «Если учесть, что  $y < 0$  и  $2x + y = 1$ , то из формулы (3) можно выразить  $x...$ ». К символам, которые приведены в формуле, при дальнейшем их употреблении (в том числе в пояснениях к формуле) должно применяться курсивное начертание. При этом к любым числам (верхние и нижние индексы, содержащие цифры и т. п.), а также к математическим знакам курсивное начертание не применяется. Не допускается вставлять формулы, выполненные в виде рисунков.

### **Перечисления: оформление списков**

Основной текст статьи может содержать перечисления, оформленные в виде маркированного списка. В качестве маркера элемента списка разрешается использовать только короткое тире «–». Каждый элемент перечисления записывается с новой строки с абзацного отступа, равного 1 см. После символа короткого тире текст располагается с отступом в 1,5 см от левой границы строки, выравнивается по ширине, при переносе на новые строки располагается без отступов. Нумерованные и многоуровневые списки включать в статью не разрешается.

### **Литература**

В тексте статьи обязательны ссылки на все литературные источники, номер источника указывается в квадратных скобках. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Рекомендуемое количество источников, на которые ссылается автор, не менее 10. Перечень источников приводится в порядке их упоминания в статье. Библиографическое описание каждого литературного источника оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018. Перечень литературных источников оформляется в виде нумерованного списка. В качестве маркеров элементов списка используют порядковые арабские цифры с точкой. Каждый источник представляет собой отдельный элемент перечисления, записывается с новой строки с абзацного отступа, равного 1 см. После порядкового номера с точкой текст располагается с отступом в 1,5 см от левой границы строки, выравнивается по ширине, при переносе на новые строки располагается без отступов.

В конце статьи обязательно приводятся аннотации на русском и английском языках, каждая заканчивается перечнем 5-6 ключевых слов.

К тексту аннотации применяется курсивное начертание, с выравниванием по ширине, отступы слева и справа по 1 см. Слово «Аннотация» опускается. Текст аннотации начинается с ФИО авторов и названия статьи, выделяемых полужирным начертанием. Аннотация на русском языке совпадает с аннотацией, приведенной в начале статьи. В тексте аннотации на английском языке после фамилии автора указывается только первая буква имени с точкой. Абзацный интервал «перед» – 12 пт, «после» – 12 пт. Ключевые слова оформляются с новой строки аналогично тексту аннотации. Заголовок «Ключевые слова:» (англ. «Keywords:») выделяется полужирным начертанием. Ключевые слова перечисляются через запятую.

***Порядок представления статьи и сопроводительные документы***

В редакцию необходимо представить:

- файл с текстом статьи;
- файл, содержащий фамилию, имя и отчество авторов полностью; ученую степень, ученое звание; место работы с полным указанием должности, подразделения и наименования организации, города (страны); номера телефонов и e-mail для связи;
- экспертное заключение о возможности публикации статьи, подписанное руководителем и заверенное печатью организации, в которой работает автор статьи;
- выписка из заседания кафедры или письмо организации с просьбой об опубликовании и указанием, что изложенные в статье результаты ранее не публиковались.

Статьи и сопроводительные документы следует высылать на электронный адрес [infcyb.donntu@yandex.ru](mailto:infcyb.donntu@yandex.ru).

***К сведению авторов***

Если статья оформлена с нарушением указанных выше требований и правил, редакция после предварительного рассмотрения может отклонить статью.

На рецензирование статьи направляются членам редакционной коллегии журнала. Все статьи публикуются при наличии положительной рецензии.

В статью могут быть внесены изменения редакционного характера без согласования с автором. Ответственность за содержание статьи и качество перевода аннотаций несут авторы.

Публикация статей в научном журнале «Информатика и кибернетика» осуществляется на некоммерческой основе.

Все номера Научного журнала размещаются на сайте <http://infcyb.donntu.org/>.

CONTENT

Informatics and computer engineering

<b>Modeling and visualization of a three-dimensional model using augmented reality technology</b> <i>Anoprienko A., Krakhmal M.</i> .....	5
<b>Development of a method for optimal control of the orientation system of a photovoltaic module</b> <i>Chernikov V., Pavlish V.</i> .....	14
<b>Implementation of machine learning in the intellectual system of the barotherapy process</b> <i>Kravchenko N. M., Bondarchuk V. V., Klyushanova T. D.</i> .....	22
<b>Development of the architecture of an integrated system for generating pseudo-random tests of digital devices</b> <i>Zinchenko T. A., Zinchenko Yu. E., Dyachenko O. N.</i> .....	27
<b>Dmitriuk T., Zori S. Tasks of planning production and logistics activities of the enterprise</b> <i>Dmitriuk T., Zori S.</i> .....	33
<b>Analysis of cryptographic protocols for remote PC access</b> <i>Efimenko K. N., Paukov D. V.</i> .....	45
<b>On modeling the diffusion of nonequilibrium minority charge carriers generated by an electron beam in a multilayer semiconductor target</b> <i>Stepovich M. A., Turtin D. V., Kalmanovich V. V.</i> .....	51
<b>Analysis of hardware platforms for image processing</b> <i>Sekirin A. I., Vustyak N. F.</i> .....	56
<b>Development of modified algorithm for measuring physical quantities for sensor systems</b> <i>Koibash A.</i> .....	56
<u>About Authors</u> .....	70
<u>Requirements to articles which are sent to the editors office of the scientific journal “Informatics and Cybernetics”</u> .....	72

Электронное периодическое издание

Научный журнал

ИНФОРМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА

(на русском, английском языках)

№ 4 (26) - 2021

Ответственный за выпуск Р. В. Мальчева

Технический редактор Р. В. Мальчева

Компьютерная верстка Р. В. Мальчева

Подписано к выпуску 05.11.2021. Усл. печ. лист. 8,9. Уч.-изд. лист.5,65.  
Адрес редакции: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУ ВПО «ДонНТУ»,  
4-й учебный корпус, к. 36., ул. Кобозева, 17.  
Тел.: +38 (062) 301-07-35, +38 (071) 334-89-11  
E-mail: infcyb.donntu@yandex.ru, URL: <http://infcyb.donntu.ru>