



eISSN 2311-2468
Том 11, № 15. 2023
Vol. 11, no. 15. 2023

электронное периодическое издание
для студентов и аспирантов

Огарёв-онлайн Ogarev-online

<https://journal.mrsu.ru>



ТЕТЮШКИН В. С., МАТВЕЕВ Д. А., ДМИТРИЕВ С. Б.
РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДРАЙВЕРОВ
СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КЛЮЧЕЙ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Аннотация. Рассматриваются вопросы проектирования устройств управления силовыми высоковольтными полупроводниковыми ключами. Выполнен обзор современных способов гальванической изоляции системы управления и формирователя импульсов управления (драйвера) силового полупроводникового ключа. Сделан вывод о целесообразности использования трансформатора тока для гальванической изоляции источника питания от драйвера. Предложена структурная схема источника питания драйверов.

Ключевые слова: силовой полупроводниковый ключ, высоковольтный преобразователь, драйвер.

TETYUSHKIN V. S., MATVEEV D. A., DMITRIEV S. B.
DESIGNING DRIVER POWER SUPPLY
FOR HIGH VOLTAGE SEMICONDUCTOR SWITCHES

Abstract. The issues of designing control devices for power high-voltage semiconductor switches are considered. An overview of modern methods of galvanic isolation of the control system and the control pulse generator (driver) of a power semiconductor switch is presented. The conclusion is made about the expediency of using a current transformer for galvanic isolation of the power source from the driver. A block diagram of the driver power supply is proposed.

Keywords: power semiconductor switch, high voltage converter, driver.

В последние десятилетия благодаря стремительному развитию силовых полупроводниковых ключей (СПК) существенно расширилась область их применения, как по мощности, так и по частоте. Во всем мире силовая полупроводниковая техника широко применяется в электроэнергетике, электротехнологиях, электроприводе. Это электропередачи и вставки постоянного тока, статические компенсаторы реактивной мощности, гибкие интеллектуальные сети, регуляторы переменного напряжения, установки индукционной плавки, нагрева и закалки, преобразователи частоты. Техника высоких мощностей предполагает использование высоких напряжений, что в свою очередь предъявляет особые требования к силовым полупроводниковым ключам и сопутствующей элементной базе.

При проектировании высоковольтных полупроводниковых преобразователей, регуляторов напряжения и т.п. возникает проблема обеспечения гальванической (потенциальной) развязки между системой управления (СУ) и драйвером (Д) силового

полупроводникового ключа. При этом необходимо реализовать развязку по каналу передачи информации о форме управляющих импульсов и каналу передачи энергии, требуемой для питания драйвера, обеспечивающего коммутацию СПК. Обе эти задачи традиционно решаются с помощью трансформаторов, DC/DC преобразователей и оптронов. На рисунке 1 представлены варианты гальванической развязки СУ и драйвера ПК [1].

Достоинства трансформаторной развязки в совместной передаче энергии и формы управляющего импульса, сравнительно простом обеспечении требований к динамическим параметрам управляющих импульсов, высокой температурной стабильности. К недостаткам трансформаторной развязки можно отнести практическую невозможность ее реализации при напряжениях более 3 кВ из-за сложностей обеспечения межобмоточной изоляции и громоздкости конструкции импульсного трансформатора. Это относится и к варианту с раздельной передачей энергии и информационного сигнала (рисунок 1, (б)), где трансформатор используется в источнике питания драйвера.

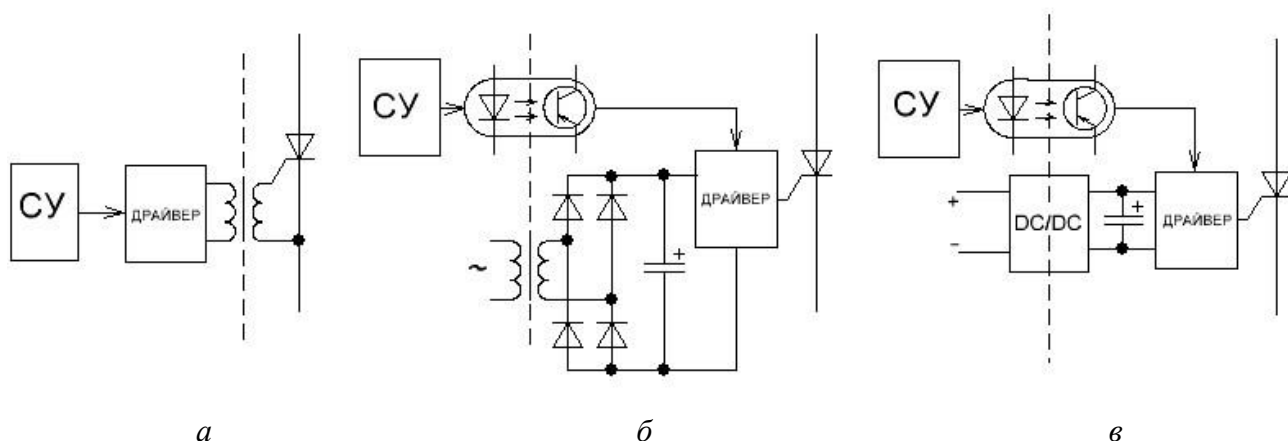


Рис. 1. Варианты гальванической развязки СУ и драйвера СПК:

совместная передача энергии и формы управляющего импульса (*а*)

и раздельная передача энергии и информационного сигнала с использованием оптрона

и понижающего трансформатора (*б*), оптрона и DC/DC преобразователя (*в*).

Недостатки оптронного способа развязки – раздельная передача энергии и информационного сигнала и сравнительно невысокое напряжение изоляции современных оптронов 2,5...7,5 кВ [2]. В настоящее время при больших напряжениях изоляцию при передаче информационного сигнала можно обеспечить с помощью оптооттрансммиттеров и оптоволоконных линий, однако проблема передачи энергии для питания драйвера при этом остается не решенной.

В данной статье описывается вариант решения проблемы, использующий для гальванической развязки при передаче энергии от источника питания к драйверу не трансформатор напряжения, а трансформатор тока (ТТ). Поскольку первичная обмотка ТТ имеет всего один виток, (фактически провод, проходящий через ось тороидального сердечника трансформатора) то обеспечить высокую прочность изоляции между первичной и вторичной обмотками конструктивно не составляет труда.

На рисунке 2 изображена структурная схема источника питания драйверов тиристорных ключей, разработанная для использования в высоковольтном регуляторе переменного напряжения (РПН) с вольтодобавочным трансформатором [3].

Схема источника состоит из источника питания токовой петли (ИПТП), собственно токовой петли (ТП), трансформаторов тока ТТ1, ТТ2...ТТN, где: N – количество тиристорных ключей, и преобразователей ток/напряжение (ПТН). Питание ИПТП осуществляется от вспомогательного источника переменного напряжения $U_{ВСП}$.

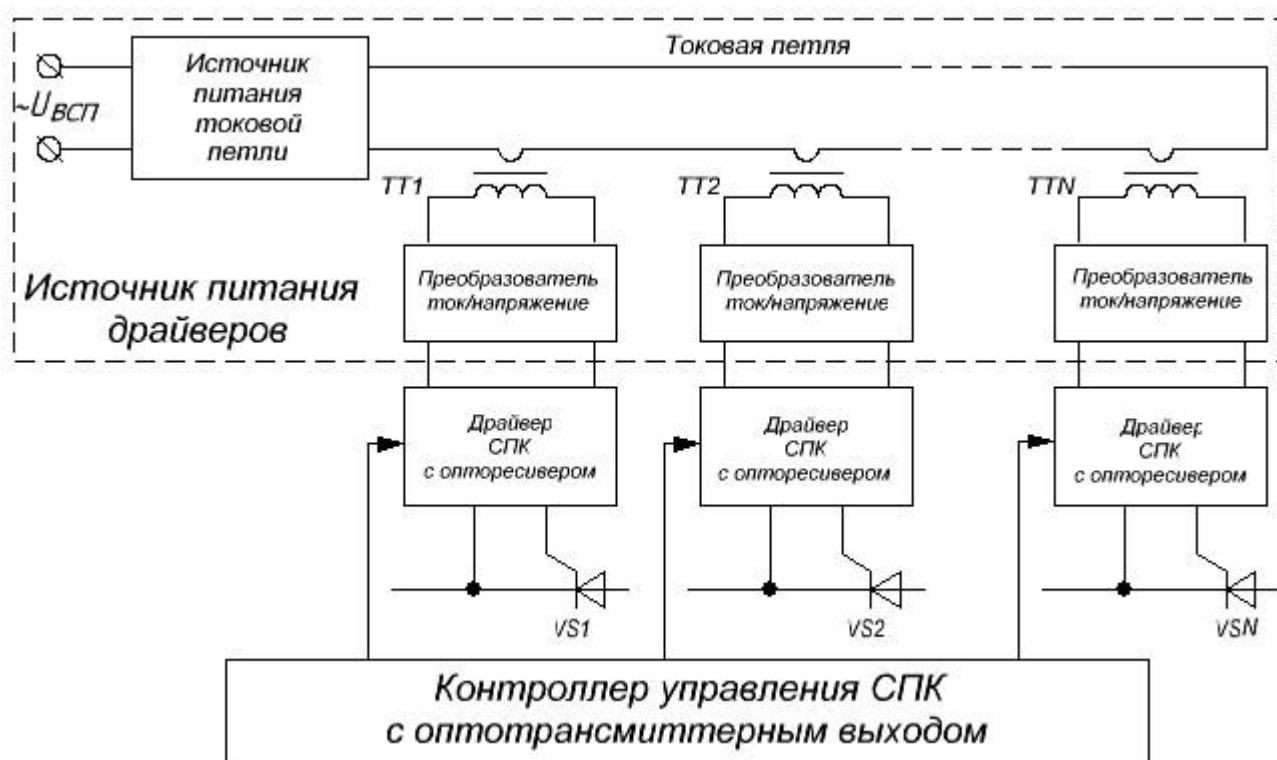


Рис. 2. Структурная схема источника питания драйверов.

Основным элементом схемы является ИПТП, нагрузкой которого служит ТП, представляющая собой провод, пронизывающий сердечники трансформаторов тока и являющийся частью последовательного LC – контура. ИПТП формирует в ТП переменный синусоидальный ток высокой частоты необходимой амплитуды. Для уменьшения габаритов

сердечников ТТ рабочая частота токовой петли выбрана в диапазоне 45-50 кГц, при этом ток должен иметь синусоидальную форму с целью уменьшения электромагнитных помех и улучшения электромагнитной совместимости.

Вторичные обмотки ТТ подключены ко входам ПТН. Ток вторичных обмоток ТТ пропорционален току петли. ПТН, являющийся, по своей сути, нагрузкой ТТ, обеспечивает преобразование тока вторичной обмотки ТТ в напряжение питания драйвера СПК.

Мощность, потребляемая драйвером, определяется состоянием СПК (включен/выключен). Поскольку в РПН в определенные моменты времени одновременно могут быть включено разное количество СПК, то общее потребление мощности драйверами тоже будет различным. Это приведет к колебаниям тока ТП и, как следствие, колебаниям напряжения на выходе ПТН. Таким образом, ИПТП должен обеспечивать стабилизацию тока ТП. Кроме того, в процессе эксплуатации РПН возможны температурные изменения параметров реактивных элементов ТП, что может привести к изменению его резонансной частоты и рассогласованию резонансного контура ТП, что приведет, в свою очередь, к изменению тока ТП и искажению его формы. Также изменение напряжения вспомогательного источника питания ИПТП не должно приводить к изменению тока петли.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

- питание ИПТП необходимо осуществлять от стабилизированного источника напряжения;
- ИПТП должен обеспечивать стабилизацию тока ТП;
- для обеспечения стабильности резонансной настройки резонансного контура ТП необходимо применение автоматической подстройки частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2010. – 384 с.
2. Колпаков А. И. Драйверы SEMIKRON для управления тиристорными модулями // Компоненты и технологии. – 2004. – № 3. – С. 54.
3. Нестеров С. А., Тетюшкин В. С., Матвеев Д. А. Статический регулятор напряжения для распределительных трансформаторов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. Материалы Международной научно-практической конференции / Редколлегия: П. В. Сенин [и др.], сост. С. Е. Федоров, отв. за выпуск В. Ф. Купряшкин. – Саранск, 2020. – С. 129–137.

ШИШОВ О. В., ШУМОВ Д. А., КРАСУЛИН И. М.
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧИ ВОДЫ НА ПРОИЗВОДСТВО
С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ

Аннотация. Рассматривается метод производства цемента, применяемый на предприятии «Магма». Представлена структурная схема проекта и разработка системы управления этой установки на базе программируемых логических контроллеров отечественного производителя.

Ключевые слова: система подачи воды, программируемые реле, человеко-машинный интерфейс.

SHISHOV O. V., SHUMOV D. A., KRASULIN I. M.
WATER SUPPLY CONTROL SYSTEM FOR PRODUCTION
WITH UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY
OF AUTOMATION ELEMENTS

Abstract. The method of cement production used at Magma Ltd. is considered. A block diagram of the project and the development of a control system for this installation based on programmable logic controllers from a domestic manufacturer are presented.

Keywords: water supply system, programmable relays, human-machine interface.

Группа компаний МАГМА – одно из крупнейших в России объединений предприятий, специализирующихся на добыче полезных ископаемых, производстве и дистрибуции строительных и отделочных материалов. В состав группы входит и завод по производству сухих строительных смесей, размещенный на территории Республики Мордовия.

В настоящий момент существует три метода изготовления цемента – сухой, мокрый и комбинированный. Мокрый метод позволяет осуществлять точный подбор состава исходного сырья при неоднородности исходных компонентов. В конечном итоге, это гарантирует получение высокого качества конечной продукции с заданными характеристиками. Достоинства этого метода определили его использование на указанном предприятии. Однако важной особенностью метода является то, что для данной технологии производства нужны колоссальные объемы воды. Единственным рациональным способом получения воды для предприятия является ее выкачивание из скважин.

Важность данного ресурса не просто потребовала разработки системы автоматизированной подачи воды на производство, но и безусловного обеспечения ее

высокой надежности. Задача по разработке блоков управления системы подачи воды была поставлена перед компанией ООО «Авелкон». Хотя в целом задача подачи воды на предприятия является относительно типовой и существует достаточно большое число разработок систем управления соответствующими процессами [1, 2], высокие требования по надежности, в частности по обеспечению бесперебойного питания элементов автоматики, потребовали применения специальных решений, которые и были воплощены компанией.

Для гарантированного обеспечения непрерывности технологического процесса вода на производство подается из накопительного резервуара. Наполнение резервуара осуществляется с помощью двух глубинных насосов. Скважины с насосами расположены друг от друга на расстоянии примерно 40 м.

В зависимости от условий работы и времени наработки один из насосов принимается за основной, а второй – за дополнительный. Работой насосов управляет общая система управления. Задачами системы управления является:

- измерение текущего уровня воды в резервуаре;
- включение и выключение основного насоса;
- подключение при необходимости дополнительного насоса;
- определение того, какой насос выполняет в текущий момент функции основного, а какой – дополнительного.

Предусмотрена возможность задания уровней воды, при которых будет осуществляться включение и выключение основного и дополнительного насосов. Наполнение прекращается если уровень воды достигнет уровня выключения основного насоса. Если уровень воды в резервуаре опустится ниже заданных оператором уровней включений основного и дополнительного насоса, то включаются оба насоса. Включение дополнительного насоса также произойдет, если через 30 секунд работы основного насоса не будет обеспечена необходимая скорость роста уровня воды. Смена функции каждого насоса с основного на дополнительный и наоборот производится либо автоматически после окончания каждого очередного наполнения резервуара или определяется оператором. Измерение уровня воды в резервуаре осуществляется при помощи аналогового датчика давления воды, установленного на дне резервуара.

Ради повышения надежности данной системы, было принято решение о том, чтобы разработать два шкафа управления, пространственно-разнесенные друг от друга в различные помещения. Для питания оборудования, размещенного в этих помещениях, подведено отдельное силовое напряжение. Соответственно система управления состоит из двух шкафов. В каждом шкафу размещены силовые элементы управления

соответствующим насосом. Если произошла пропажа силового питающего напряжения одного из шкафов, система управления должна автоматически перейти на питание от силового питающего напряжения другого шкафа. В таком случае управление осуществляется только тем одним насосом, который размещен в помещении, где присутствует силовое питающее напряжение.

Кроме всего прочего, техническое задание предусматривало предотвращение выхода из строя электродвигателей насосов при воздействии неблагоприятных эксплуатационных факторов, к которым можно отнести работу при чрезмерной нагрузке насосов, скачек питающего напряжения. Оператор должен иметь возможность задавать уровни включения и выключения насосов, выбора режима (автоматического или ручного) смены функций насосов. Должна была предусмотрена возможность отображения:

- общего уровня воды в резервуаре;
- функции каждого насоса;
- аварийной ситуации, заключающейся в падении силового питающего напряжения любого из шкафов с указанием не работающего насоса.

Заданный набор требований и обзор возможностей их обеспечения, позволил определиться с набором технических средств, требуемых для построения системы управления и разработать ее структурную схему (рисунок 1). Оборудование разнесено на два шкафа управления – ШУ1 и ШУ2. Оборудование каждого шкафа максимально унифицировано.

Для того, чтобы реализовать автоматическое управления и человеко-машинный интерфейс было решено применить программируемый логический контроллер (ПЛК). Современный рынок ПЛК широко представлен изделиями, как зарубежных, так и отечественных компаний. Было решено применить программируемое реле ПР200 российской компании ОВЕН [3, 4, 5]. Выбор был обусловлен отсутствием в проекте требований по высокой производительности, что позволяло выбрать простое и надежное устройство. Кроме того, в архитектуру этого контроллера включены элементы для организации несложного человеко-машинного интерфейса (многострочный текстовой дисплей и несколько кнопок для ввода/вывода информации и управления). Его функционала оказалось достаточно для данного проекта. Прежде всего контроллер решает какой насос надо запустить исходя из уровня воды в резервуаре, времени наработки каждого насоса. Программируемая система автоматического управления размещена в шкафу ШУ-1.

Непосредственное управление двигателями насосов осуществляется при помощи устройств плавного пуска (УПП1 и УПП2) Altistart 22 компании Schneider Electric,

предназначенные для управления разгоном и торможением трехфазных асинхронных двигателей. В них используются улучшенные алгоритмы управления, которые предназначены для равномерного изменения частоты вращения и уменьшения неустойчивости механизма в конце разгона, имеется встроенный терминал, что позволяет настраивать устройство и отображать параметры двигателя. Кроме всего, устройство плавного пуска выполняет функции контроля и защиты работы двигателя насоса. Для того, чтобы контролировать перекося фаз и напряжение, в каждом шкафу установлено реле напряжения и контроля фаз (РНПП1 и РНПП2).

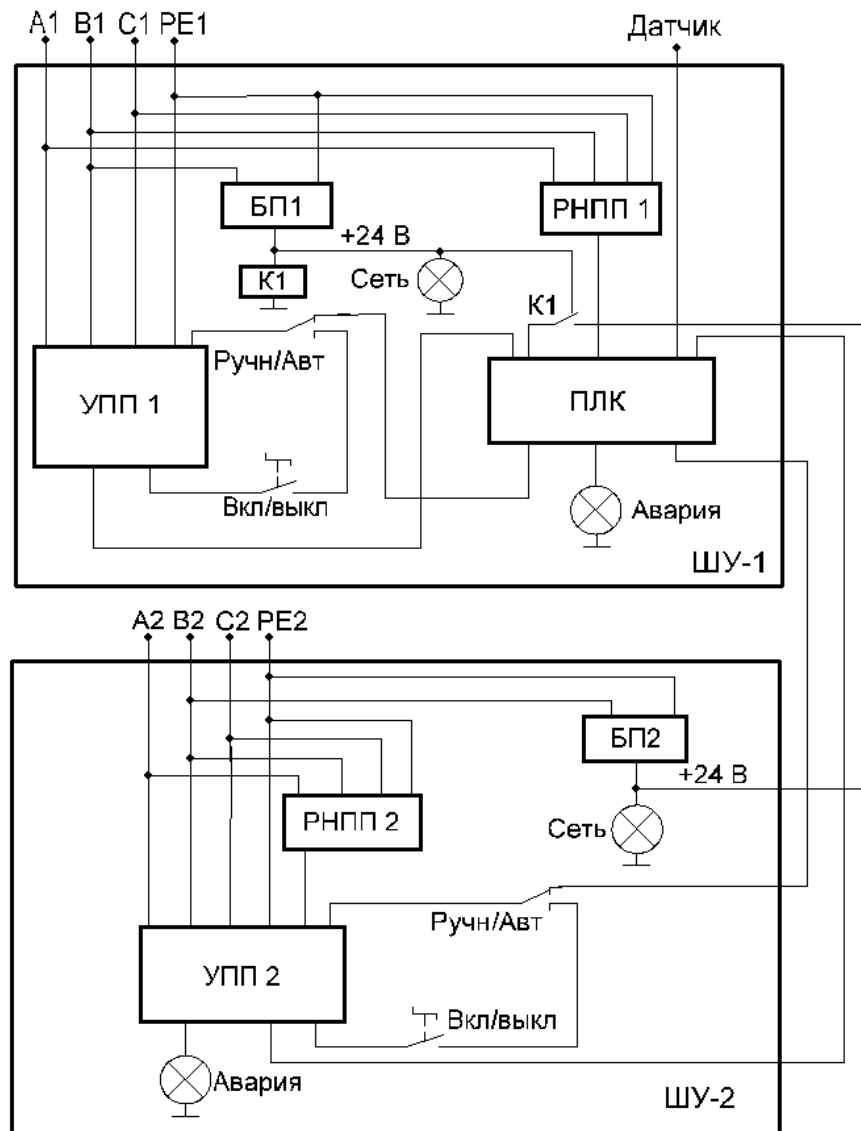


Рис. 1. Структурная схема системы управления автоматизированной подачи воды.

Для реализации автоматического управления и человеко-машинный интерфейс было решено применить программируемый логический контроллер (ПЛК). Современный рынок ПЛК широко представлен изделиями, как зарубежных, так и отечественных

компаний. Было решено применить программируемое реле ПР200 российской компании ОВЕН [3; 4; 5]. Выбор был обусловлен отсутствием в проекте требований по высокой производительности, что позволяло выбрать простое и надежное устройство. Кроме того, в архитектуру этого контроллера включены элементы для организации несложного человеко-машинного интерфейса (многострочный текстовой дисплей и несколько кнопок для ввода/вывода информации и управления). Его функционала оказалось достаточно для данного проекта. Прежде всего контроллер решает какой насос надо запустить исходя из уровня воды в резервуаре, времени наработки каждого насоса. Программируемая система автоматического управления размещена в шкафу ШУ-1.

Непосредственное управление двигателями насосов осуществляется при помощи устройств плавного пуска (УПП1 и УПП2) Altistart 22 компании Schneider Electric, предназначенные для управления разгоном и торможением трехфазных асинхронных двигателей. В них используются алгоритмы управления, которые предназначены для равномерного изменения частоты вращения и уменьшения нестабильности механизма в конце разгона, имеется встроенный терминал, что позволяет настраивать устройство и отображать параметры двигателя. Кроме всего, устройство плавного пуска выполняет функции контроля и защиты работы двигателя насоса. Для того, чтобы контролировать перекося фаз и напряжение, в каждом шкафу установлено реле напряжения и контроля фаз (РНПП1 и РНПП2).

Как уже указывалось, к каждому из шкафов подводится собственное силовое напряжение питания. Это необходимо для того, чтобы в случае пропажи силового напряжения питания на одном из шкафов, второй с высокой степенью вероятности оставался в работоспособном состоянии. Если в первом шкафу есть питающее напряжение с блока питания, контакты реле К1, установленного в этом же шкафу, находятся в разомкнутом состоянии, и питание ПЛК производится от блока питания первого шкафа. Если же питание всего первого шкафа пропадает, то контакты реле переходят в нормально замкнутое состояние и питание ПЛК будет поступать от блока питания, установленного во втором шкафу.

В первом шкафу выход РНПП1 подключен к одному из дискретных входов ПЛК, в то время, как во втором шкафу выход РНПП2 подключен к входу УПП2. Такая схема подключения необходима для того, чтобы была возможность отслеживать аварию, связанную с силовым напряжением питания первого шкафа.

Уровень воды в резервуаре отслеживается при помощи аналогового датчика давления, который находится на дне резервуара. Сигнал с этого датчика поступает на один из аналоговых входов ПЛК. При достижении одного из уровней включений насосов,

контроллер, в зависимости от выбранного оператором режима работы, при котором определяются функции насосов, установленных в первом и втором шкафу, должен запускать основной или дополнительный насос, подавая управляющие воздействия на вход устройства плавного пуска первого и второго шкафа.

Ситуации, когда будут работать оба насоса, предусмотрено две: если будет достигнут уровень включения дополнительного насоса или мощности одного насоса будет недостаточно для поддержания необходимого уровня воды и она продолжит убывать.

На дискретные входы программируемого контроллера так же подается сигналы с устройств плавного пуска. Если ПЛК подал управляющее воздействие на устройство плавного пуска и в ответ не получил обратного сигнала, ПЛК делает вывод о том, что данный насос вышел из строя и незамедлительно запускает второй насос, соответственно оповещая оператора об аварии.

Программа контроллера была реализована на языке FBD в среде программирования фирмы ОВЕН – Owen Logic. Эта среда программирования предназначена для разработки алгоритмов, которые будут использоваться для работы программируемых реле. Интерфейс данной программы полностью русскоязычный, присутствуют онлайн-отладка и шаблоны для работы в сети RS-485.

Все компоненты первого шкафа управления были смонтированы в металлическом шкафу ЩМП-80.60.26 УХЛ1 IP65 IEK (800×600×260 мм). В дверце коробки первого шкафа прорезано отверстие для доступа к передней панели программируемого реле ПР200, на ней установлены световые индикаторы «Сеть» и «Авария», переключатель режимов работы, кнопка с фиксацией для ручного управления насосом. Внутри шкафа все компоненты установлены на DIN-рейке.

Данный проект введен в эксплуатацию на предприятии по производству цемента ООО «Магма».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щит управления насосами (основной – резервный) ЩУН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://owen.ru/project/shchit-upravleniya-nasosami-osnovnoj-rezervnyj-shchun> (дата обращения 03.10.2023).
2. Автоматизация управления насосами по уровню в РЧВ через GSM-канал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://owen.ru/project/avtomatizacziya-upravleniya-nasosami-po-urovnyu-v-rchv-cherez-gsm-kanal> (дата обращения 15.09.2023).

3. Шишов О. В. Современные средства АСУ ТП. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 532 с.
4. Шишов О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации. (Учебник). – М.: ИНФРА-М, 2016. – 365 с.
5. Программируемые реле [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://owen.ru/catalog/programmiruemie_rele (дата обращения 10.09.2023).

БЕСПАЛОВ Н. Н., ПЕРКОВ А. А., ПАНЬКИН К. Ю., ЛЯДУНОВ К. А.

**МОДЕРНИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СТАНКА
С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ CNC 3018
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОТОТИПОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

Аннотация. В статье приводятся результаты модернизации и исследований технологических возможностей станка с числовым программным управлением CNC 3018 для изготовления односторонних и двухсторонних печатных плат. Печатные платы будут применяться для прототипирования различных электронных устройств в студенческом конструкторском бюро «Прибор-МГУ» кафедры электроники и нанoeлектроники Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва.

Ключевые слова: прототипирование, печатные платы, класс точности, CNC 3018.

BESPALOV N. N., PERKOV A. A., PANKIN K. YU., LYADUNOV K. A.

**MODERNIZATION AND RESEARCH OF TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF
THE CNC 3018 NUMERICAL CONTROL MACHINE FOR THE PRODUCTION OF
PRINTED CIRCUIT BOARD PROTOTYPES**

Abstract. The article presents the results of modernization and research of technological capabilities of the CNC 3018 numerical control machine for the manufacture of single-sided and double-sided printed circuit boards, which will be used for prototyping various electronic devices in the student design bureau "Device-MRSU" of the Department of Electronics and Nanoelectronics of the National Research Mordovia State University.

Keywords: prototyping, printed circuit boards, accuracy class, CNC 3018.

При разработке и макетировании различных электронных устройств часто возникает необходимость в создании прототипов печатных плат разрабатываемых устройств. Поскольку данный процесс не является завершающей стадией создания конечного устройства, в различных ситуациях требуется получение нескольких прототипов печатных плат. Компании, которые предоставляют услуги по созданию печатных плат, зачастую работают с минимальными заказами от 1 до 10 штук, однако, при этом необходимо учитывать, что, чем меньше количество заказываемых печатных плат, тем выше их стоимость, а время изготовления и доставки печатных плат занимает от 5 до 20 рабочих дней. При этом стоимость доставки образцов возрастает также с уменьшением срока поставки плат заказчику [1]. В некоторых случаях стоимость и сроки доставки имеют решающее значение, не позволяющее выполнить работы по прототипированию печатных

плат в срок. Решающую роль при этом играет также повышение стоимости разработки. Возможным способом решения данной проблемы является изготовление прототипов печатных плат непосредственно самими разработчиками.

Существуют три наиболее распространённых типов технологии прототипирования печатных плат для электронных устройств:

- с использованием термотрансферной бумаги, на которой напечатан рисунок печатной платы с помощью лазерного или струйного принтера с последующим травлением меди в областях, где нет рисунка;
- технология с применением фоторезиста с последующим экспонированием через прозрачную пленку рисунка печатной платы и травлением слоя меди в не засвеченных областях фоторезиста;
- технология с применением фрезерных станков с ЧПУ.

По сравнению первыми двумя технологиями, ЧПУ фрезерный станок способен, помимо изготовления рисунка печатной платы, вырезать контур платы и сверлить отверстия для компонентов, поэтому данная технология задействует меньше физический труд человека. Недостатком технологии с использованием ЧПУ фрезера является низкая производительность, но в случае прототипирования малого количества печатных плат это не является существенным недостатком.

В рамках работ по созданию электронных устройств, которые проводятся в студенческом конструкторском бюро (СКБ) «ПРИБОР-МГУ» кафедры электроники и нанoeлектроники НИ МГУ им. Н. П. Огарёва на базе стандартной конструкции станка с числовым программным управлением CNC 3018 [2] разработана собственная конструкция станка для прототипирования печатных плат (рисунок 1).

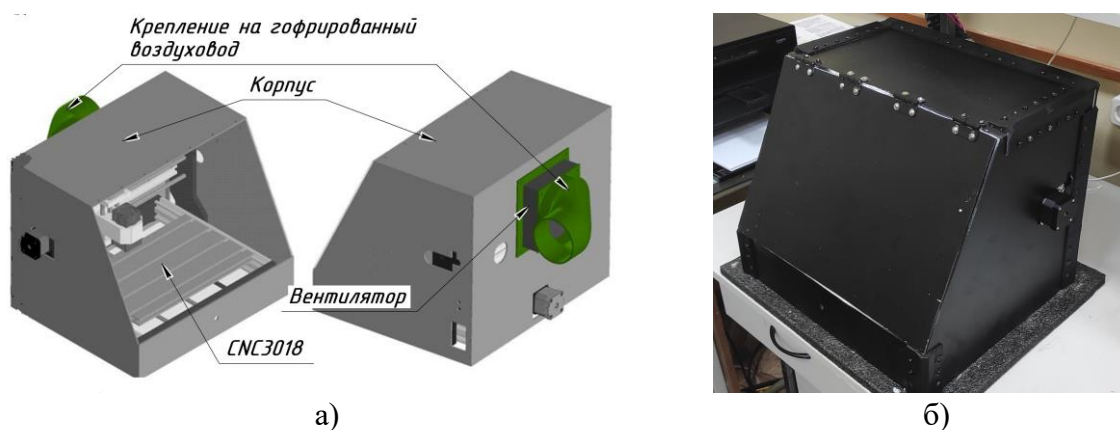


Рис. 1. Внешний корпус фрезерного ЧПУ станка CNC 3018 в виде 3D-модели (а) и в реальном исполнении (б).

Для обеспечения безопасности при эксплуатации, а также для снижения шума при работе, станок помещён в пластмассовый корпус, выполненный из вспененного поливинилхлорида (ПВХ). В

конструкции предусмотрена возможность быстрой смены лазера на фрезу, а также для отведения продуктов горения и пыли при использовании лазера используется специальное крепление для подключения гофрированного воздуховода, соединяющего станок с внешней системой вытяжной вентиляции, установленной в помещении СКБ.

Для исследования достижения возможного класса точности изготовления печатных плат при помощи разработанного станка, согласно ГОСТ и технологическим возможностям отдельно взятых производителей [3, 4], в программной среде SprintLayout была разработана тестовая печатная плата, представленная на рисунке 2.

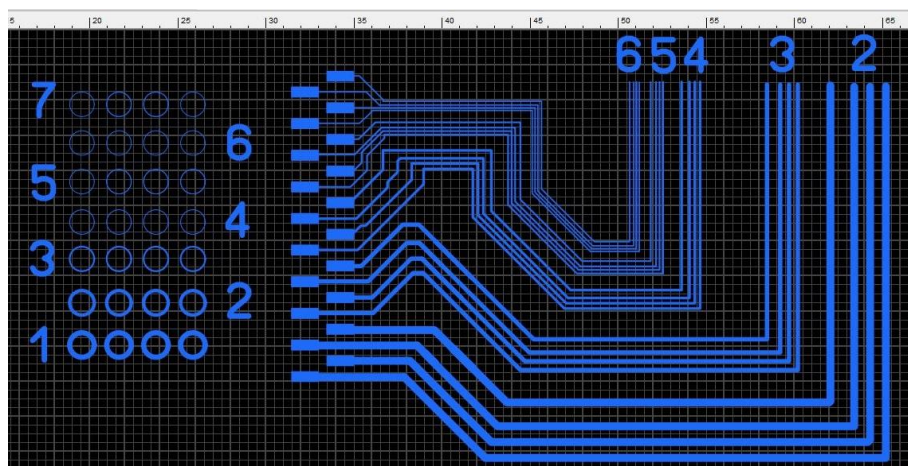


Рис. 2. Рисунок тестовой печатной платы.

Из рисунка 2 видно, что на плате присутствуют проводники с различной шириной и расстояниями между ними, в соответствии с классом точности в соответствии со стандартом ГОСТ Р 53429-2009 [3]. На плате также присутствуют контактные площадки с разной шириной пояса в соответствии с заданным классом точности. Контактные площадки и проводники различной толщины продублированы в нескольких экземплярах для оценки повторяемости результатов. Цифры на рисунке печатной платы, рядом с проводниками и контактными площадками, соответствуют применимому к ним классу точности.

Для определения класса точности ЧПУ фрезерного станка со шпинделем с использованием гравера с минимальным диаметром режущей части типа «ласточкин хвост» была выполнена тестовая печатная плата, представленная на рисунке 3.

В результате визуального осмотра данного исполнения печатной платы, а также тестирования проводников на ней на короткое замыкание, сделан вывод, что максимальный класс точности, доступный при выполнении печатной платы с применением фрезы тип «ласточкин хвост» равняется 2, поскольку проводящие дорожки или контактные площадки для 3–6 класса точности отсутствуют, либо имеют короткое замыкание, либо не соответствуют

своим реальным размерам. Для соблюдения заданной ширины проводника и гарантированного пояса контактной площадки была построена детальная карта высот с шагом в 5 мм, но при этом, фреза типа «ласточкин хвост» заглаблялась в медную фольгу неравномерно, что возможно увидеть при детальном рассмотрении рисунка 3, что свидетельствует о том, что при данном способе изготовления печатных плат сложно добиться качественной повторяемости результатов изготовления печатных плат.

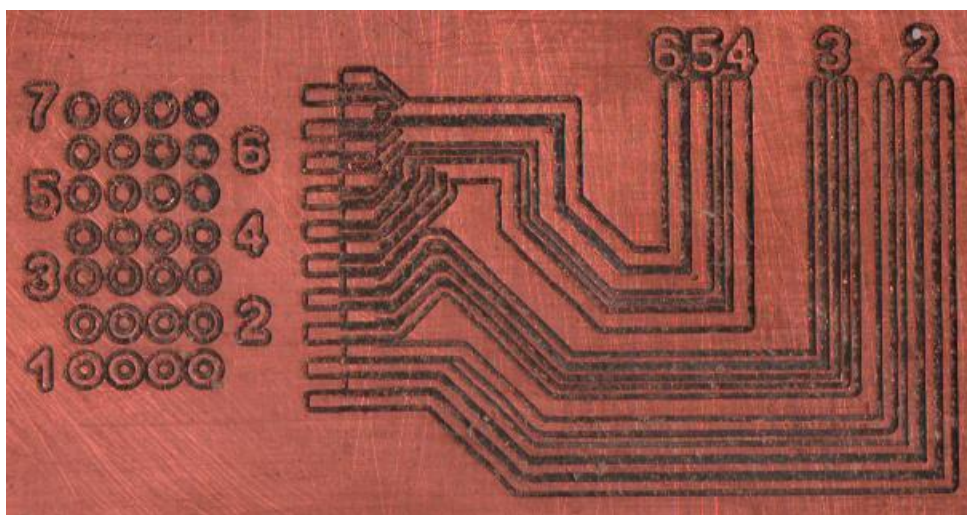


Рис. 3. Тестовая плата, вырезанная с помощью фрезы типа «ласточкин хвост».

Однако данный способ можно эффективно применять для быстрого создания прототипов печатных плат невысокой точности воспроизведения дорожек и контактных площадок, что возможно применять при создании блоков с относительно крупными дискретными элементами, например, резисторами, конденсаторами, транзисторами, трансформаторами, реле и некоторыми типами микросхем.

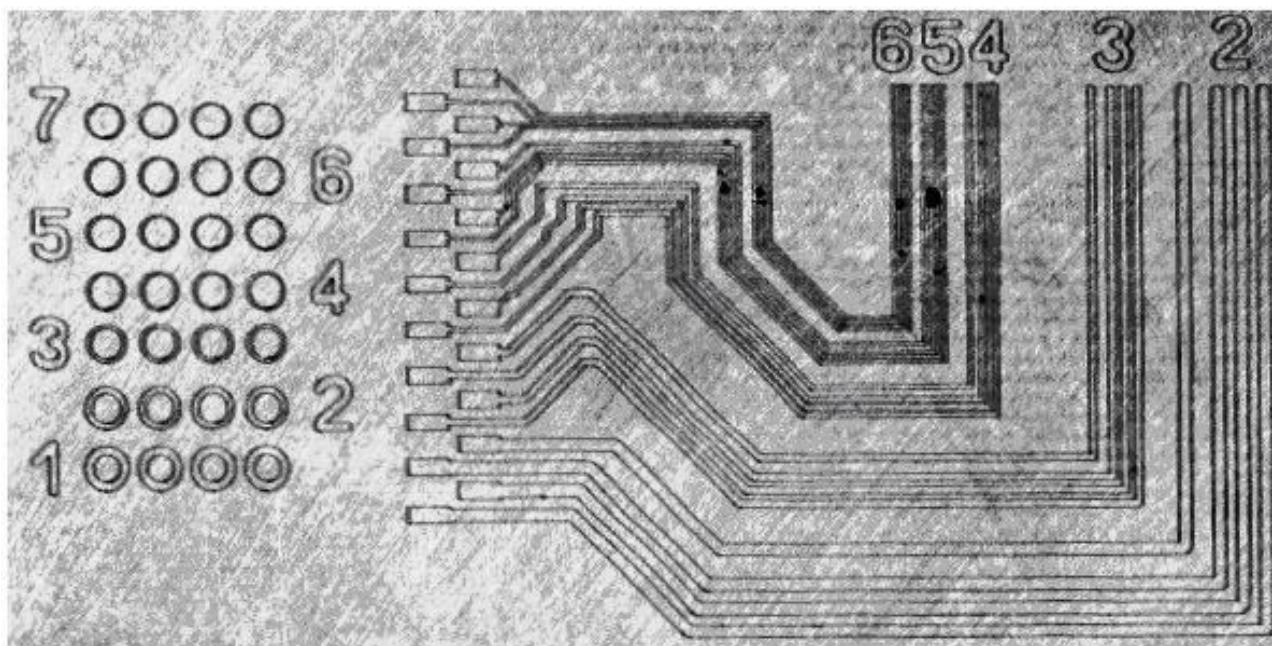
Помимо стандартных инструментов для фрезеровки и сверления, на данный ЧПУ станок возможно устанавливать лазер. При установке лазерного блока можно обеспечить теоретически значительно более высокую точность изготовления печатных плат, поскольку минимальный диаметр сфокусированного лазерного луча на заготовки может быть менее 0,1 мм.

Для испарения слоя меди с помощью лазера нужна мощность не менее 10 Вт. При этом необходимо учитывать, что при применении лазеров большей мощности возможен перегрев фольгированного стеклотекстолита, что может привести к расслоению слоя медной фольги и стеклотекстолита, а также к деформации самой печатной платы. Нами применялся лазер с мощностью 5 Вт. При экспериментальном проведении прототипирования тестовых печатных плат использовался метод с применением предварительного полного закрашивания печатной платы аэрозольной краской и дальнейшего выжигания лазером рисунка печатной платы по ней. Далее печатную плату вытравливали с помощью хлорного железа.

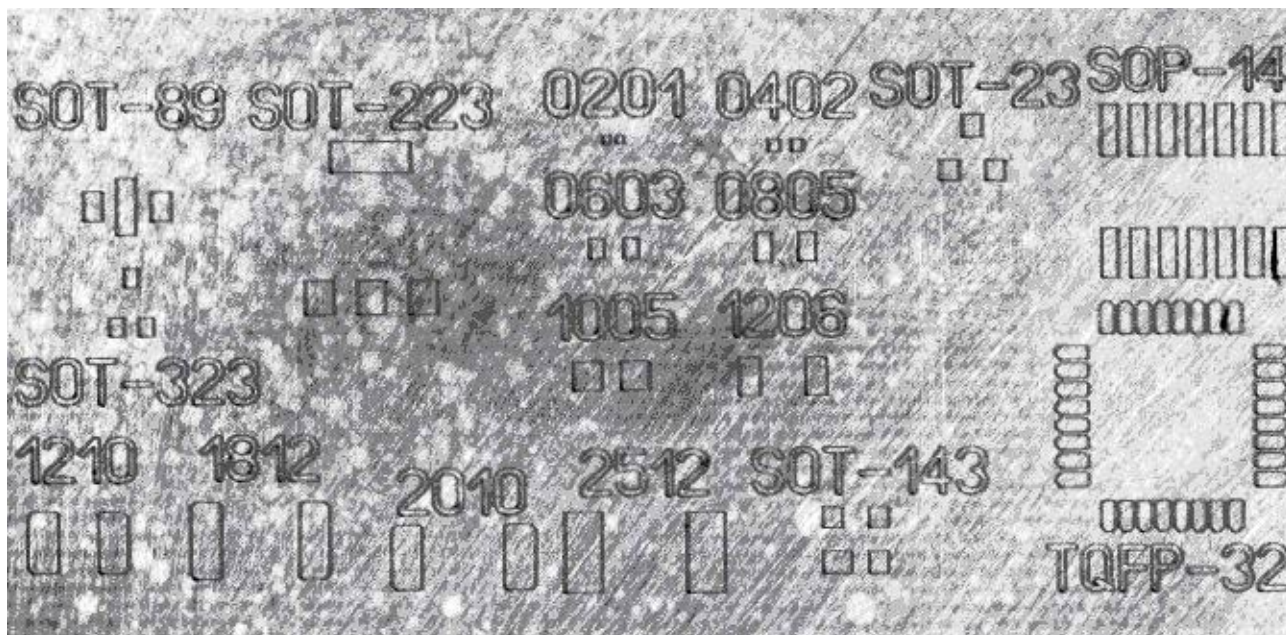
Для определения класса точности изготовления плат при помощи разработанного ЧПУ станка при работе с лазером, были изготовлены тестовые платы, представленные на рисунках 4, а и б.

На рисунке 4. а представлена печатная плата, изготовленная по рисунку 2.

Для визуальной оценки возможностей лазера также была разработана и изготовлена печатная плата для установки на ней распространённых компонентов для поверхностного SMD монтажа (рисунок 4. б).



а)



б)

Рис. 4. Выполненные тестовые печатные плат для визуальной оценки возможностей применения лазерной технологии.

В результате визуального осмотра платы на рисунке 4.а, а также же тестировании проводников на короткое замыкание можно сделать вывод, что при работе с лазерным блоком возможно достигнуть максимальный класс точности равного 4, поскольку проводящие дорожки или контактные площадки для 5–6 класса точности либо отсутствуют, либо не соответствуют своим реальным размерам. Из рисунка 3.б видно, что все контактные дорожки для компонентов поверхностного монтажа (SMD) выполнены с достаточным качеством, вплоть до минимально возможного посадочного места для конденсаторов и резисторов типоразмера 0201.

Корректное вырезание контура или сверление печатной платы, можно обеспечить при построении карты высот платы. Для этого в шпиндель зажимают режущий инструмент, к которому подключают один из проводов щупа карты высот, а другой провод к слою меди на печатной плате. Программа фрезерного станка принимает начальное положение оси Z как нулевое, после чего происходит построение карты высот, путем опускания шпинделя до электрического контакта между двумя проводами щупа карты высот. Разница между нулевым положением и фактическим, при опускании шпинделя по нескольким точкам на плате, и будет являться картой высот данной печатной платы.

Для того, чтобы добиться минимального участия человека при изготовлении печатной платы с максимальным классом точности, требуется работа, как лазерного блока, так и шпинделя на ЧПУ фрезерном станке. При этом печатная плата не должна извлекаться из стола фрезерного станка до конечного этапа изготовления, поскольку при этом может произойти смещение рисунка, контура или отверстий печатной платы. В связи с этим для построения карты высот с помощью шпинделя требуется токопроводящая краска, иначе, с обычной краской, без извлечения печатной платы из стола фрезерного станка обойтись не получится. По этой причине способ с нанесением фоторезиста и засвечиванием его с помощью лазерного блока не был рассмотрен, поскольку фоторезист не является проводником и препятствует построению карты высот с помощью щупа на шпинделе. Для быстрой замены лазерного блока на шпиндель, было разработано быстросъемное устройство для шпиндельной бабки, выполненное с применением станка 3D-печати (рисунок 5).

Необходимо отметить, что в рамках стратегического проекта 2030, который реализуется на кафедре, нами разрабатывается ряд аппаратно-программных комплексов и приборов, все печатные платы которых уже изготовлены и предполагается, что и в будущем будут изготавливаться с применением модернизированного станка с числовым программным управлением CNC 3018.

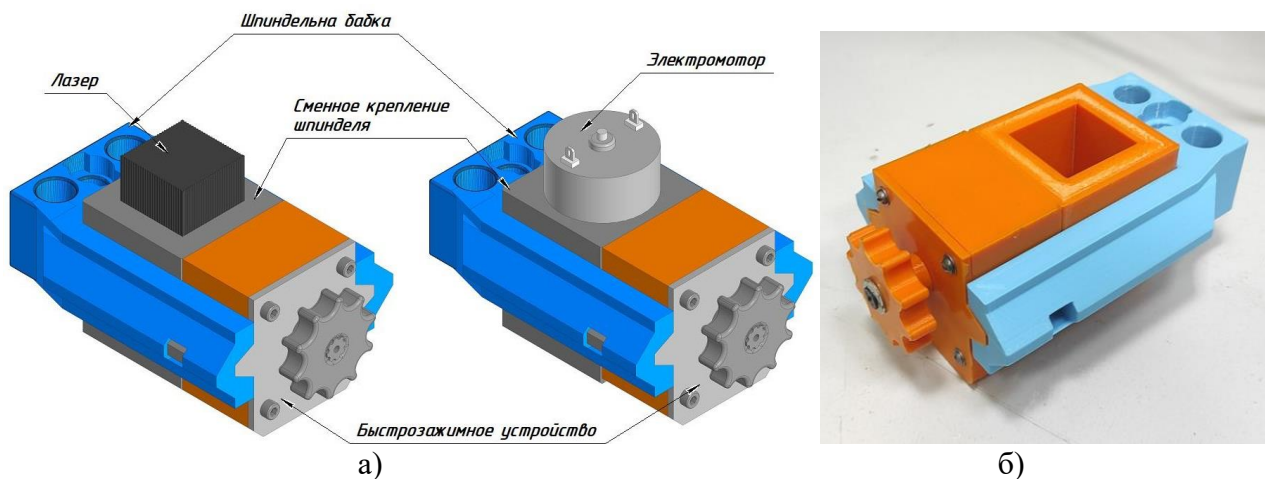


Рис. 5. Быстрозажимное устройство для шпиндельной бабки в виде 3D-модели (а) и в реальном исполнении (б).

В результате модернизации станка с числовым программным управлением CNC 3018 и исследования двух методов технологий изготовления печатных плат с его применением установлены возможности создания печатных плат с различными классами точности исполнения. Экспериментально показано, что применение метода лазерного выжигания рисунка печатной платы с последующим её травлением в растворе хлорного железа, позволяет достигнуть 4-го класса точности в производстве экспериментальных печатных плат. Это позволяет разместить на них все наиболее распространенные радиокомпоненты, включая компоненты в SMD исполнении, такие как конденсаторы и резисторы типоразмера 0201 и микроконтроллеры с типом корпуса схожим с TQFP-32.

Разработанное быстрозажимное устройство позволило ускорить замену шпинделя на лазер и наоборот, а корпус из ПВХ уменьшил шум при работе фрезерного станке, помимо этого, вытяжной вентилятор полностью справляется с отводом продуктов горения во время использовании лазера. Данный комплекс для производства прототипов печатных плат можно считать законченным устройством для применения в лабораторных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прайс-лист на печатные платы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rezonit.ru/price_pcb (дата обращения 11.09.2023).
2. Станок CNC 3018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cnc-maniac.ru/stanok-cnc-3018/?ysclid=ln6iw1h9z699600129> (дата обращения 11.09.2023).
3. ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции (утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию

и метрологии от 27 ноября 2009 г. № 519-ст) // Платы печатные. Основные параметры конструкции – М.: Стандартиформ, 2018.

4. Технологические возможности производства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rezonit.ru/directory/tekhnologicheskie-osobennosti-proizvodstva> (дата обращения 11.09.2023).

КАДЫРКУЛОВА К. К., МАМАТБЕКОВ И. М., БАТЫРКАНОВ Ж. И.
СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМИ ПРИВОДАМИ 3D-ПРИНТЕРА

Аннотация. Предлагается математический подход к разработке модели управления движениями рабочих органов 3D-принтера привода в виде рекуррентных соотношений. Это позволяет решить задачу синтеза законов управления приводами рабочего органа 3D-принтера для случаев, когда предписанную траекторию его движения аналитически описать невозможно или затруднительно, с меньшими трудностями осуществить программно-техническую реализацию синтезированных законов управления.

Ключевые слова: предписанная программа, траектория, закон управления, объект управления, шаговый привод, 3D-принтер.

KADYRKULOVA K. K., MAMATBEKOV I. M., BATYRKANOV J. I.
CONTROL SYNTHESIS FOR 3D-PRINTER STEP DRIVE

Abstract. A mathematical approach to the development of a model for controlling the movements of the working bodies of a 3D-printer drive in the form of recurrent relations is proposed. This makes it possible to solve the problem of synthesizing the laws of control of the drives of the working body of a 3D-printer for cases when it is impossible or difficult to analytically describe the prescribed trajectory of its movement, with less difficulty to implement the software and technical implementation of the synthesized control laws.

Keywords: prescribed program, trajectory, control law, controlled object, step drive, 3D-printer.

На сегодняшний день проблема управления движением объекта по предписанной траектории более или менее решена для линейных одномерных объектов, когда предписанная траектория задаётся в аналитической форме. Управляемый объект при этом описывается системой уравнений

$$\dot{x} = f(x, u, t), x(t_0) = x_0, \quad (1)$$

где: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ – вектор состояния, $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ – вектор управления. Принимается, что вектор-функция $f(x, u, t)$ представляет собой непрерывную ограниченную функцию, имеющую частные производные по совокупности переменных $x_1, x_2, \dots, x_n$ в области определения уравнения (1).

Предписанная траектория движения системы задается в виде уравнений

$$\Psi_r(x, t) = 0, r = \overline{1, s}, \quad s \leq n, \quad t \in [0, T], \quad (2)$$

где Ψ_r – непрерывные функции движения от аргументов.

Для синтеза закона управления формируется полная производная по времени функции $\psi(x, t)$ на движениях системы. В соответствии с (2) она выглядит следующим образом:

$$\frac{d}{dt}\psi(x, t) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \dot{x}_i + \frac{\partial \psi}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

а с учетом уравнений движения системы получаем

$$\frac{d}{dt}\psi(x, t) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \psi}{\partial x_i} f_i(x, u, t) + \frac{\partial \psi}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

Разрешая это соотношение относительно искомой функции $U(x, t)$, находим закон управления, при котором движение объекта осуществляется по предписанной траектории. Но с практической точки зрения задача синтеза будет решена только в том случае, если закон управления обеспечивает также возвращение точки $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ на предписанную траекторию $\Psi(x, t)$, если по каким то причина она окажется вне нее. Таким образом, закон управления должен обеспечивать не только процесс движения по предписанной траектории, но и обеспечивать стабилизацию требуемого движения [2].

Для такого закона управления, очевидно, должно выполняться соотношение

$$\frac{d\psi}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \psi}{\partial x_i} f_i(x, u, t) + \frac{\partial \psi}{\partial t} = R(\psi, x, t), \quad (5)$$

где $R(\psi, x, t)$ – произвольная функция, обращающаяся в нуль на кривой (2), т. е.

$$R(0, x, t) = 0. \quad (6)$$

Попытки синтеза управлений для шагового привода наталкиваются на то, что в большинстве случаев предписанные траектории аналитически описать невозможно. Кроме этого, математическая модель шагового привода, как объекта управления, описывается рекуррентными выражениями, а не непрерывными уравнениями. В связи с этими предлагается новый подход к синтезу законов управления для шаговых приводов.

Выведем математическую модель шагового привода, как объекта управления, а затем рассмотрим процедуру синтеза. Для синтеза законов управления рассмотрим шаговый двигатель с зубчатым передаточным механизмом на валу двигателя. При помощи этого механизма вращательное движение ротора двигателя преобразуется в поступательное движение механизмов (в конечном счете – печатающей головки) 3D-принтера.

Пусть на роторном валу шагового двигателя (ШД) посажено (установлено) зубчатое колесо (шестерня) с радиусом R и угловым расстоянием между двумя зубьями $\Delta\alpha$ градусов, т. е. угол поворота ротора ШД, при действии единичного импульса составляет $\Delta\alpha$ градусов. В дальнейшем требуется представить $\Delta\alpha$ в радианах. Перевод из градусов в радианы

осуществляется по следующей формуле:

$$\Delta\alpha[\text{рад}] = \frac{3.14[\text{рад}](\Delta\alpha[\text{град}])}{180[\text{град}]} \quad (7)$$

При действии единичного импульса на ШД с посаженной на валу его ротора шестерней с радиусом R , одиночный угловой шаг поворота ротора преобразуется в поступательное движение шестерни на расстояние равное

$$L_{ш} = \Delta\alpha \cdot R, \quad (8)$$

где: $\Delta\alpha$ – шаг поворота ротора ШД при подаче единичного импульса (градусы); $L_{ш}$ – величина линейного шага шестерни при действии одного импульса на ШД.

Т. к. в ШД шаги осуществляются в дискретные моменты времени, то математическая модель (ММ) ШД, как объекта управления описывается с использованием конечно-разностного выражения

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + n_k(\Delta\alpha), \quad (9)$$

где: φ_k – текущее угловое положение ротора ШД на t_k -м моменте времени; n_k – количество управляющих импульсов подаваемых на ШД за отрезок времени $[t_k, t_{k+1}]$; φ_{k+1} – угловое положение ротора ШД в t_{k+1} -й момент времени.

Формула (9) используется тогда, когда требуемые перемещения рабочих органов 3D-принтера описаны в угловых координатах. Однако в большинстве случаев необходимые перемещения описываются в линейных координатах. При этом аналогично (9), предлагается математическая модель (ММ) управления движениями рабочих органов 3D-принтера [3] следующего вида:

$$\begin{cases} X_{k+1} = X_k + n_{kx}l_{ux}; \\ Y_{k+1} = Y_k + n_{ky}l_{uy}; \\ Z_{k+1} = Z_k + n_{kz}l_{uz}, \end{cases} \quad (10)$$

где: X_k, Y_k, Z_k – координаты рабочих органов принтера по осям X, Y, Z в k -й момент времени; $X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}$ – координаты рабочих органов по осям X, Y, Z в $(k+1)$ момент времени; n_{kx}, n_{ky}, n_{kz} – количества импульсов поданных на ШД приводов по осям X, Y, Z за указанный промежуток времени; $l_{ux} = l_{uy} = l_{uz}$ – величины линейных шагов рабочего органа по осям X, Y, Z от действия одиночных импульсов на соответствующие ШД.

Если количество подаваемых на ШД импульсов за шаг по времени для каждой оси движения печатающей головки разное, то для обеспечения лучшего воспроизведения формы детали необходимо решать задачу оптимизации распределения во времени импульсов, подаваемых на ШД с меньшей частотой (более редко).

Для ШД, как объекта управления, целесообразно использовать математическую

модель, содержащую выражения, связывающие управляемые величины X_{k+1} , Y_{k+1} , Z_{k+1} с управляющими n_{kx} , n_{ky} , n_{kz} . Подчеркнем, что эта ММ формально соответствует «независимому» управлению ШД по каждой из осей. Вопросы «синхронизации» импульсов управления при разном их количестве за шаг по времени в данной модели не учитываются.

Таким образом, в практическом плане задача управления ШД сводится к нахождению количества управляющих импульсов n_{kx} , n_{ky} , n_{kz} из формул (10) и подаче их на соответствующие ШД за отрезок времени $[t_k, t_{k+1}]$. При этом значения X_{k+1} , Y_{k+1} , Z_{k+1} берутся из таблицы предписанных (требуемых) контрольных точек пространственной траектории движения рабочих органов 3D-принтера (она может строиться в автоматическом или полуавтоматическом режиме на основе компьютерных моделей объектов) [3].

Отметим, что в ряде случаев при планировании использования 3D-принтера приходится учитывать и инерционные характеристики ШД и рабочих органов, т. е. возможность корректной (полной) «отработки» ими всех поступивших импульсов управления за заданный промежуток времени.

Проиллюстрируем построение предписанной пространственной траектории движения рабочих органов 3D-принтера с помощью рисунка 1.

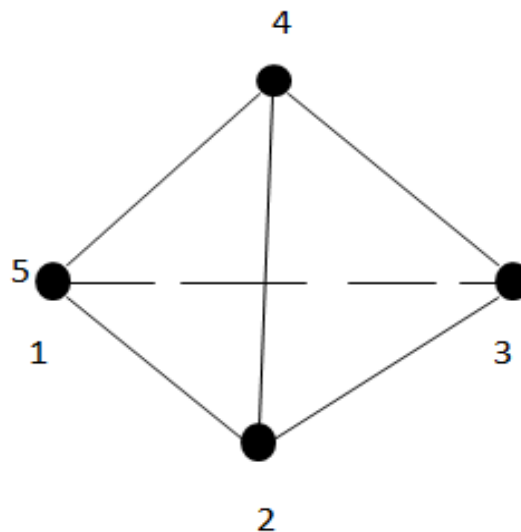


Рис. 1. Пространственная модель детали с нанесенными на нее контрольными точками.

По требуемой пространственной модели объекта с нанесенными на нее контрольными точками строим таблицу для предписанной траектории движения рабочего органа 3D-принтера (таблица 1).

Предписанные координаты в различных точках траектории

t_k	$t_0=0$	$t_1=1$	$t_2=2$	$t_3=3$	$t_4=4$
X_k	0	1	2	3	0
Y_k	0	1	2	3	0
Z_k	0	0	0	3	0

Отметим, что подсчет количества необходимых импульсов по формулам (10) для обеспечения перемещений, задаваемых таблицей 1, может приводить к тому, что расчетное количество импульсов (для определенности – по оси X) будет выражаться не целым числом

$$n_k = (X_{k+1} - X_k) / l_{ш}. \quad (11)$$

В этом случае, берется ближайшее целое число (по стандартным правилам округления), а максимальная погрешность позиционирования ШД составит

$$\varepsilon_{\max} = 0.5 l_{ш}. \quad (12)$$

Следовательно, чтобы уменьшить погрешность позиционирования ШД нужно уменьшить $l_{ш}$. А для этого, в свою очередь, нужно уменьшить величину единичного шага (поворота ротора) $\Delta\alpha$, которая достигается путем выбора ШД с необходимым количеством полюсов (в том числе – эквивалентных полюсов). Необходимая скорость движения ШД обеспечивается путем уменьшения или увеличения величины отрезка по времени $[t_k, t_{k+1}]$ – при фиксированных количествах импульсов, которые должны быть поданы на ШД за этот отрезок. Уменьшение отрезка по времени увеличивает скорость движения (перемещения) ШД и, как следствие, печатающей головки.

Предложенная математическая модель управления движениями рабочих органов 3D-принтера была использована при практической реализации системы управления шаговыми приводами для прототипа 3D-принтера. Для управления ШД используется персональный компьютер, куда предварительно записывается информация о всех параметрах ШД, а также данные о предписанных движениях рабочих органов 3D-принтера.

В компьютере, на основе уравнений системы (10) и заданной величины отрезка по времени $[t_k, t_{k+1}]$ осуществляется подсчет необходимого количества управляющих импульсов для подачи на обмотки ШД в течение каждого временного отрезка.

Функциональная схема системы управления ШД показана на рисунке 2. Она включает следующие объекты: персональный компьютер с портом USB (в силу традиционности); микроконтроллер; три электронных драйвера и сами ШД. Порт USB традиционно

используется для передачи управляющих импульсов на устройство управления – его использование обеспечивает простоту соответствующих схемотехнических решений.

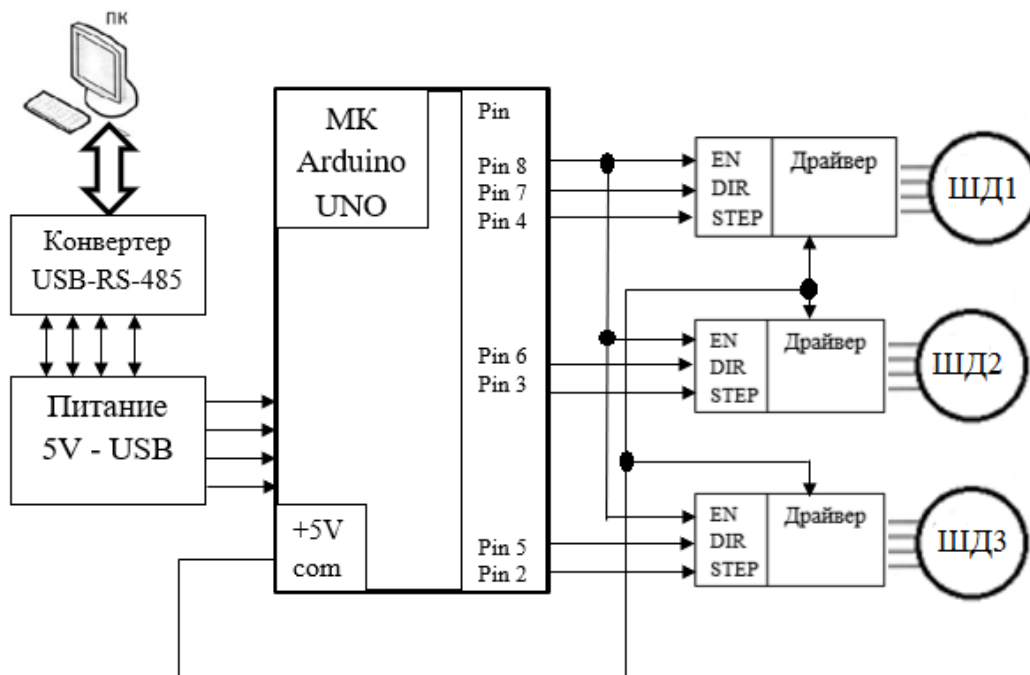


Рис. 2. Функциональная схема системы управления 3D-принтером с использованием Arduino.

Пакет данных, записанный в программный последовательный код персонального компьютера, передается через порт USB в микроконтроллер. Принятые данные преобразуются в три дискретных сигнала для подачи на три входа драйверов каждого ШД. Все время работы ШД на входы EN всех драйверов подается высокий потенциал. В течение всего такта управления на вход DIR драйвера соответствующего двигателя подается низкий потенциал, если необходимо обеспечить направление вращения влево, и высокий потенциал, если необходимо обеспечить направление вращения вправо. При этом на входы STEP драйверов всех двигателей одновременно с частотой выполнения шагов подаются управляющие импульсы высокого уровня длительностью менее периода выполнения шагов, если соответствующий двигатель должен выполнить шаг, и подается низкий потенциал на входы STEP драйверов тех двигателей, для которых все требуемые на данном такте управления шаги уже выполнены. В результате таких действий все драйверы обеспечивают необходимую коммутацию обмоток своих шаговых двигателей, вызывающую одновременный поворот их валов на соответствующее количество шагов в требуемых направлениях [10; 11].

Описанный способ управления несколькими шаговыми двигателями, характеризуется тем, что управляющие импульсы на входы STEP драйверов двигателей за отрезок времени

$t_{\text{шага}}$, в течение которого двигатель должен совершить шаг, формируют с задержкой по времени. Для этого предварительно, до начала управления двигателями измеряют промежуток времени $t_{\text{п}}$, за который ток потребления драйвера достигает своего среднего значения.

На рисунке 3 показан внешний вид разработанного прототипа 3D-принтера. При изготовлении опытного прототипа 3D-принтера взят ШД марки ДС4–6В и винтовой редуктор с длиной винта 84 мм и диаметром 3 мм. При эксперименте установлен, что винтовой редуктор за одиночный импульс перемещает нагрузку на 1,6 мм. Следовательно, $l_{\text{шх}} = l_{\text{шy}} = l_{\text{шz}} = 1,6$ мм.



Рис. 3. Внешний вид разработанного прототипа 3D-принтера.

Работоспособность опытного прототипа 3D-принтера подтверждена экспериментально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батырканов Ж. И., Кадыркулова К. К. Траекторное управление объектом по таблично заданным программам // Известия КГТУ. – 2011. – № 24. – С. 290–295.
2. Батырканов Ж. И., Кадыркулова К. К. Синтез законов управления по осуществлению движения управляемого объекта по предписанной программе // Вестник науки Костанайского социально-технического университета имени академика Зулхарной Алдамжар. – 2013. – № 3. – С. 29–33.

3. Батырканов Ж. И., Кадыркулова К. К., Белялов Ш. А. Управление шаговым приводом 3D-принтера: математическая модель и вопросы технической реализации // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. – № 1 (33). – С. 128–138.
4. Беллман Р. Введение в теории матриц. – М.: Наука, 1969. – 368 с.
5. Бойчук Л. М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. – М.: Энергия, 1971. – 185 с.
6. Денисов Г. С., Снимщиков И. А. Микроконтроллеры. – Бишкек, 2014. – 183 с.
7. Блум Дж. Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства / Пер. с англ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 336 с.
8. Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы «ATMEL». – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – 560 с.
9. Егоров О. Д., Подураев Ю. В. Мехатронные модули. Расчет и конструирование: учеб. пособие. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2004. – 360 с.
10. Иванов А. И. Способ потактового управления несколькими шаговыми двигателями с помощью персонального компьютера по каналу USB и устройство для его осуществления. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2019. – 45 с.
11. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: Линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
12. Мелешин В. И., Овчинников Д. А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. – М.: Техносфера, 2011. – 200 с.
13. Ратмиров В. А. Системы с шаговыми двигателями. – М.; Л.: Энергия, 1964. – 136 с.
14. Шаршеналиев Ж. Ш., Батырканов Ж. И. Синтез систем управления с заданными показателями качества. – Бишкек: Илим, 1991. – 174 с.

ПИЩИН О. Н., ОТУЗОВ А. О., НИКУЛИН В. В.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ

Аннотация. В статье проанализированы возможности применения и предложен вариант реализации технологии интернета вещей в сельском хозяйстве в сфере растениеводства. Внедрение проекта с применением данной технологии поможет значительно снизить потери урожая.

Ключевые слова: NB-IoT, интернет вещей, растениеводство, Астраханская область.

PISCHIN O. N., OTUZOV A. O., NIKULIN V. V.

USING THE INTERNET OF THINGS TECHNOLOGY

TO INCREASE THE EFFICIENCY OF AGRICULTURAL LANDS USE

Abstract. The article analyzes the possibilities of application and proposes an option for implementing the Internet of things technology in agriculture in the field of crop production. The implementation of a project using this technology will help to significantly reduce crop losses.

Keywords: NB-IoT, Internet of things, crop production, Astrakhan region.

В настоящее время растениеводство в Астраханской области широко представлено выращиванием овощей (томатов, огурцов, картофеля и др.), бахчевых культур и риса. На полях области ежегодно выращивается и реализуется около 350 тыс. тонн томатов, перца, баклажан, кабачков, огурцов, моркови, свёклы, лука и капусты. Астраханская область является одним из крупнейших производителей томатов в России. В области выращивается более 25 сортов томатов. Климатические условия области позволяют получать два урожая картофеля в год. Выращивание бахчевых культур для Астраханской области является традиционным видом сельскохозяйственной деятельности. Возделывание риса – одно из приоритетных направлений. Потребительское качество риса достаточно высокое, что позволяет всячески развивать его дальнейшее производство [1]. Однако текущие потери урожая практически всех культур могут достигать 40% за счёт неравномерности отдачи (урожайности) сельскохозяйственных угодий (отдельных участков, отличающихся по качественным характеристикам от типовых норм выращивания культур). Обширные территории, используемые для выращивания овощей, ягод или фруктов невозможно обеспечить требуемым качеством обслуживания при физическом осмотре, контроле состояния грядок. Вручную невозможно везде оценить глубину просыхания почвы, достаточность удобрений, необходимость начала полива.

Одним из способов решения этих проблем и повышения качества и количества сельскохозяйственной продукции является использование умных технологий, которые смогут сделать сельскохозяйственные предприятия более «интеллектуальными» и более эффективными с помощью так называемого «Умного фермерства» [2]. Целью работы, проводимой на кафедре «Связь» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» совместно с кафедрой инфокоммуникационных технологий и систем связи ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва», является исследование возможности применения и разработка варианта реализации технологии NB-IoT в сельскохозяйственной сфере.

Технология интернет вещей (NB-IoT – Narrowband Internet of Things) представляет собой отличный инструмент, который может помочь в управлении сельскохозяйственными угодьями и решить некоторые сложные задачи, с которыми сталкиваются фермеры. Она может использоваться для сбора данных с электронных сенсоров [3; 4], установленных на угодьях. С их помощью можно отслеживать изменения погодных условий, влажности почвы, уровня удобрений и прочие измеряемые параметры, контроль которых обеспечивает урожайность той или иной сельскохозяйственной культуры.

Информация с участков выращивания культур, получаемая с датчиков, размещаемых определенным образом, поможет фермерам выявить причины возможного неурожая или болезней растений и своевременно принять меры для их предотвращения, так как по статистике при неблагоприятных погодных условиях хозяйства теряют до 25–40% урожая. В свою очередь внедрение технологии интернета вещей поможет снизить эти потери до 15–30% или устранить полностью [2].

В качестве объекта исследования выбран участок в Астраханской области площадью 2 гектара, предназначенный для выращивания риса. Ставится задача на примере этого объекта создать систему контроля качественных характеристик земельного участка, окружающего воздуха и объектов обеспечения функционирования сельскохозяйственного предприятия. Определить количество необходимого оборудования для снятия параметров, для сбора и передачи информации, тип канала связи для трансляции качественных характеристик, транслируемых датчиками и тип канала для передачи магистральной информации, определить требуемую пропускную способность системы и подобрать оборудование, обеспечивающее бесперебойную работу каналов сбора информации и управления.

На поле и системах полива будут размещаться датчики температуры, влажности, уровня воды и, при необходимости, других параметров. Датчики могут быть как умными, цифровыми, так и простыми аналоговыми. Информация с датчиков будет собираться устройством сбора и трансляции информации (контроллером) и через сеть оператора сотовой связи передается в центр обработки, где и принимаются управляющие решения (рис. 1).

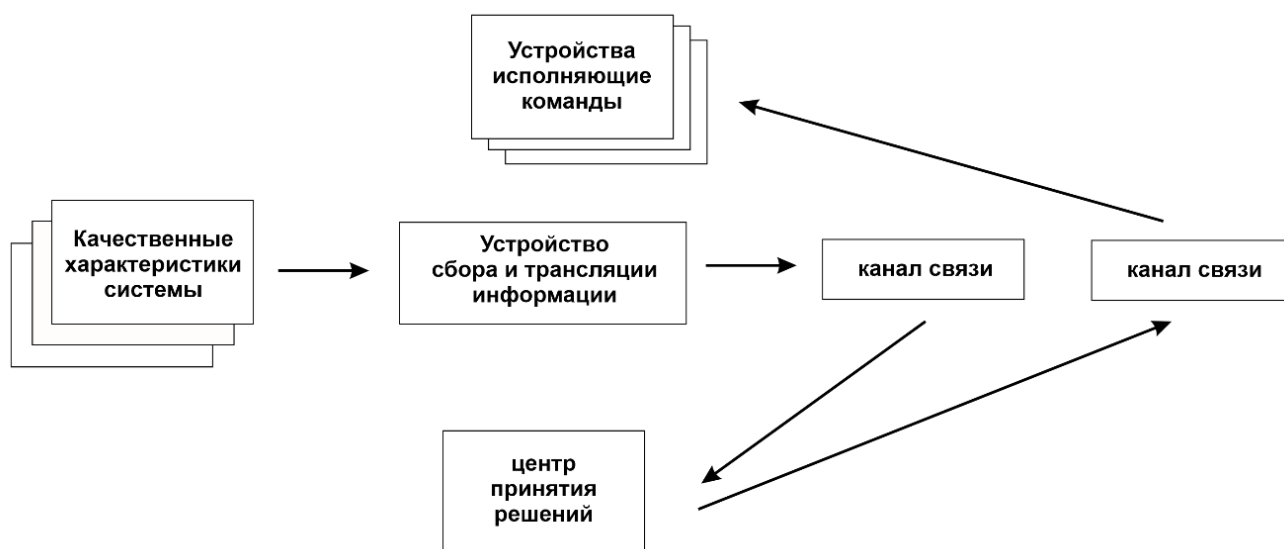


Рис. 1. Функциональная схема системы контроля и управления качественными характеристиками сельскохозяйственной площадки.

В качестве партнера для проведения данного исследования выбрана компания ПАО «МТС», которая ведет разработки аппаратно-программных комплексов в области интернета вещей и имеет хорошее покрытие сети на территории Астраханской области. Поэтому оборудование выбиралось преимущественно от этой компании, что позволяет устранить проблему совместимости и тем самым упростить разработку и настройку системы.

Исходя из проектируемой площади обслуживания и рельефа местности, было принято решение о необходимости 20 датчиков на 1 гектар посевов, а также 4 датчика на 4 цистерны с водой, 20 датчиков на зерновые баки и 7 датчиков на 7 производственных помещений. Общее количество необходимых для реализации проекта датчиков составляет 71.

Выбор оборудования был начат с контроллера интернета вещей. Он должен получать информацию от датчиков или сенсоров, проводить сравнение (анализ) информации с установленными в памяти базы данных нормами и передавать проанализированную информацию для принятия решений (или обработки информации в облачные сервисы или на пункт управления оператору).

Контроллер будет размещаться в поле или вблизи него, поэтому должен быть надежно защищен от вредных воздействий внешней среды (воды и пыли). Степень защиты контроллеров классифицируется по международному стандарту IPXX (International Protection Marking). Максимально защищена в настоящее время модель IOT-контроллера с маркировкой IP68, однако для исследуемых условий достаточной является степень защиты не более IP65.

Характеристики наиболее распространенных контроллеров управления представлены в таблице 1.

Контроллеры управления

Характеристики устройств	SAURES R8, NB-IoT, 4 канала, SIM-чип МТС	SAURES R7, NB-IoT, 4 канала + 32 RS-485, SIM-чип МТС	УСПД ПУМА 30.04.01 NB-IoT
Диапазон частот	800–1900 МГц	800–1900 МГц	800–1900 МГц
Число входов	4 аналоговых	4 аналоговых и 32 цифровых	5 аналоговых
Класс защиты	IP54	IP65	IP65
Тип SIM карты	Sim-чип	Sim-чип (Встроен от МТС)	Mini SIM
Тип батареи	AA 1,5В (щелочная)	ER26500M/EHR-2 3.6В (литиевая)	ER18505M/T-3.6В(литиевая)

Выбор контроллера сделан в пользу SAURES R7 по причине наличия у него встроенного сим-чипа от МТС, достаточного класса защиты и наличия как аналоговых, так и цифровых входов.

Для подключения 71 датчика потребуется не менее 3 контроллеров. Получившееся общее число входов (96 цифровых и 12 аналоговых) позволит решать вопросы по дальнейшему расширению системы.

Датчиков параметров воздуха для систем интернета вещей на рынке представлено большое количество, но не все они предназначены для работы в открытом поле. В таблице 2 приведены примеры наиболее подходящих по характеристикам датчиков, необходимых для получения информации о температуре и влажности воздуха.

Таблица 2

Датчики параметров воздуха (температуры и влажности)

Наименование/технические характеристики	ICB310	DTV-10PNB
Диапазон измеряемых температур	–30...+85°C	–40 до + 70°C
Диапазон измеряемой влажности	0...90%	0...90%
Точность измерения температуры	±0.3°C	±0.3°C
Точность измерения влажности	±2%	±2%
Частота канала связи	2G/3G/4G	2G/3G/4G

Выбран датчик ICB310 ввиду его большей защищённости и широкому диапазону измеряемых температур. Этот датчик может использоваться как в помещениях, теплицах, так и на открытой местности.

Для получения информации об уровне воды для полива в водоеме (емкостях) необходим датчик, который следит за уровнем воды и периодически сообщает текущие значения, а также отправляет тревожный сигнал в случае резкого изменения уровня. В таблице 3 приведены примеры датчиков мониторинга воды.

Датчики мониторинга уровня воды

Наименование/технические характеристики	GoodWAN	TD-L05	VRPWLD601
Частотный диапазон	900–1900 МГц	868–900 МГц	850–900 МГц
Технология	NB-IoT	NB-IoT	NB-IoT
Диапазон рабочих температур	–40 до +60	–20 до +70	–40 до +60
Вероятность недоставки сообщения	0,001%	0,001%	0,001%
Точность значений измерения уровня воды	5 мм	7 мм	5 мм

На основании сравнения характеристик принято решение использовать датчик «GoodWAN», работающий в большем диапазоне частот и имеющий большую точность измерения.

Датчик влажности и температуры почвы должен обеспечивать надежность измерений в течение всего времени выращивания сельскохозяйственной культуры, поскольку от него в большей степени зависит обеспечение растений влагой. Одним из вариантов, может быть, датчик ICB520-01. Его корпус выполнен из нержавеющей стали. Штырь датчика вставляется в почву для быстрого измерения влажности и температуры. Измерение влажности основано на принципе FDR (принцип электромагнитного импульса) путем измерения диэлектрической постоянной почвы для расчета объемного содержания в ней влаги. Измерение температуры выполняется при помощи высокоточного платинового элемента сопротивления. Устройство имеет встроенную калибровку дрефта и цепь для температурной компенсации. Датчик ICB520-02 имеет компенсацию температуры для обеспечения точности измерения. Он может постоянно находиться в земле и подключаться к регистратору данных для неограниченной во времени проверки. Выбор сделан в пользу ICB520-02 так как он позволяет считывать, влажность, температуру и ЕС (электропроводность) почвы (табл. 4).

Таблица 4

Датчики влажности почвы, температуры и потока воздуха

Характеристики					
Элемент	ICB520-01		ICB520-02		
	Спецификация		Спецификация		
	Влага (г/м³)	Температура	Влага (г/м³)	Температура	ЕС
Диапазон	0–100%	–30°C до +70°C	0–100%	–30°C до +70°C	0–20 м/с
Точность	±3%	±0,2°C	±3%	±0,2°C	±2%
Рабочая температура	–40°C до +80°C		–40°C до +80°C		
Защита от внешних воздействий	IP67		IP67		
Материал датчика	Нержавеющая сталь 316L		Нержавеющая сталь 316L		
Питание	5 В, 12–24 В		5 В, 12–24 В		

Ввиду необходимости соблюдения санитарных норм на территории, вверенной пользователю земель и угодий неотъемлемым требованием, является удаление отходов предприятия с целью их правильной утилизации. Таким образом, необходимо оснащение «умными» датчиками устройств для сбора мусора и отходов производства. Так, например, датчик наполненности мусорных баков Digicity предназначен для определения уровня заполнения емкостей, используемых для сбора твердых отходов (табл. 5).

Таблица 5

Датчики на бак сбора мусора

Характеристики датчика Digicity	
Внутренняя батарея	Аккумуляторная батарея
Беспроводной интерфейс	NB-IoT
Частота	2G/3G/4G
Рабочая температура	–45°C до +65°C
Уровень защиты	IP65
Установка на емкости вместимостью	1,1 до 36 м³

Средняя скорость передачи данных технологии интернет вещей – 0,2 Мбит/с. Основными передатчиками будут выступать три контроллера. Таким образом, требуемая пропускная способность будет составлять всего 0,6 Мбит/с. Пропускная способность базовых станций ПАО «МТС» на исследуемой территории в среднем составляет до 450 Мбит/с. Следовательно, суммарная нагрузка от контроллеров разрабатываемой системы будет создавать крайне низкую нагрузку на сеть. Поэтому единственной критической задачей, которую необходимо решить при внедрении системы, будет обеспечение полной доступности сети ПАО «МТС» для всех контроллеров.

С учетом выбранных элементов схема разрабатываемой системы контроля и управления обслуживанием сельскохозяйственных территорий имеет вид, показанный на рисунке 2.



Рис. 2. Система контроля и управления обслуживанием сельскохозяйственных территорий.

Таким образом, существующие технологии инфокоммуникаций, в частности, интернет вещей, имеют возможности по организации умной помощи для получения максимальной отдачи при выращивании сельскохозяйственных культур. Благодаря этому возможно достичь снижения потерь урожая, не расширяя штата сотрудников, занятых в непосредственном обеспечении условий выращивания урожая.

Технологии интернета вещей могут оказать значительный вклад в оптимизацию производства, как минимум, позволят снизить потери сельскохозяйственных предприятий и, как максимум, добиться увеличения урожайности до максимально возможных объемов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспертно-аналитический центр агробизнеса. Сельское хозяйство Астраханской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ab-centre.ru/page/selskoe-hozyaystvo-astrahanskoy-oblasti> (дата обращения 10.09.2023).

2. Интернет вещей (IoT) в Умном сельском хозяйстве [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.intelvision.ru/blog/smartfarmblog?ysclid=lm4vkq9hzs607471697> (дата обращения 30.05.2023).
3. Никулин В. В., Попкова С. С. Применение технологии интернета вещей для интеграции в охранно-пожарные системы сигнализации // Огарёвские чтения: материалы научной конференции: в 3 ч.: Ч. 3. – Саранск, 2021. – С. 292–297.
4. Никулин В. В., Бухаркин В. Г. Анализ угроз безопасности интернета вещей // Вопросы информационной безопасности. Материалы межрегионального вебинара. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. – С. 4–8.

СЕМЕНОВ Е. С., ЕРМАКОВА Н. Н., НИКУЛИН В. В.
АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ
ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ В КАНАЛАХ С ЗАМИРАНИЯМИ

Аннотация. В работе производится анализ цифровой системы связи с OFDM при наличии помех и замираний в канале связи с помощью моделирования в программном пакете SystemVue. Полученные результаты позволяют оценить влияние замирания на качество передачи цифровой системы передачи с OFDM.

Ключевые слова: алгоритм, OFDM, каналы с замираниями, память канала.

SEMENOV E. S., ERMAKOVA N. N., NIKULIN V. V.
ANALYSIS OF NOISE IMMUNITY OF DIGITAL
COMMUNICATION SYSTEM IN FADING CHANNELS

Abstract. The work analyzes an OFDM digital communication system in the presence of interference and fading in the communication channel using modeling in the SystemVue software package. The results obtained allow us to evaluate the impact of fading on the transmission quality of a digital transmission system with OFDM.

Keywords: algorithm, OFDM, fading channels, channel memory.

В последние десятилетия в области телекоммуникаций было разработано множество эффективных технологий, одна из них получившая широкое распространение – многочастотная передача с OFDM (англ. Orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов).

Технология OFDM получила широкое признание как один из высоко спектрально эффективных методов широкополосной беспроводной связи благодаря своей устойчивости к частотной селективности беспроводных каналов. Эта технология в настоящее время принята крупными производителями и органами стандартизации для широкого спектра применений, таких как беспроводная локальная сеть IEEE 802.11 a, WiMAX, LTE и LTE Advanced, цифровое эфирное DVB-T и мобильное DVB-H телевидение.

На скорость, качество и пропускную способность связи существенно влияет используемый канал связи. Основным параметром производительности в цифровых системах передачи является частота битовых ошибок BER (англ. Bit error rate). Производительность канала связи может быть оценена по зависимости BER от отношения сигнал/шум SNR (англ. signal to noise ratio). Помехи или шумы в этом контексте определяются как любые нежелательные сигналы, случайные или детерминированные, которые мешают полному воспроизведению желаемого сигнала в системе.

Другим параметром, который особенно сильно влияет на качество беспроводного канала связи, является замирание. Различают быстрые и медленные замирания. Медленные связаны с изменением метеоусловий, а быстрые преимущественно связаны с движением источника/приемника сигнала.

Замирание можно рассматривать как характеристику изменения ослабления сигнала с различными переменными. Некоторые из этих переменных включают время, географическое положение и радиочастоту. Замирание приводит к снижению уровня принимаемого сигнала, и может быть смоделировано как случайный процесс [2].

Еще одним из наиболее важных параметров, которые следует учитывать при проектировании цифровой системы передачи, является полоса пропускания. На протяжении многих лет развития радиосвязи частотный спектр стал насыщен большим количеством систем передачи, таких как радио- и телевизионное вещание, спутниковая связь, авиационные и морские системы передачи, мобильная связь. Частотный спектр (полосы частот) является дефицитным ресурсом, поэтому важным шагом при проектировании системы передачи является определение полос частот, в которых она будет работать (передавать).

В зависимости от вида проектируемой системы передачи и доступной полосы пропускания можно выделить два основных типа передачи: в основной полосе и в полосе пропускания (широкополосная). При передаче в основной полосе данные (или биты) отображаются на два уровня напряжения для прямой передачи без какого-либо преобразования частоты или модуляции. Такая передача данных в основной полосе применима к кабельным системам, поскольку полоса пропускания большинства кабельных систем находится в основной полосе. Передача в полосе пропускания, в отличие от основной полосы, использует модуляцию, где информация модулирует параметры синусоидального сигнала, называемого несущей. Передачу в полосе пропускания также можно рассматривать как передачу после сдвига частот основной полосы частот (преобразования частоты) в некоторый более высокочастотный диапазон с использованием модуляции. Модулированные сигналы распространяются на большие расстояния, поскольку сигналы основной полосы частот непригодны для прямой передачи (особенно в высокочастотных каналах). Таким образом, для того чтобы исходный сигнал мог распространяться на большие расстояния, он должен быть подвергнут преобразованию – модуляции при помощи высокочастотной несущей волны, которая не влияет на параметры модулирующего сигнала [3].

Система OFDM представляет собой цифровую схему модуляции с несколькими несущими, которая реализует как функцию модуляции, так и мультиплексирования.

Мультиплексирование предполагает совместное использование полосы пропускания канала с независимым каналом передачи данных (каналом источника). В частном случае

OFDM независимые каналы или сигналы являются подмножеством основного сигнала. Таким образом, в OFDM-системе сам сигнал разделяется на независимые сигналы, которые затем модулируются и мультиплексируются для создания несущей. При передаче с OFDM несколько несущих N используются для параллельной передачи символов данных путем равного распределения доступной полосы пропускания W . Каждая поднесущая модулируется с более низкой скоростью передачи символов $\Delta f = W/N$, при этом общее число поднесущих имеет общую скорость передачи данных, равную модуляции одной несущей, имеющей ту же скорость передачи данных. Для модуляции с одной несущей для последовательной передачи данных по каналу используется одна несущая, имеющая символьную скорость R . Это приводит к межсимвольным помехам ISI (англ. inter symbol interference,) в многолучевом канале с замиранием, поскольку период символа может быть значительно меньше временной дисперсии, что требует сложного эквалайзера для компенсации искажений.

Одним из требований к системам передачи и приема OFDM-сигнала является то, что они должны быть линейными. Любая нелинейность вызовет взаимные помехи между несущими в результате интермодуляционных искажений. Это приведет к появлению нежелательных сигналов, которые могут вызвать помехи и нарушить ортогональность передачи.

Поскольку полоса пропускания не является неограниченным ресурсом, количество несущих в системе с OFDM ограничено доступной спектральной полосой пропускания. Кроме того, количество носителей ограничено размером обратного быстрого преобразования Фурье (IFFT).

В ходе работ по совершенствованию систем беспроводной связи с целью анализа возможностей повышения качества передачи в рассматриваемых системах на кафедре телекоммуникационных систем Волгоградского государственного университета совместно с кафедрой инфокоммуникационных технологий и систем связи Мордовского государственного университета в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема FZUU-2023-0001) была спроектирована модель OFDM-системы передачи с помощью САПР System vue (рисунок 1).

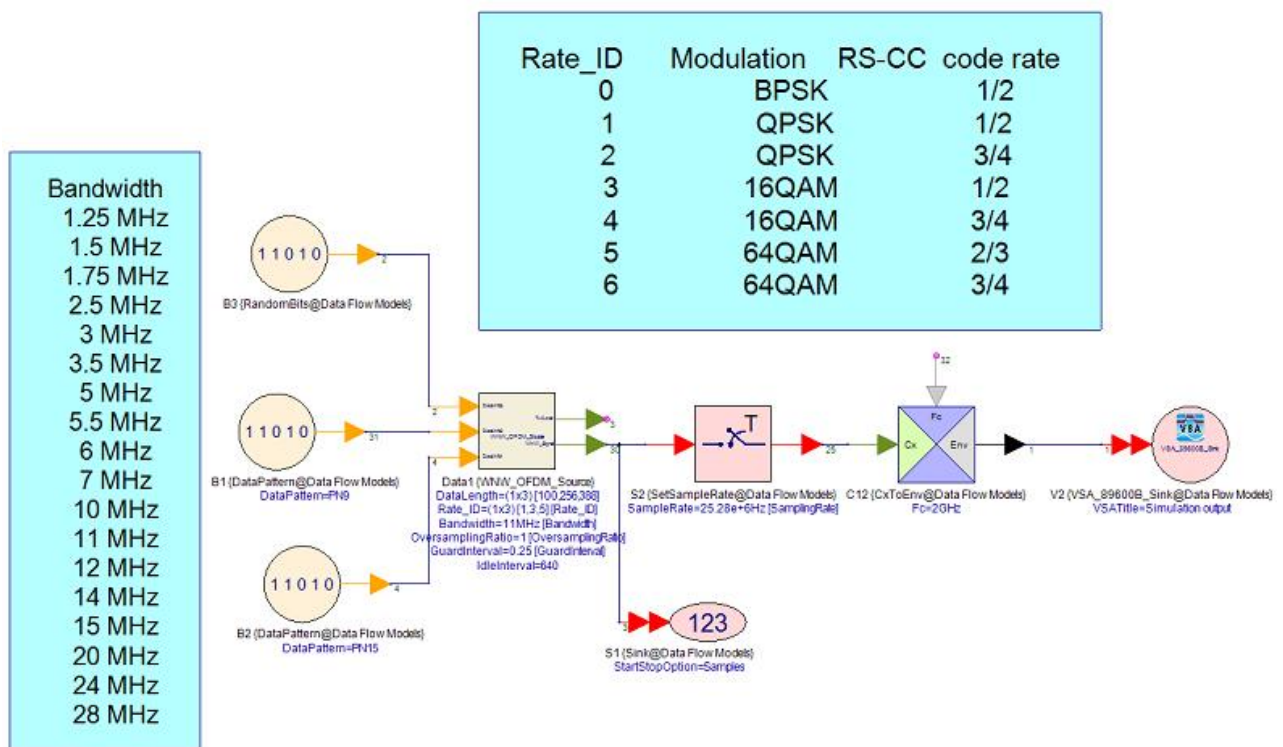


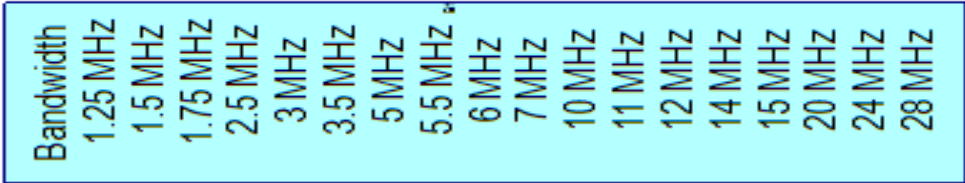
Рис. 1. Схема передатчика OFDM в SystemVue.

Основное различие между системой с OFDM и другими форматами связи заключается в том, что она распространяет данные, отправленные в частотной области, в качестве поднесущих, а затем использует IFFT для отправки их обратно во временную область для передачи в качестве модулирующего сигнала.

Для оценки производительности системы с OFDM в SystemVue построена схема WNW_OFDM_Rx (рисунок 2). Эта схема используется для имитации BER в каналах с замиранием. BER характеризует частоту появления ошибочно восстановленных битов в демодулированном потоке данных.

Чтобы уменьшить эффект замирания в системе OFDM, в System vue можно изменить профиль замирания в канальном блоке. Это делается путем открытия параметров канала и перехода в раздел ModelType. В разделе ModelType можно выбрать следующие профили замирания: Pedestrian_A, Pedestrian_B, Vehicular_A, Vehicular_B, Extended_Pedestrian_A, Extended_Vehicular_A, Extended_TypicalUrban.

System vue позволяет имитировать эффект шума и замирания в системе передачи с OFDM. Чтобы исследовать помехоустойчивость системы, нужно просто добавить шум с помощью блока плотности шума и выбрать один из профилей канала затухания в блоке канала.



5

В результате моделирования получена диаграмма спектра OFDM-сигнала (рисунок 3).

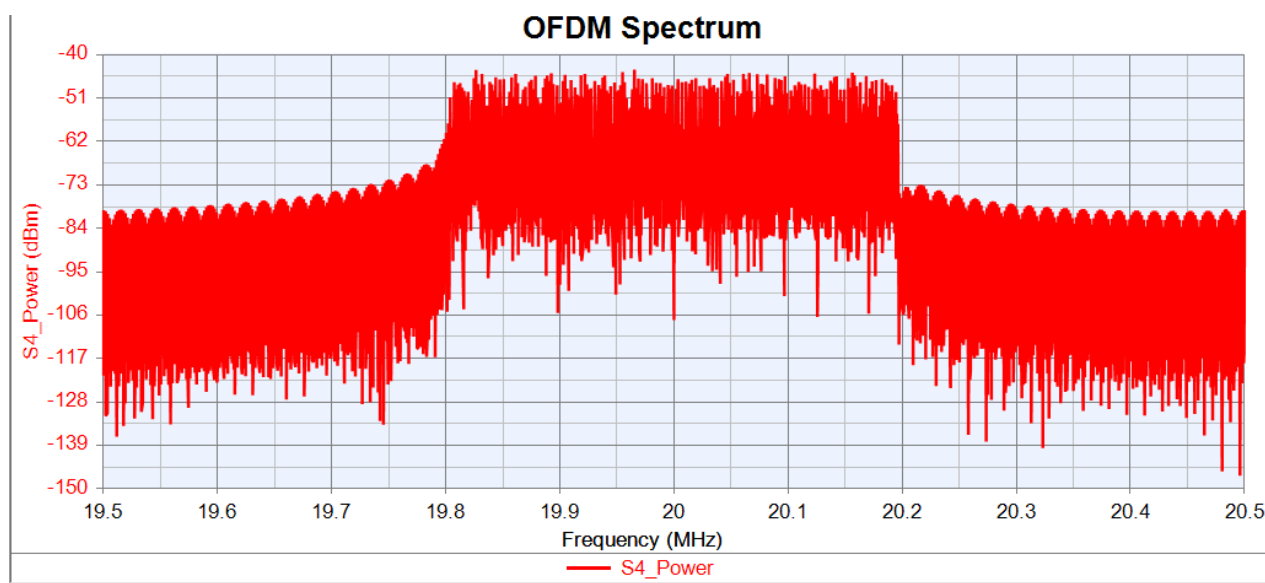


Рис. 3. Спектр сигнала с OFDM.

По спектральной диаграмме на рисунке 3 можно сделать вывод о том, что разработанная модель OFDM-системы работоспособна.

При проведении моделирования для каналов без замираний получены значения BER равные нулю. Стоит отметить, что значение BER равное 0, является идеальным и означает отсутствие ошибок при передаче. Значение BER равное 1, означает, что все принятые символы являются неправильными, то есть ошибочными.

Для анализа влияния замираний и помех на разработанную модель были реализованы три сценария профилей затухания.

Сценарий 1 (Шум плюс ЕРА). В канальном блоке профиль затухания устанавливается как расширенный пешеходный А (ЕРА). Полученные результаты моделирования показаны на рисунке 4.

Name: B1_BER		
Status: Real Vector (9)		
Index	NR_Swp	B1_BER
1	10	0.3524
2	12	0.501
3	14	0.3933
4	16	0.4161
5	18	0.4719
6	20	0.3749
7	22	0.4557
8	24	0.3261
9	25	0.2895

Рис. 4. Результаты моделирования сценария 1.

Как видно из результатов (рисунок. 4), все значения BER больше нуля, то есть имеются ошибки в принятых битах.

Сценарий 2 (шум плюс EVA). В канальном блоке профиль затухания задается как расширенный автомобильный А (ЕРА). Полученные результаты моделирования показаны на рисунке 5.

Name: B1_BER		
Status: Real Vector (9)		
Index	NR_Swp	B1_BER
1	10	0.4819
2	12	0.5391
3	14	0.4828
4	16	0.4168
5	18	0.5447
6	20	0.2729
7	22	0.4032
8	24	0.6903
9	25	0.4841

Рис. 5. Результаты моделирования сценария 2.

Здесь значения BER незначительно увечились по сравнению с предыдущим экспериментом.

Сценарий 3 (шум плюс ETU). В блоке канала профиль затухания устанавливается как расширенный типичный городской канал (ETU). Полученные результаты моделирования показаны на рисунке 6.

Name: B1_BER		
Status: Real Vector (9)		
Index	NR_Swp	B1_BER
1	10	0.4495
2	12	0.49
3	14	0.6126
4	16	0.3418
5	18	0.4668
6	20	0.4324
7	22	0.46
8	24	0.5546
9	25	0.4582

Рис. 6. Результаты моделирования сценария 3.

Значения BER здесь больше, чем в предыдущих двух экспериментах, что указывает на более высокую вероятность битовых ошибок.

Полученные результаты показывают влияние замирования на цифровую систему передачи с OFDM. Три использованных профиля замирования наглядно представляют среды

распространения с низкой, средней и высокой задержками соответственно. Система с OFDM достаточно эффективна при работе в плохих условиях распространения сигнала. Проанализировать степень влияния замираний и помех в каналах связи на прием сигналов в системах с OFDM позволило моделирование в SystemVue.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аминаджиа Т. Б., Семенов Е. С. Построение модели цифровой системы передачи в каналах с замираниями // Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах. Сборник докладов и тезисов XII Всероссийской научно-практической конференции. – Волгоград, 2022. – С. 43–49.
2. Семенов Е. С., Усама Аль-Кади Д. Г., Аминаджиа Т. Б. Анализ передачи дискретных сообщений в системах мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов // НБИ технологии. – 2022. – Т. 17, № 4. – С. 54–59.
3. Nguyen Ha H. A First Course in Digital Communications / ed. Schwedyk. – Cambridge University Press, 2009. – 564 p.

ПАВЛОВ Е. С., ТУТАЕВ Г. М.
ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННЫМИ
ДВИГАТЕЛЯМИ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Аннотация. Позиционные электроприводы, как правило, строятся на базе синхронной машины с постоянными магнитами, двигателях постоянного тока с независимым возбуждением, а также асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором. Однако преимущество использования асинхронного двигателя с фазным ротором состоит в большем числе возможных каналов управления: токи, напряжение и частоты статора и ротора, управление сдвигом фаз между током и напряжением, а также форма питающего напряжения.

Ключевые слова: электропривод, широтно-импульсная модуляция, двигатель двойного питания, преобразователь частоты, генератор треугольных напряжений.

PAVLOV E. S., TUTAEV G. M.
FEATURES OF CONTROL OF POSITIONING MOTORS WITH DOUBLE POWER

Abstract. Positional electric drives, as a rule, are built on the basis of a synchronous machine with permanent magnets, DC motors with independent excitation, and an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor. However, the advantage of using a wound-rotor induction motor is the greater number of possible control channels: currents, voltages and frequencies of the stator and rotor, control of the phase shift between current and voltage, as well as the form of the supply voltage.

Keywords: electric drive, pulse width modulation, double power motor, frequency converter, triangular voltage generator.

Позиционный электропривод – это автоматизированный электропривод, предназначенный для регулирования положения исполнительного органа рабочей машины. Он применяется во многих технических устройствах: в промышленных машинах, станках ЧПУ, в автоматизированных телескопах, манипуляторах и т.д.

Асинхронный электропривод двойного питания – система «преобразователь частоты – двигатель», в которой обмотки статора и ротора асинхронного двигателя подключены к источнику энергии и одна из них получает питание от преобразователя частоты [1].

Энергоэффективное управление позиционным электроприводом на базе двигателя двойного питания является технологическим процессом, который позволяет выполнить движение целевого объекта по определённой траектории с минимальным расходом энергии.

Для этого применяются специальные алгоритмы управления, которые позволяют оптимизировать работу двигателя и регулятора скорости.

Важным элементом такой системы является механизм коммутации двигателя. Он может быть осуществлен двумя способами: с использованием обычного коммутатора или бесконтактного электронного регулятора.

В случае использования коммутатора для управления позиционным приводом необходимо заранее знать примерную траекторию движения объекта, чтобы точно определить положение ротора. При использовании электронного регулятора скорости такой проблемы не возникает, поскольку он позволяет контролировать положение ротора в режиме реального времени.

В псевдосинусоидальных источниках питания теоретически возможно управление двигателя двойного питания (ДДП) путем изменения восьми величин: частоты, амплитуды, фаз и форм напряжений на двух обмотках [2], что достигается преобразователями с одноканальным [3; 4; 5; 6; 7; 8] или двухканальным управлением ДДП [2]. Для управления используются автономные инверторы напряжение-ток [9]. При одноканальном управлении одна из обмоток может питаться от сети или неуправляемого инвертора, а другая обмотка – от управляемого инвертора.

Обычная проблема низкой частоты и амплитуды питающей сети переменного тока с частотным регулированием приводит к несинусоидальным искажениям тока и, следовательно, к пульсациям момента и скорости, которые в случае ДДП не столь существенны. Благодаря принципу формирования разности частот, частота питания остается высокой даже при глубоком регулировании скорости. Это гарантирует синусоидальный ток во всем диапазоне частот, даже при переключении на 180° .

Кроме частоты и амплитуды, регулируемыми параметрами могут выступать также фаза и форма питающего напряжения, поэтому в приводах ДДП используется синусоидальная ШИМ. Амплитуда напряжения и его форма могут задаваться как с помощью различных устройств (рисунок. 1) (индивидуальная настройка), так и с помощью одного устройства (рисунок 2) (комбинированная настройка).

При использовании электроприводов с одноканальным управлением двигателем, если мы установим меньшую амплитуду основной гармоники, это приведет к сокращению длительности импульсов ШИМ. В результате, часть этих импульсов может быть упущена, так как силовые ключи не успевают включиться. Это, в свою очередь, приводит к более грубому формированию огибающей синусоиды. Из-за указанных ранее изменений в электроприводах с одноканальным управлением двигателем искажается форма тока в обмотках. Это приводит к появлению дополнительных пульсаций момента и частоты вращения, которые затрудняют демпфировать с помощью системы управления.

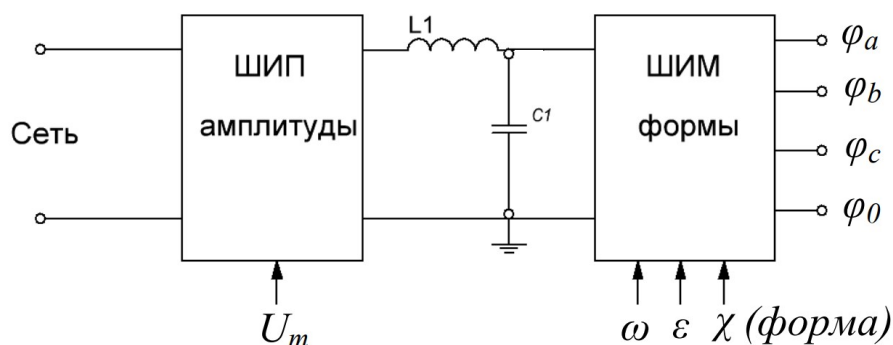


Рис. 1. Преобразовательное устройство с индивидуальным заданием амплитуд и формы питающих напряжений.

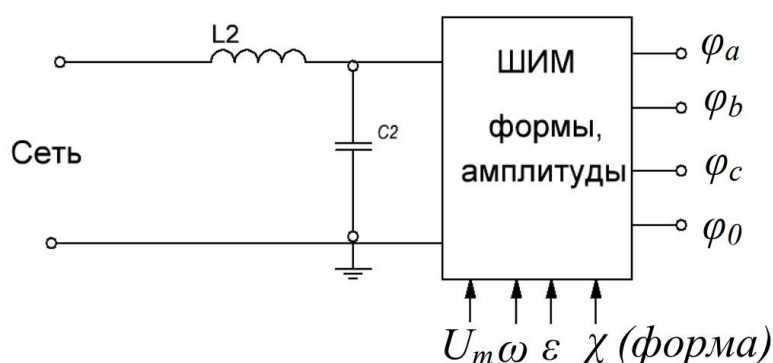


Рис. 2. Преобразовательное устройство с комбинированным заданием амплитуд и формы питающих напряжений.

Для избежания описанных проблем возможно использование регулирования амплитуды напряжения с помощью широтно-импульсного преобразователя (ШИП), отдельно от настройки формы с помощью ШИМ (рисунок 1). Добавление фильтра на выходе амплитудного ШИП не оказывает влияния на общие скоростные характеристики привода, поскольку частота импульсов ШИП может достигать десятков килогерц, а постоянная времени фильтра может быть выбрана относительно небольшой. Главным недостатком является увеличение количества оборудования, что приводит к увеличению массы, габаритов и сложности системы. Конкретно, имеется необходимость в использовании двух статических инверторов постоянного тока для регулирования амплитуды выходного напряжения и двух автономных инверторов с ШИМ.

В ДДП, применяется частотно-разностный принцип для формирования скорости. Этот принцип позволяет достичь относительно небольшого изменения частоты в самом широком диапазоне регулирования скорости. В случае ДДП, регулирование амплитуды обычно осуществляется в том же диапазоне, что и регулирование частоты, то есть в менее широком

диапазоне. Это позволяет избежать искажения формы сигнала напряжения и обеспечить стабильность работы ДДП. В электроприводе с двойным питанием это обстоятельство позволяет использовать только два комбинированных автономных инвертора (АИ) (рисунок 2), которые примерно такой же сложности, как и ШИМ без амплитудного управления. При этом отпадает необходимость в отдельном управлении формой и амплитудой напряжения.

В качестве элементной базы для позиционного электропривода практически всегда используются транзисторные ключи. Они обеспечивают эффективное управление электрическими сигналами и позволяют реализовать точное и быстрое позиционирование привода. Это связано с их высокой коммутационной скоростью и надежностью работы [10; 11; 12]. Помимо этого, используются сборки и микросхемы на их основе. Это в свою очередь упрощает схему управления. Различают следующие схемы управления транзисторными АИ: аналоговые, аналого-цифровые и цифровые.

В аналоговых схемах [13] для формирования импульсов ШИМ используется компаратор. На один из входов компаратора подаются импульсы от генератора синусоидального напряжения (ГСН), а на другой вход – импульсы от генератора треугольного напряжения (ГТН). Таким образом, компаратор осуществляет сравнение двух входных сигналов и формирует соответствующие импульсы ШИМ. Частоты сигналов от ГСН и ГТН обычно синхронизированы, при этом частота ГТН значительно превышает частоту ГСН. Для формирования выходного сигнала используется изменение частоты ГТН и ГСН одновременно (это обеспечивает постоянное количество импульсов ШИМ за период модуляции выходного напряжения), а изменение амплитуды осуществляется при помощи изменения амплитуды ГСН. Аналоговая схема управления АИ имеет преимущество в управлении частотой и амплитудой, но не может обеспечить простое управление формой и фазой в динамике.

В цифро-аналоговых схемах для формирования синусоидальной волны используется цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) выходного сигнала с постоянного запоминающего устройства (ПЗУ), где записываются оцифрованные значения синусоидальной волны на небольших фиксированных интервалах фазы. Для этого применяется схема дискретизации с тактовым генератором и счетчиком, а также ЦАП выходного сигнала с фильтром нижних частот для сглаживания пульсаций. Остальная часть схемы идентична аналоговому варианту. Такой подход упрощает формирование синусоидальных напряжений, включая многофазные режимы. Регулирование частоты выходного напряжения осуществляется путем управления частотой тактовых импульсов выборки, а амплитуда определяется напряжением питания ЦАП. Код счетчика в схеме выборки используется для управления фазой. Цифровые схемы формирования синусоиды обеспечивают простую синхронизацию всех процессов в

многофазном инверторе и основываются на основных принципах синусоидальной широтно-импульсной модуляции [14].

Для создания схемы управления используются тактовый генератор, счетчики и элементы ПЗУ. В ПЗУ заранее записывается информация об управляющих импульсах для силовых ключей. Период огибающей выходного напряжения разбивается на относительно большие тактовые интервалы, например, 16, 32, 64 и т. д. Внутри каждого тактового интервала размещаются импульсы переключения для силовых ключей автономного инвертора. Распределение импульсов задается таким образом, чтобы минимизировать нелинейные искажения выходного сигнала. Для каждого такта или дискретной фазы, устанавливается значение ноль (без импульсов) или единица (с импульсами) в соответствии с заранее заданной последовательностью. Результаты выполненного деления тактовых интервалов на нули и единицы последовательно записываются в ячейки ПЗУ. Число ячеек ПЗУ соответствует количеству тактовых интервалов, и каждая ячейка содержит информацию о соответствующем состоянии (ноль или единица) для данного интервала. При работе генератора тактовых импульсов, схемы управления с помощью счетчика ПЗУ и содержащегося между ними счетчика формируют последовательность цифр в порядке возрастания разрядов, и соответственно считываются нули или единицы, поступающие из ячеек памяти на выход ПЗУ, а оттуда-на силовой ключ схемы управления в соответствующей фазе. Вообще говоря, этот метод не является полным значением термина ШИМ, так как импульсы не обязательно имеют одинаковый интервал. В многофазном АИ может использоваться несколько ПЗУ, в зависимости от количества фаз. Частота формируется изменением частоты тактовых импульсов, а фаза-принудительной записью в код счетчика, соответствующего новому значению фазы. Однако амплитуда в этом случае не регулируется. Это является недостатком рассмотренного метода, и для его корректировки может быть использована, например, схема, в которой амплитуда и частота устанавливаются отдельно.

Более функционально гибким является метод одновременного формирования импульсов различной длительности (например, одновибратором) и последовательной их коммутации на выход [15; 16; 17; 18; 19].

Таким образом, энергоэффективное управление позиционным электроприводом на базе двигателя двойного питания является важным шагом в развитии современных технологий автоматизации и контроля движения объектов. Его применение позволяет не только сократить расход энергии, но и повысить точность и стабильность работы системы.

Согласно этому методу, период огибающей выходного напряжения разделен на определенное количество равных по величине тактовых интервалов. Для каждого тактового интервала генерируется ШИМ-импульс, длительность которого пропорциональна величине

тактового интервала и зависит от синусоидальной зависимости. Во время работы схемы генератор тактовых импульсов с помощью счетчика последовательно формирует ряд тактовых импульсов, которые используются для создания ШИМ-импульсов в каждом тактовом интервале. При каждом поступлении тактового импульса, специальный формирователь создает полный набор ШИМ-импульсов для всех тактовых интервалов. Выход формирователя подключен к коммутатору, который управляется счетчиком тактовых импульсов. Коммутатор выбирает ШИМ-импульсы, соответствующие числу тактовых интервалов, и подает их на выход. Для формирования относительных длительностей ШИМ-импульсов могут использоваться запоминающие устройства [17; 18] или одиночные вибраторы с различными характеристиками [16]. В многофазных системах число коммутаторов равно числу фаз, а последовательность ШИМ-импульсов, переключающая на соответствующий выход (фазу), программируется на сдвиг на требуемый угол (число необходимых тактовых интервалов). Частота выходного напряжения задается частотой тактовых импульсов, а фаза-количеством последующих интервалов (заставляя счетчик считать против естественной последовательности). Управление амплитудой представляет собой другую задачу и имеет иное решение.

Анализируя известные схемы управления АИ, можно сделать вывод, что большинство из них не имеют возможности управлять четырьмя параметрами выходного напряжения – частотой, амплитудой, фазой и формой – независимо друг от друга. В большинстве случаев изменение одного параметра (например, частоты) приводит к изменению и других параметров, что ограничивает гибкость и точность управления. Это является недостатком существующих схем и может быть предметом дальнейших исследований для разработки более эффективных методов управления АИ с возможностью независимой регулировки каждого параметра. Однако в сочетании с соответствующим и модификациями такие схемы могут быть созданы. Это практически невозможно без применения цифровых компонентов. Поэтому для регулировки амплитуды, частоты, фазы и формы необходимо использовать цифроаналоговое или полностью цифровое устройство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 50369-92. Электроприводы. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1993.
2. Сабинин Ю. А., Грузов В. Л. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 128 с.
3. Ботвинник М. М., Шакарян Ю. Г. Управляемая машина переменного тока. – М.: Наука, 1969. – 140 с.

4. Бродовский В. Н., Иванов Е. С. Исполнительные устройства с многофазными электродвигателями переменного тока // Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Техническая кибернетика. Книга 3. Исполнительные устройства и сервомеханизмы / Под ред. В. В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1976. – С. 239–295.
5. Бродовский В. Н., Иванов Е. С. Приводы с частотно-токовым управлением. – М.: Энергия, 1974. – 168 с.
6. Блоцкий Н. Н., Шакарян Ю. Г., Плотникова Т. В. Аналитический расчёт переходных процессов в АС машинах при заданном изменении некоторых переменных // Режимы работы асинхронизированных синхронных машин: Сб. статей. – М., 1982. – С. 8–17.
7. Онищенко Г. Б., Локтева И. Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
8. Слежановский О. В., Дацковский Л. Х., Кузнецов И. С., Лебедев Е. Д., Системы Л. М. подчинённого регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
9. Блоцкий Н. Н., Лабунец И. А., Шакарян Ю. Г. Машины двойного питания. Итоги науки и техники. Сер. Электрические машины и трансформаторы. – Т. 2. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1979. – 124 с.
10. Голубев П. В., Карпенко В. М., Коновалов М. Б., и др. Проектирование статических преобразователей. – М.: Энергия, 1974. – 408 с.
11. Соустин Б. П., Иванчура В. И., Чернышев А. И., Исляев Ш. Н. Системы электропитания космических аппаратов. – Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма, 1994. – 318 с.
12. Герман-Галкин С. Г., Лебедев В. Д., Марков Б. А., Чичерин Н. И. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 248 с.
13. Слепов Н. Н., Дроздов Б. В. Широтно-импульсная модуляция. (Анализ и применение в магнитной записи). – М.: Энергия, 1978. – 192 с.
14. Забуга В. А., Лопатин Ю. Н. Система управления инверторами с ШИМ по синусоидальному закону // Устройства автоматики автономных объектов: Межвуз. сб. – Красноярск: КрПИ, 1985. – С. 8–13.
15. А. с. 1026282 СССР, МКИЗ Н 02 Р 13/18. Устройство для управления автономным инвертором / Г. В. Чалый, Ю. А. Дмитриенко, В. И. Олещук (СССР). – № 3403632/24–07; Заявлено 11.03.1982; Опубл. 30.06.1983, Бюл. № 24.

16. А. с. 542323 СССР, МКИ2 Н 02 Р 13/16. Способ цифрового формирования синусоидального тока нагрузки / В. М. Абушкин, А. И. Чернышев (СССР). – № 2076559/07; Заявлено 21.11.1974; Оpubл. 05.01.1977, Бюл. № 1.
17. А. с. 613476 СССР, МКИ2 Н 02 Р 13/18. Цифровая система управления инвертором напряжения / Г. С. Зиновьев, Н. А. Красиков (СССР). – № 2365893/07; Заявлено 01.06.1976; Оpubл. 30.06.1978, Бюл. № 24.
18. А. с. 985923 СССР, МКИЗ Н 02 Р 13/18. Цифровое устройство для управления инвертором напряжения / В. Л. Грузов, А. Н. Полозок, А. В. Родионов, В.А. Тихановский (СССР). – № 3302412/24–07; Заявлено 19.06.1981; Оpubл. 30.12.1982, Бюл. № 48.
19. А. с. 995258 СССР, МКИЗ Н 02 Р 13/18. Устройство для управления автономным инвертором / В. Л. Грузов, В. А. Тихановский (СССР). – № 3275334/24–07; Заявлено 13.04.1981; Оpubл. 07.02.1983, Бюл. № 5.

КУЗНЕЦОВ Е. А., АШРЯТОВ А. А., КАЛАБКИН А. А.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЕТОВЫХ ПРИБОРОВ

Аннотация. В статье представлен анализ тенденций развития многофункциональных световых приборов. Рассматривается возможность комбинирования нескольких функций в одном световом приборе, что позволяет дополнять и расширять область их применения. Подчеркивается перспективность дальнейшего развития многофункциональных осветительных приборов и их способности удовлетворять потребности разнообразных отраслей промышленности.

Ключевые слова: светодиод, световой прибор, световой поток, мощность, цветовая температура, функциональность.

KUZNETSOV E. A., ASHRYATOV A. A., KALABKIN A. A.

DEVELOPMENT TRENDS OF MULTIFUNCTIONAL LIGHTING DEVICES

Abstract. The article presents an analysis of trends in the development of multifunctional lighting devices. In particular, the possibility of combining several functions in one lighting device is considered, which makes it possible to complement and expand their scope of application. The prospects for further development of multifunctional lighting devices and their ability to meet the needs of various industries are emphasized.

Keywords: light-emitting diode, lighting device, luminous flux, power, color temperature, functionality.

Свет является неотъемлемой частью нашей повседневной жизни. Он влияет на наше настроение, комфорт и эффективность. С развитием светотехнических технологий появились многофункциональные световые приборы – осветительные устройства, спроектированные и созданные с целью предоставления нескольких различных функций и возможностей освещения в одном компактном устройстве, то есть эти приборы позволяют пользователям достигать различных эффектов освещения, менять цветовую температуру, яркость, направление света и другие параметры в зависимости от конкретных потребностей и задач [1].

Многофункциональные осветительные приборы могут быть интегрированы в умные дома и офисы, где они позволяют автоматически регулировать освещенность и цветовую температуру света в зависимости от времени суток, погоды или даже настроения. Это обеспечивает максимальный комфорт и помогает снизить потребление электроэнергии [2].

В сфере фотографии и видеосъемки многофункциональные осветительные приборы широко используются для создания качественного освещения и контроля. Они позволяют

регулировать цветовую температуру, интенсивность света и угол освещения для получения нужных эффектов и высокого качества изображений [3].

Также с помощью multifunctional осветительных приборов можно создавать уникальные световые инсталляции, интерактивные выставки и световые шоу на концертах и фестивалях. Это открывает новые возможности для художников и дизайнеров, позволяя им экспериментировать с цветом, формой и движением света [4].

На кафедре источников света Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва сравнительно давно ведутся научные работы, посвященные разработке и исследованию multifunctional световых приборов. В частности, был проведен комплекс экспериментальных и расчетных исследований, направленных на разработку таких приборов [5]. Эти исследования включали в себя анализ светотехнических материалов и характеристик компактных люминесцентных ламп, а также конструирование и создание образцов декоративных multifunctional световых приборов с использованием композиционных материалов.

Интенсивное развитие светодиодов, обладающих рядом характеристик, существенно отличных от традиционных источников света, позволяет создавать multifunctional световые приборы с функциями, которые нельзя получить с традиционными источниками света. Так, в [6] рассматривается устройство и принцип работы multifunctional светового прибора, основанного на RGB-светодиодах, и приведены результаты измерений его электрических, световых и цветовых характеристик. В ряде работ исследуются возможности создания multifunctional световых приборов переменной цветности на основе светодиодов [7; 8]. В данных исследованиях спектр излучения активно моделируется с использованием светодиодов, излучающих в узких диапазонах длин волн. Такое техническое решение позволяет в режиме реального времени трансформировать окружающее освещение и изменять цветоцветовую атмосферу в помещении. Светодиоды, излучающие в узких диапазонах длин волн, позволяют осуществлять более точный и гибкий контроль над цветностью излучаемого света. Это позволяет пользователям адаптировать освещение в соответствии с различными задачами или настроением, что является особенно полезным в домашнем, промышленном и архитектурном освещении [9]. Кроме того, такие светодиодные светильники могут быть интегрированы в "умные" системы управления освещением, что позволяет автоматически регулировать цветовую температуру и яркость света в зависимости от времени суток, активности в помещении и других факторов, способствуя созданию комфортного и эффективного освещения [10; 11].

С развитием светодиодных технологий multifunctional световые приборы становятся всё более компактными и портативными. Такие переносные устройства

объединяют несколько различных функций и возможностей освещения в одном удобном компактном корпусе, что делает их идеальными для переноски [12]. Они находят применение в разных местах и ситуациях, начиная от использования в домашних условиях и заканчивая их применением во время туристических походов и кемпинга.

Когда требуется временное освещение рабочего места для выполнения различных видов работ, будь то ремонтные работы, строительство, или другие виды деятельности, где доступ к стационарному источнику света ограничен или неудобен применяются переносные осветительные приборы. Такие многофункциональные световые устройства обеспечивают удобство и эффективность в поддержании оптимальных условий освещения в разных рабочих условиях. В качестве примера можно привести переносной светодиодный осветительный прибор [13], который обладает компактными размерами и небольшой массой, при этом обеспечивает удобство в использовании при разнообразных условиях эксплуатации. Его функциональные возможности позволяют регулировать как световой поток прибора в пределах от 0 до 100 %, так и распределение света, обеспечивая общее или местное освещение.

Следует отметить, что исследования и разработки в области многофункциональных световых приборов ведутся так же и зарубежными компаниями, которые вносят свой вклад в создание новых и инновационных световых приборов. В качестве примера рассмотрим несколько оригинальных многофункциональных световых приборов.

Настольная лампа Dyson Solarcycle Morph [14], обладает многофункциональными характеристиками, позволяющими создавать разнообразное освещение в зависимости от потребностей пользователя. Лампа оснащена магнитной оптической головкой, и ее функциональность меняется в зависимости от того, соединена ли головка с трубкой штатива или нет (рисунок 1). Если оптическая головка не соединена с трубкой штатива, то пользователь может свободно регулировать положение головки, создавая местное освещение. При соединении магнитной оптической головка со штативом, весь свет рассеивается светопрозрачным штативом, что позволяет создавать равномерное и комфортное общее освещение окружающего пространства. Кроме того, функционал лампы позволяет как дистанционно, так и с помощью сенсорных клавиш регулировать яркость и цветовую температуру излучаемого света.



Рис.1. Настольная лампа Dyson Solarcycle Morph.

Многофункциональная беспроводная лампа LED HOUSE (рисунок 2) [15] объединяет в себе ряд функций. Она служит не только источником света, но и устройством для зарядки мобильных устройств, таких как телефоны, наушники и смарт-часы. Кроме того, она функционирует как Bluetooth-колонка, ночник, часы и будильник. Встроенная светодиодная лампа предоставляет 256 режимов освещения и поддерживает 16 миллионов цветов, которые можно настраивать через приложение для телефона. Данная диммируемая Bluetooth-лампа также позволяет эмулировать восхода солнца для более комфортного пробуждения.



Рис. 2. Многофункциональная беспроводная лампа LED HOUSE.

Таким образом, разработка многофункциональных осветительных приборов представляет собой перспективное направление в области светотехники. В таких световых приборах сочетаются несколько разнообразных функций, которые не только дополняют друг

друга, но и значительно расширяют область их применения. Данный подход позволяет улучшить эффективность и удобство использования световых приборов, что, безусловно, будет способствовать дальнейшему развитию этого направления в конструировании световых приборов и удовлетворению потребностей разных отраслей народного хозяйства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркина Е. А., Ашрятов А. А. О перспективах применения светодиодных осветительных приборов с возможностью изменения цветовой температуры // XLIV Огаревские чтения. Материалы научной конференции: в 3 частях / Отв. за выпуск П. В. Сенин. – Саранск, 2016. – С. 20–24.
2. Поликанов Д. С., Байнева И. И. Исследование многофункционального светодиодного осветительного прибора // Международная выставка декоративного и технического освещения, электротехники и автоматизации зданий. – 2018. – С. 181–185.
3. Студийное оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://moscowphotostudios.ru/2019/04/17/studiinoe-oborudovanie/> (дата обращения 12.09.2023).
4. Клеймёнова Т. Е. Светодизайн как новое направление в искусстве // Академическая наука – проблемы и достижения. – 2019. – С. 1–4.
5. Вдовин В. М. Исследование, расчет и создание декоративных многофункциональных световых приборов с композиционными светотехническими материалами: дисс. ... канд. тех. наук. – Саранск, 2000. – 253 с.
6. Микаева С. А., Микаева А. С., Ашрятов А. А., Федоренко А. С., Вдовин М. В. Сборка многофункциональных световых приборов переменной цветности с использованием светодиодов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 1. – С. 3–9.
7. Ашрятов А. А., Федоренко А. С., Вдовин М. В., Микаева С. А. Многофункциональные световые приборы переменной цветности с использованием светодиодов // Справочник. Инженерный журнал. – 2014. – №. 2. – С. 46–53.
8. Микаева С. А., Микаева А. С., Ашрятов А. А., Вишневецкий С. А. Разработка световых приборов с изменяемым спектром излучения // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 11. – С. 43–48.
9. Маркина Е. А., Ашрятов А. А. Перспективы применения светодиодных светильников с возможностью изменения цветовой температуры в освещении общественно-административных зданий // Материалы XX научно-практической

конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва: в 3 ч., Саранск, 16–23 мая 2016 года: в 3 ч.: Технические науки – Саранск: Мордов. гос. ун-т, 2016. – С. 72–77.

10. Патент на полезную модель № 194684 U1 Российская Федерация, МПК F21S 6/00. Многофункциональный светодиодный световой прибор: № 2019121712; заявл. 11.07.2019; опубл. 09.12.2019 / А. А. Ашрятов, С. В. Прытков, Д. К. Чуракова, Е. А. Маркина; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва".

11. Мамаев Д. С., Шарапов А. А. Светодиодный светильник как элемент умного дома // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 7. – №. 2. – С. 236–243.

12. Патент на полезную модель №140831 U1 Российская Федерация, МПК F21S6/00. Переносной светодиодный световой прибор: № 2013149897; заявл. 7.11.2013; опубл. 20.05.2014 / А. А. Ашрятов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва".

13. Патент на полезную модель № 186331 U1 Российская Федерация, МПК F21S 6/00. Переносной светодиодный осветительный прибор: № 2018119082; заявл. 24.05.2018; опубл. 16.01.2019 / А. А. Ашрятов, Е. А. Маркина; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва".

14. Настольный светильник Dyson Solarcycle Morph [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dysonrussia.com/product/dyson-lightcycle-morph-desk-light-black/> (дата обращения 12.09.2023).

15. Светильник с bluetooth-управлением. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ozon.ru/product/umnyy-bluetooth-svetilnik-nochnik-s-besprovodnoy-zaryadkoy-kolonkoy-mnogofunktsionalnaya-939839805/?from_sku=939839805&from_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F&oos_search=false&sh=4GLHyAJzZw (дата обращения 12.09.2023).

ЛУЗГИНА В. С., ШУМАРОВ О. Е., ШЕПЕЛЕВ М. И., НИКУЛИН В. В.

ПОДКЛЮЧЕНИЕ МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ К ВИРТУАЛЬНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ VLAN

Аннотация. Представленная работа содержит обзор медицинских информационных систем, в частности медицинских приборно-компьютерных систем. Проанализированы методы подключения медицинских сетей передачи данных. Выявлены задачи, которые необходимо решить при подключении оборудования к медицинской сети передачи данных. Обозначены аспекты, трудности и решения проблем подключения медицинского оборудования к виртуальной сети VLAN.

Ключевые слова: VLAN, медицинские информационные системы, медицинские приборно-компьютерные системы, сети передачи данных, медицинское оборудование, пропускная способность.

LUZGINA V. S., SHUMAROV O. E., SHEPELEV M. I., NIKULIN V. V.

CONNECTING MEDICAL EQUIPMENT TO VIRTUAL VLAN NETWORK

Abstract. The article contains an overview of medical information systems, in particular medical instrumentation and computer systems. The methods of connecting medical data transmission networks are analyzed. The tasks that need to be solved when connecting the equipment to the medical data transmission network are identified. The aspects, difficulties and solutions to the problems of connecting medical equipment to a virtual VLAN network are outlined.

Keywords: VLAN, medical information systems, medical instrumentation and computer systems, data transmission networks, medical equipment, bandwidth.

Использование информационно-коммуникативных технологий в работе медицинских учреждений уже давно стало нормой жизни. Ключевыми целями изучения технологических процессов эксплуатации различных типов сетей передачи данных в медицине являются улучшение качества медицинского обслуживания, увеличение его доступности, а также сокращение стоимости их внедрения и эксплуатации [1].

Как известно, классическая модель построения сетей передачи данных состоит из двух плоскостей: транспорта и услуг [2]. Глядя на информационное и техническое обеспечение современной медицины сквозь призму данной концепции, можно сделать вывод о том, что эффективность использования информационно-телекоммуникационных технологий в современной медицине напрямую зависит от эффективного взаимодействия между сетями передачи данных системы здравоохранения и телемедицинскими услугами, предоставление которых, в свою очередь, невозможно без применения медицинской техники [3].

Все большее число медицинских приборов проектируется с возможностью электронного обмена данными, как с целью передачи сведений о физиологическом состоянии пациента и медицинских изображений, так и управляющих директив или команд в процессе медицинских манипуляций. Как правило, обмен подобной информацией осуществляется сети общего пользования.

Одной из основных категорий медицинских информационных систем базового уровня являются медицинские приборно-компьютерные системы (МПКС).

МПКС – это приборно-компьютерные и микропроцессорные медико-технологические автоматизированные информационные системы.

Медицинские приборно-компьютерные системы подразделяются на три категории в зависимости от их функциональности:

- 1) специализированные или однофункциональные (для одного вида исследований);
- 2) многофункциональные (для нескольких видов исследований);
- 3) комплексные (комплексная автоматизация мед. задачи).

Медицинские системы передачи данных делятся на ряд классов:

- для осуществления морфологических и функциональных медицинских исследований;
- мониторные;
- управления процессом лечения пациента;
- лабораторной диагностики;
- для научных медико-биологических исследований.

При подключении оборудования к сети передачи данных и МИС необходимо решить ряд важных задач.

1. Аппаратное преобразование. Аппаратное преобразование интерфейса передачи данных. Например, старые аппараты поддерживают только интерфейс стандарта RS-232C, необходимо преобразование к интерфейсу стандартов Fast Ethernet или Gigabit Ethernet.

2. Программное преобразование. Как правило, в медицинском оборудовании не предусмотрено использование стандартных протоколов прикладного уровня.

3. Выделение портов с соответствующими параметрами в действующей сети.

4. Проектирование логической структуры сети (сегмента сети) при построении аппаратно-программного комплекса медицинского прибора.

5. Выбор, подготовка материалов для подключения аппаратно-программного комплекса (установка дополнительного оборудования, организация дополнительных точек подключения и т.д.).

6. Большинство медицинских аппаратов являются приборно-компьютерными системами, состоящими из нескольких самостоятельных модулей или устройств. Как правило, современные электронные медицинские устройства для управления и передачи данных используют сетевые протоколы стандарта Ethernet, в итоге появляется задача выделения сегмента VLAN в действующей сети передачи данных медицинского учреждения.

7. Обеспечение подключения к сети передачи данных медицинского учреждения с целью взаимодействия МПКС с медицинской информационной системой, используемой в учреждении здравоохранения.

Пять первых задач, как правило, решается на уровне производителей медицинской техники и медицинских информационных сетей. Две последние задачи решаются на уровне конечных потребителей, то есть учреждений здравоохранения.

Для того, чтобы медицинские учреждения могли эффективно использовать оборудование во всех филиалах (корпусах) и обеспечивать информационное взаимодействие с медицинскими информационными системами локального, регионального и федерального уровня, надо в первую очередь обеспечить их подключение к сети передачи данных. При этом, необходимо реализовать логическую структуру сети, предусмотренную производителем оборудования [4].

Таким образом, одной из важных задач, при вводе в эксплуатацию МПКС является выделение виртуального сегмента в уже действующей сети медицинского учреждения. Данная задача становится особо сложной в тех случаях, когда компоненты медицинского оборудования находятся в различных локациях. В этих случаях существуют несколько вариантов подключения.

1. Строительство собственных каналов связи. Данный вариант является нереалистичным из-за технологических и финансовых проблем, возникающих в медицинском учреждении.

2. Организация защищенных каналов через Интернет может быть еще одним способом доступа к медицинским данным, но у него есть некоторые недостатки. Одной из проблем является отсутствие гарантированной пропускной способности, что может привести к изменению производительности системы в зависимости от времени, дня и года. Другой проблемой является потенциальная возможность значительных задержек в сеансах терминала. Наконец, Интернет является общедоступной сетью, и для защиты данных в каждой точке доступа должен быть установлен сертифицированный брандмауэр.

3. Договор с оператором связи о предоставлении виртуальной частной сети. Одна из наиболее распространенных технологий создания виртуальных частных сетей – VLAN.

Таким образом, организация сегментов VLAN в имеющихся сетях и виртуальной частной сети решает такие проблем, как:

1. выделение определенной полосы пропускания;
2. обеспечение допустимого уровня задержек;
3. избавление от широковещательного трафика внутри МПКС;
4. защищенность сети передачи данных.

При формировании VLAN в сети передачи данных медицинского учреждения необходимо учитывать ряд аспектов:

1. указание производителя медицинской техники о использовании конкретных IP-адресов;
2. запрет доступа к настройкам медицинского аппарата;
3. невозможность изменения настроек сетевых протоколов медицинского оборудования.

При проектировании VLAN в медицинских учреждениях, использующих медицинскую технику, возникают определенные трудности:

1. построение плана сети передачи данных;
2. сложность администрирования;
3. проблемы передачи в PACS (Picture Archiving and Communication System – система архивирования и передачи медицинских диагностических изображений) и МИС [5];
4. несогласованность сетевого оборудования передачи данных, бесконтрольность и разобщенность фрагментов при создании локальных сетей LAN в границах самих медицинских учреждений.

Но особо, нужно учитывать пропускную способность каналов связи. В настоящее время через сети медицинских учреждений проходит большой объемы информации. Использование каналов МИС для построения МПКС приводит к возникновению серьезных задержек и ошибок.

В таблице 1 показана зависимость времени передачи от объема передаваемых данных (с учетом широковещательного трафика) и скорости канала передачи, данные получены с помощью онлайн калькулятора расчета среднего времени передачи данных по сети.

**Среднее время передачи данных в секундах, в зависимости от объема
передаваемых данных и скорости канала передачи**

Скорость, Мбит/с Объем, Мбит	1	5	10	20	25	50	100	1000
1	9	2	1	1	1	1	0,1	0,01
10	82	17	9	5	4	2	1	0,1
50	410	82	41	21	17	9	5	1
100	820	164	82	41	33	17	9	1
500	4096	820	410	205	164	82	41	5
1000	8192	1639	820	410	328	164	82	9

Таким образом, можно предложить следующие альтернативные модели использования VLAN для организации взаимодействия компонентов медицинской аппаратных комплексов и сложной медицинской техники – с использованием общедоступной широковещательной сети передачи данных и использованием выделенного канала связи показанные соответственно на рисунках 1 и 2.

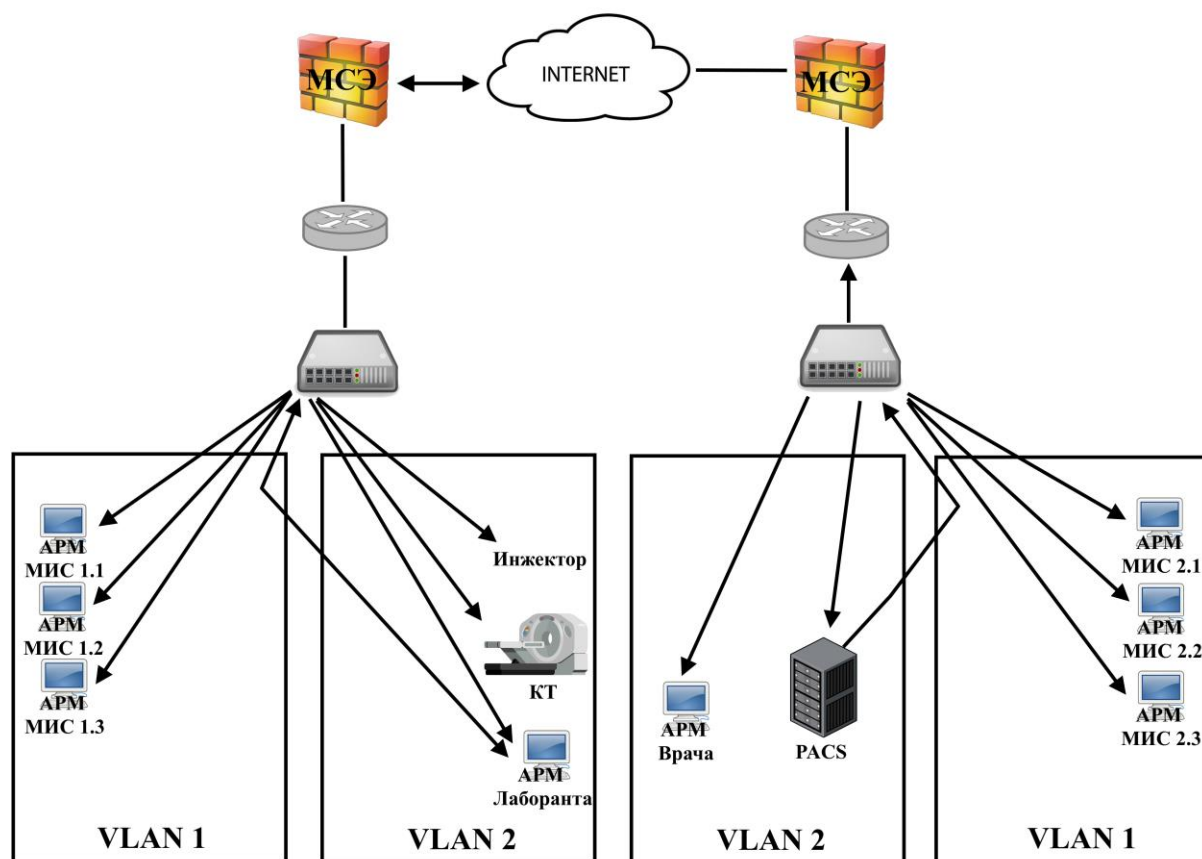


Рис. 1. Модель использования VLAN на основе сети ШПД.

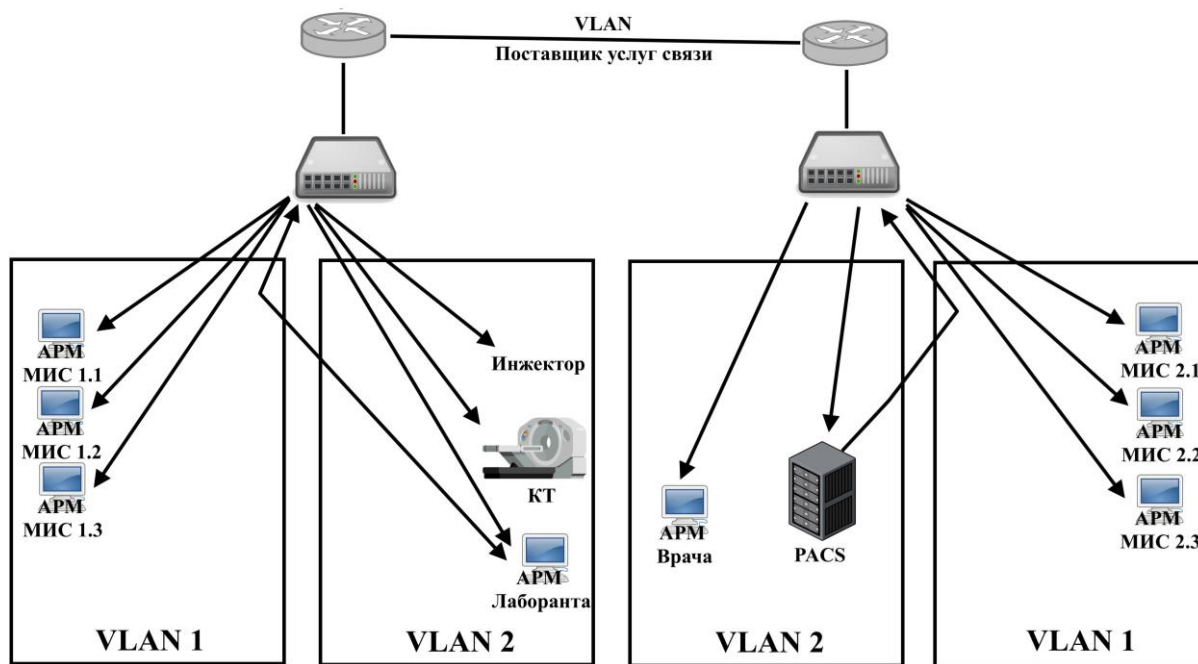


Рис. 2. Модель использования VLAN с выделенным каналом.

Первая модель (рис. 1) предполагает использование общедоступной широковещательной сети передачи данных для обеспечения взаимодействия двух подразделений медицинского учреждения. С целью обеспечения защиты информации канал связи построен на основе сертифицированных межсетевых экранов. Внутри филиала деление на виртуальные подсети осуществляется путём применения управляемых коммутаторов. Таким образом, обеспечивается максимальная скорость передачи данных между компонентами медицинского аппарата и обеспечивается защита от угроз, имеющих место в общебольничной сети передачи данных.

Модель, представленная на рисунке 2, отличается от предыдущей использованием выделенного канала связи для обеспечения взаимодействия филиалов медицинского учреждения. Такой подход позволяет обеспечить более безопасную и высокоскоростную передачу данных. Таким образом, увеличивается производительность и стабильность работы медицинского оборудования, уменьшается время ожидания пациентом медицинской услуги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рекомендации по построению телемедицинских сетей на локальном (отдельные населённые пункты), региональном (районы, области) и национальном уровнях с учётом особенностей стран региона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/CIS/Documents/RIWTDC17/ONAT_RI2_

Recommendations_Rev2.pdf (дата обращения 17.09.2023).

2. Сорокин А. А., Никулин В. В., Волкова А. И. Проектирование сети передачи данных для крупной организации: учеб. пособие по курсовому и дипломному проектированию для направления подготовки бакалавров 11.03.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи. – Саранск: Издатель Афанасьев В. С., 2019. – 148 с.
3. CNewsКлуб. Информатизация здравоохранения. Как построить региональную сеть [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://club.cnews.ru/blogs/entry/informatizatsiya_zdravoohraneniya_kak_postroit_regionalnuyu_set (дата обращения 25.09.2023).
4. Лузгина В. С., Лузгин С. Е., Никулин В. В. Применение формата DICOM для обмена данными в медицинском учреждении // L Огарёвские чтения. Материалы всероссийской с международным участием научной конференции. В 3 ч. / Отв. за вып. А. М. Давыдкин, сост. Г. В. Терехина. – Саранск, 2022. – С. 457–464.
5. Лузгина В. С. Лузгин С. Е., Никулин В. В. Логическая модель сети передачи данных в современной городской поликлинике // Материалы XXV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета. В 3 ч. / Сост. К. В. Родионова, отв. за вып. А. М. Давыдкин – Саранск, 2022. – С. 292–300.

ВОЛКОВ А. В., МИГАЧЕВА Е. М.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНОЙ
ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ОТ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА РЖД**

Аннотация. В данной статье представлено описание и математическое моделирование передачи наведенного напряжения от контактной сети постоянного тока. Описана возможность передачи энергии бесконтактным способом через воздушный трансформатор. В результате моделирования получена форма напряжения на вторичной обмотке трансформатора, а также форма выпрямленного напряжения возможная со вторичной обмотки трансформатора. Такое решение можно использовать для систем освещения железнодорожных платформ.

Ключевые слова: методика моделирования, передача энергии, воздушный трансформатор, контактная сеть.

VOLKOV A. V., MIGACHEVA E. M.

**MATHEMATICAL MODELING OF NON-CONTACT POWER TRANSMISSION FROM
THE DIRECT CURRENT CONTACT NETWORK OF RUSSIAN RAILWAYS**

Abstract. This article provides a description and mathematical modeling of the transmission of induced voltage from a direct current contact network. The possibility of transmitting energy in a non-contact manner through an air transformer is described. As a result of the simulation, the shape of the voltage on the secondary winding of the transformer, as well as the shape of the rectified voltage possible from the secondary winding of the transformer, were obtained. This solution can be used for lighting systems of railway platforms.

Keywords: modeling technique, energy transmission, air transformer, contact network.

Сегодня перед техническими специалистами нашей страны стоит задача по созданию инновационного российского высокоскоростного, а главное – экологичного транспорта. Энергия, потребляемая железнодорожным транспортом, расходуется на обеспечение тяги поездов и питания не тяговых потребителей: станций, депо, мастерских, устройств регулирования движения поездов.

Реализация мер по реформированию российских железных дорог была начата Правительством Российской Федерации в 1998 г. Однако, несмотря на успехи структурной реформы железнодорожного транспорта в Российской Федерации, ее мероприятия и результаты оказались недостаточны для того, чтобы в короткие сроки создать эффективные источники развития, позволяющие обеспечить масштабное привлечение средств в развитие

отрасли и ее модернизацию, сформировать условия для ее долговременного устойчивого роста и повышения конкурентоспособности на мировом рынке. Российские железные дороги не всегда оказываются способны адекватно и гибко реагировать на внешние вызовы, в результате чего потенциальные возможности для получения экономической выгоды могут обращаться в источник проблем.

Стремительное развитие рынка систем накопления энергии (СНЭ) обусловлено распространением переменных (ветер, солнце, иные виды) возобновляемых источников энергии (ВИЭ), эволюцией и падением стоимости технологий и оборудования, в частности литий-ионных батарей. Основная причина роста – масштабное развитие ВИЭ и электротранспорта, напрямую или косвенно использующих накопители.

Несмотря на то что развитие ВИЭ в России даже в среднесрочной перспективе не станет настолько масштабным, чтобы создать серьезный спрос на СНЭ на основе ВИЭ, таковые будут востребованы в составе объектов распределенной энергетики, особенно в изолированных энергосистемах; для установки у потребителей с целью оптимизации затрат на энергоснабжение; для применения СНЭ как элемента электросетевой инфраструктуры с целью обеспечения надежности поставок электрической энергии и отсрочки инвестиций в модернизацию и новое сетевое строительство.

Анализ траекторий развития технологий позволяет сделать вывод, что технологиями, готовыми в ближайшее время к широкому применению, станут те, которые позволяют преобразовать или накопить электроэнергию, полученную путём применения ВИЭ или энергию, полученную путём генерации или рекуперации не израсходованной энергии.

Наиболее интересным решением с минимальным значением уровнем затрат на разработку и реализацию является использования наведенного напряжения контактной сети РЖД в момент следования электроподвижного состава. Использование такой энергии возможно для систем СНЭ или для устройств освещения или других систем обеспечения или поддержания функционирования инфраструктуры РЖД. Рассматриваемая ниже математическая модель, может использоваться для проверки возможности применения полученной наведённой электроэнергии для освещения пассажирских платформ.

Как известно из литературы [1] наведенное напряжение возникает на выведенной в ремонт и обесточенной воздушной линии электропередач, вследствие влияния на нее электромагнитного поля расположенной в непосредственной близости работающей электроустановки или другой линии электропередач, которая находится под напряжением.

Величина наведённого значения ЭДС на проводнике, подверженном влиянию наведенного поля определяется исходя из следующего выражения:

$$E = M \cdot L \cdot I, \quad (1)$$

где: M – коэффициент индуктивного влияния (определяется по справочным материалам); L – длина, при которой проводники расположены параллельно; I – максимально возможный ток протекающей во влияющем проводнике или электроустановки.

Также можно рассчитать разность потенциалов между проводником, наводящим напряжения относительно земли. В формуле (2) применяется уже полученное значение ЭДС рассчитанное по формуле (1):

$$U = \frac{E}{2} + E \cdot \frac{x}{l}, \quad (2)$$

где: U – разность потенциалов; E – значение ЭДС; x – расстояние от точки расположения провода до «земли»; l – длина, на которой проводники расположены параллельно.

Передача энергии осуществляется посредством процесса, известного как взаимная индукция. Если представить, что проводник с током расположен параллельно проводнику контактной сети, то значение наведённого напряжения, определённого по формуле (1), можно будет использовать для последующей трансформации.

Если отказаться от замкнутого магнитопровода, то электродинамическое индукционное взаимодействие двух обмоток сохранится. При этом КПД передачи энергии от первичной обмотки ко вторичной будет ниже. Уменьшение КПД не критично, так как количество получаемой и накапливаемой энергии будет достаточным для решения поставленных задач освещения.

Бесконтактная передача энергии через воздушный трансформатор имеет ряд преимуществ по сравнению с проводной передачей электроэнергии. Во-первых, она исключает необходимость наличия сердечника, что упрощает систему передачи и уменьшает риск повреждений и потери энергии на протяжении пути передачи. Во-вторых, она позволяет передавать энергию на большие расстояния без необходимости в промежуточных станциях или повышения напряжения для снижения потерь. В-третьих, она не требует прямого физического контакта с передающей и принимающей сторонами, что делает ее более безопасной и эффективной для передачи энергии на большие высоты или в другие труднодоступные места.

Обычно воздушные трансформаторы используются для преобразования напряжения или для изоляции цепей. Значительное расстояние между обмотками и использование межобмоточных изоляторов помогают предотвратить пробой между обмотками воздушного

трансформатора. Это особенно важно при работе на высоких уровнях напряжения, чтобы избежать попадания электрического разряда от первичной к вторичной обмотке или наоборот, что может привести к повреждению трансформатора.

Модель воздушного трансформатора может быть представлена уравнениями (3, 4), представленными ниже:

$$V_1 = -L_1 * \frac{dI_1}{dt}; \quad (3)$$

$$V_2 = -L_2 * \frac{dI_2}{dt}, \quad (4)$$

где: V_1 и V_2 — напряжения на первичной и вторичной обмотках соответственно, I_1 и I_2 — токи в первичной и вторичной обмотках соответственно, L_1 и L_2 — индуктивности первичной и вторичной обмоток.

Модель источника и нагрузки. Связь между передающей и получающей сторонами: отношение напряжений и токов между первичной и вторичной обмотками через коэффициент взаимной индукции k :

$$V_{\text{нагр}} = k * V_{\text{ист}}; \quad (5)$$

$$I_{\text{нагр}} = \frac{1}{k * I_{\text{ист}}}. \quad (6)$$

Учет потерь. В реальных системах бесконтактной передачи энергии могут возникать потери, например, из-за сопротивления проводников, эффектов рассеяния и других факторов. Потери могут быть учтены в виде мощности потерь.

Эффективность передачи энергии может быть оценена как отношение мощности на нагрузке к мощности источника, учитывая потери:

$$\eta = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{\text{ист}}}. \quad (7)$$

Это общая структура математической модели для бесконтактной передачи энергии методом наведенного напряжения с использованием воздушного трансформатора. Реальные модели могут быть более сложными и учитывать дополнительные параметры, такие как расстояние между обмотками, частота переменного тока и другие факторы.

Одним из основных уравнений, описывающих взаимную индукцию воздушного трансформатора, является формула Лоренца:

$$e_2 = -n_2 * \frac{d\phi_1}{dt}, \quad (8)$$

где: e_2 — ЭДС, индуцированная во вторичной обмотке, n_2 — число витков во вторичной обмотке, ϕ_1 — магнитный поток, создаваемый током в первичной обмотке, t — время.

Также можно использовать формулу (9) для расчета взаимной индукции:

$$M = k\sqrt{L_1 I_2}, \quad (9)$$

где: M — взаимная индукция между обмотками, k — коэффициент связи между обмотками (от 0 до 1), L_1 и L_2 — индуктивности первичной и вторичной обмоток соответственно.

Коэффициент связи k может быть рассчитан по формуле:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 I_2}}. \quad (10)$$

Взаимная индукция между первичной и вторичной обмотками воздушного трансформатора влияет на передачу энергии от первичной к вторичной обмотке и определяет эффективность работы трансформатора.

В основе разрабатываемой модели лежит закон Био-Савара-Лапласа, который описывает магнитное поле, создаваемое током, и гласит, что интенсивность магнитного поля, создаваемого прямолинейным проводником с постоянным током, прямо пропорциональна силе тока и обратно пропорциональна расстоянию до проводника [3].

Математически закон Био-Савара-Лапласа может быть записан следующим образом:

где: dB — интенсивность магнитного поля, I — сила тока, dl — элемент длины проводника, r — расстояние от элемента длины до точки, в которой измеряется интенсивность магнитного поля, θ — угол между элементом длины и линией, соединяющей элемент длины и точку, в которой измеряется интенсивность магнитного поля, μ_0 — магнитная постоянная.

Величину ЭДС одного витка можно рассчитать по выражению (9) и выбрать полное поперечное сечение проводника (10).

$$E'_B = 4,44 f B_{\max} Q_{cm}$$

где: f — частота сети, Гц, $B_{\max}$ — предварительное значение магнитной индукции в стержне, Тл, Q_{cm} — полное поперечное сечение стержня, м².

Q_{cm} определяется по формуле (13):

$$Q_{cm} = \frac{Q_{cm, \text{расч}}}{k_{cm}}$$

После того, как были определены основные соотношения, проводилось математическое моделирование в среде MatLab Simulink. Результаты моделирования наведённого напряжения на вторичной обмотке трансформатора представлены на рисунке 1.

Математическое моделирование процесса передачи энергии в контактной сети может быть основано на уравнениях электромагнитной теории. Одной из основных моделей является модель передачи электрической энергии в линии передачи. Эта модель учитывает

электрические параметры сети, такие как сопротивление проводов, индуктивность и ёмкость. Она также учитывает динамические эффекты, такие как электромагнитные поля и изменение напряжения и тока во времени.

Система дифференциальных уравнений [4], описывающая изменение напряжения и тока во времени, может быть записана следующим образом:

$$\frac{dV}{dt} = -\left(\frac{1}{C}\right) * I ; \quad (14)$$

$$\frac{dI}{dt} = \left(\frac{1}{L}\right) * V - \left(\frac{R}{L}\right) * I, \quad (15)$$

где: V — напряжение в цепи (Вольты), I — ток в цепи (Амперы), t — время (секунды), C — ёмкость (Фарады), L — индуктивность (Генри) и R — сопротивление (Омы).

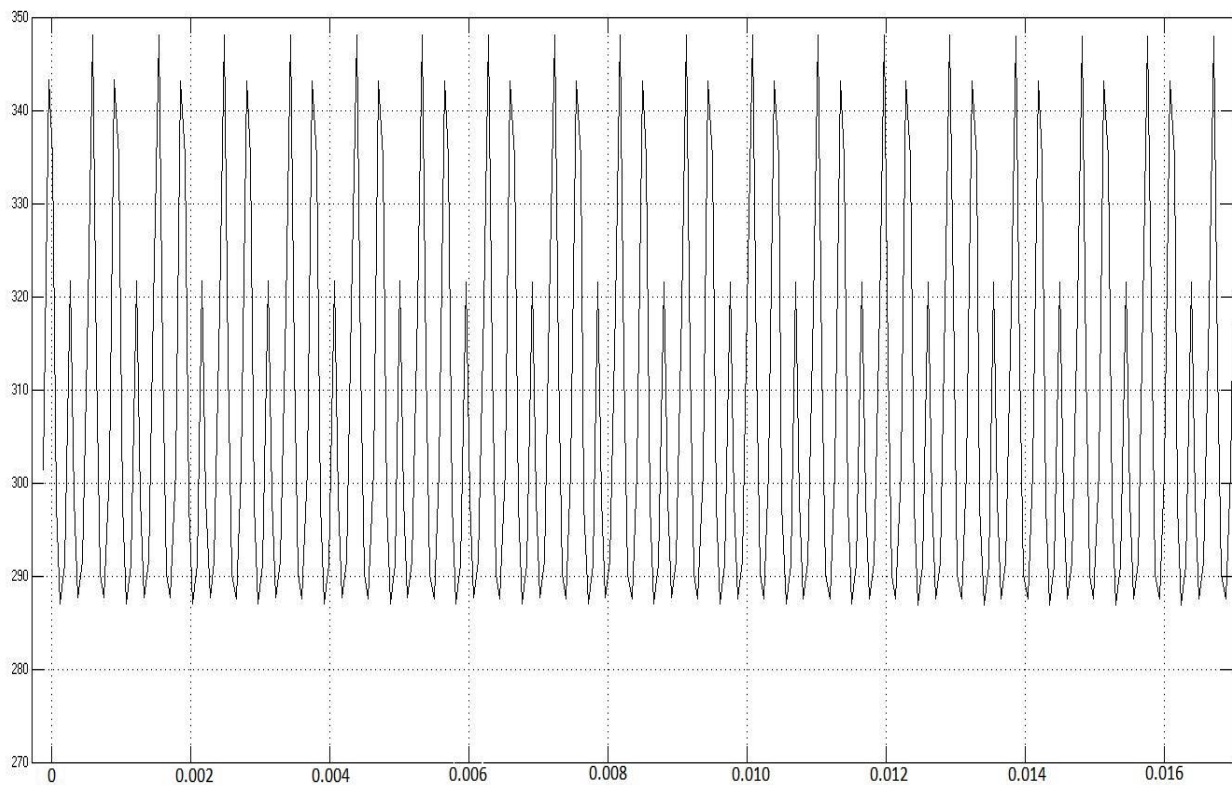


Рис. 1. Результаты моделирования наведённого напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

На рисунке 2 представлено напряжение на выходе трансформатора после выпрямления и последующего сглаживания. Полученное выпрямленное напряжение можно использовать для подключения различного рода преобразователей.

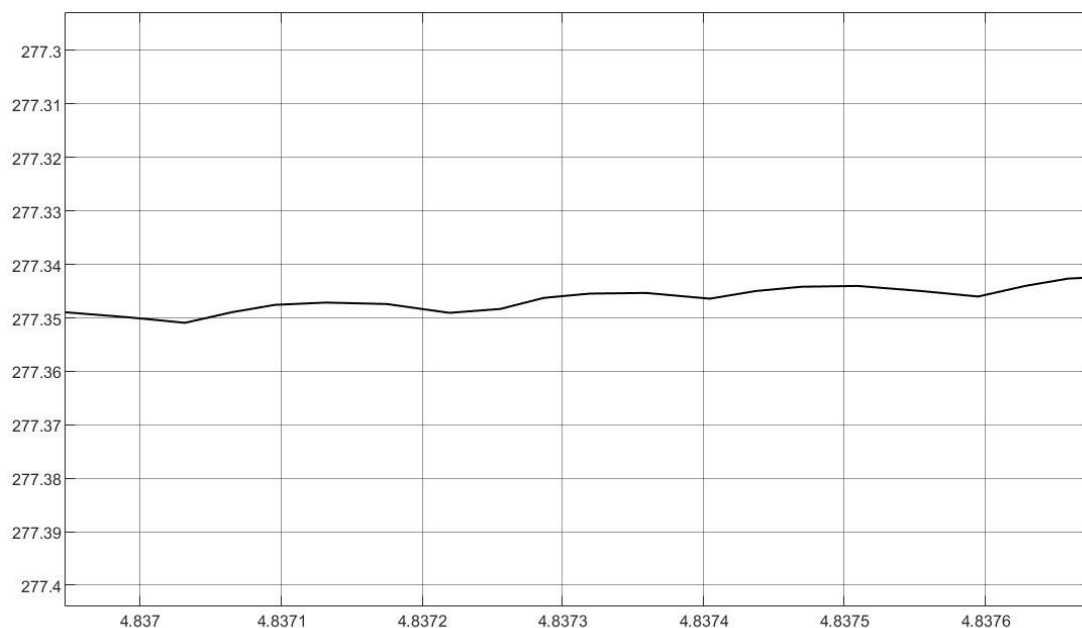


Рис. 2. Результаты моделирования выпрямленного и сглаженного напряжения.

Таким образом бесконтактная передача энергии имеет свои ограничения и потери. Энергия, передаваемая через воздух, может испытывать потери из-за различных факторов, включая дальность передачи, электромагнитные помехи и ограничения мощности передачи. Потери энергии также могут возникать из-за несовершенства самого трансформатора, включая контактные потери и тепловые потери. Более того, бесконтактная передача энергии может быть более дорогостоящей по сравнению с проводной передачей электроэнергии, особенно при больших масштабах и необходимости в специальном оборудовании.

Использование моделей передачи электрической энергии позволяет эффективно планировать и управлять энергетическими системами, обеспечивая надежную и стабильную передачу электрической энергии от источника к потребителю.

Проведенное моделирование позволило выделить несколько ключевых моментов.

Во-первых, методика моделирования позволяет оценить эффективность и надежность бесконтактной передачи энергии. Она основывается на определении оптимальных параметров системы и других аспектов необходимых для учета погрешностей при расчете математической модели такого способа передачи энергии

Во-вторых, проведенные исследования показывают, что бесконтактная передача при использовании воздушного трансформатора эффективна, несмотря на то, что КПД подобной системы не превышает 80%. Тем не менее этот недостаток окупается за счёт количества получаемой и накапливаемой энергии, которой достаточно для решения поставленных задач освещения.

В-третьих, исследования указывают на возможность применения, а также разработки новых, более эффективных технологий. Это может привести к созданию экологически чистых и устойчивых систем передачи энергии, которые смогут удовлетворить потребности современного общества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротеев В. И., Рыжков В. М. Инженерные основы электротехники: учебно-методическое пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2020. – 256 с.
2. Юдаев И. В. История развития электроэнергетики, электротехнологий и электрооборудования: учебник. – Самара: СамГАУ, 2021. – 462 с.
3. Федин В. Т. Инновационные технические решения в системах передачи электроэнергии: монография. – Минск: БНТУ, 2012. – 222 с.
4. Лозовский В. Н. Курс физики: учебник: в 2 т.: т. 1. – 6-е изд., испр. и доп. – СПб.: Лань, 2022. – 576 с.