

## **СЕКЦИЯ 3**

### **«СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ»**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ЗАМЕНЫ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ НА GOOSE-СООБЩЕНИЯ В АЛГОРИТМАХ РЗиА 6(10) кВ</b> Акпаев Н.А., магистрант группы 3-23ЭЭ(м)АЭСК, Валиуллин К.Р., канд. техн. наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург .....	4
<b>ВОДОРОДНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ: ПРИНЦИП РАБОТЫ, ПРЕИМУЩЕСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ</b> Петровская Т.А., Андреев Р.Е., Учреждение образования «Национальный детский технопарк», г. Минск .....	12
<b>ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ ОПЕРАТОРУ В СИСТЕМАХ ДИСПЕТЧЕРСКОГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ</b> Ахремчик П.О., Ахремчик О.Л., Тверской государственный технический университет, г. Тверь .....	17
<b>ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ КОМПЬЮТЕРНАЯ И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ</b> Греков Э.Л., канд. техн. наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург .....	20
<b>АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ В ИЗОЛИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ</b> Ермолаев А.В., студент магистратуры, Толстухина Е.А., студент магистратуры, Соловьева А.С., старший преподаватель, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет», г. Киров .....	26
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЛЭП</b> Ермолаев А.В., студент магистратуры, Соловьева А.С., старший преподаватель, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет», г. Киров .....	29
<b>СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПОДГОТОВКЕ ВЫСОКОКВАЛИФИЦИРОВАННЫХ КАДРОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ</b> Митрофанов С.В., канд. техн. наук, доцент, Морозов В.А., доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург.....	33
<b>РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТ ПАРОВЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ</b> Соколов В.Ю., канд. техн. наук, доцент, Нечетов И.В., студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение	

высшего образования «Оренбургский государственный университет», г  
Оренбург..... 39

**ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ  
НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ЭКСПЕРТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ** Семенова Н.Г.,  
доктор пед. наук, канд. техн. наук, профессор, Полянских А.А., студент  
магистратуры, Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Оренбургский государственный  
университет», г. Оренбург..... 44

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТАВА  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ЕГО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ** Влацкая  
Л.А., канд. техн. наук, доцент, Туктамышев Р.И. студент магистратуры,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Оренбургский государственный университет», Оренбург ..... 50

**МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОРНЫЙ МОДУЛЬ СРЕДСТВ  
КОНТРОЛЯ РАДИАЦИОННЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
РЕНТГЕНОДИАГНОСТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ** Е.А. Корнев, канд. физ.-  
мат. наук, доцент, А.С. Лелюхин, д.-р техн. наук, доцент, С.С. Фролов, канд.  
техн. наук, Д.А. Муслимов, канд. техн. наук, Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский  
государственный университет» ..... 54

**ТЕСТОВЫЕ СИГНАЛЫ С ЛИНЕЙНО МЕНЯЮЩИМИСЯ  
ЛОГАРИФМИЧЕСКИМИ СПЕКТРАМИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ** Фролов С.С., канд. техн.  
наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Оренбургский государственный университет» ..... 59

**ПРИМЕРЫ ПОСЛЕДСТВИЙ ОТСУТСТВИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ И  
ЗАНУЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В ОРЕНБУРГСКОЙ  
ОБЛАСТИ** Ямансарин Ильдар Ильдусович, к.т.н., доцент, Федеральное  
государственное образовательное учреждение высшего образования  
«Оренбургский государственный университет», г. Оренбург ..... 63

# **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ЗАМЕНЫ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ НА GOOSE-СООБЩЕНИЯ В АЛГОРИТМАХ РЗА 6(10) кВ**

**Акпаев Н.А., магистрант группы 3-23ЭЭ(м)АЭСК, Валиуллин К.Р., канд.  
техн. наук, доцент,**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Оренбургский государственный университет», г.  
Оренбург**

Основная концепция цифровых подстанций (ЦПС) заключается в обеспечении взаимодействия между интеллектуальными электронными устройствами (ИЭУ) и автоматизированными системами разных уровней через стандартизированные протоколы передачи данных. Основные принципы информационного обмена на таких подстанциях регламентируются стандартами серии МЭК 61850.

В стандарте МЭК 61850 определены три ключевых протокола передачи данных:

**МЭК 61850–8-1 MMS (ISO/IEC 9506):** Этот протокол предназначен для передачи данных в реальном времени и команд диспетчерского управления по принципу "клиент-сервер". Он используется для передачи телеметрической информации и управляющих команд.

**МЭК 61850–8-1 GOOSE:** Данный протокол обеспечивает передачу сигналов о тех или иных событиях на подстанции. Он заменяет аналоговые дискретные сигналы, передаваемые между ИЭУ на цифровые.

**МЭК 61850–9-2 SV:** Этот протокол описывает правила передачи оцифрованных значений токов и напряжений от измерительных трансформаторов. Благодаря ему можно отказаться от использования цепей переменного тока, связывающих устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) с трансформаторами тока и напряжения, и передавать данные по цифровому каналу связи.

Эти стандарты позволяют обеспечить эффективную работу и взаимодействие всех компонентов цифровой подстанции.

Выделяют три основных архитектуры ЦПС.

Первая архитектура подразумевает обмен информацией между устройствами в форме дискретных и аналоговых электрических сигналов. Информационный обмен с верхним уровнем осуществляется по протоколу МЭК 61850–8-1 MMS. [1]

Вторая архитектура обладает более расширенным применением цифровых протоколов. Взаимодействие между устройствами выполняется объектно-ориентированными GOOSE-сообщениями; информационный обмен с верхним уровнем осуществляется по протоколу МЭК 61850–8-1 MMS; измерения тока и напряжения передаются в виде аналоговых сигналов по обычным электрическим цепям. [1]

Третья архитектура подразумевает глубокую интеграцию информационных процессов на всех уровнях ЦПС. Взаимодействие между интеллектуальными электронными устройствами РЗА выполняется посредством

GOOSE-сообщений; информация от измерительных устройств передается в цифровом виде с применением протокола передачи мгновенных значений (SV-потоков); информационный обмен с верхним уровнем осуществляется по протоколу МЭК 61850–8-1 MMS[1].

Преимуществами 2 архитектуры ЦПС является то, что она предполагает большее применение цифровых технологий для взаимодействия между устройствами, что делает систему более современной и гибкой.

Вторая архитектура предполагает большее применение цифровых технологий для взаимодействия между устройствами, что делает систему более современной и гибкой. Использование объектно-ориентированных GOOSE-сообщений улучшает взаимодействие между устройствами, обеспечивая быструю и надежную передачу данных, а поддержка протокола МЭК 61850–8-1 MMS гарантирует совместимость с другими уровнями управления и обеспечивает эффективный обмен данными с верхними уровнями. Более подробно преимущества второй архитектуры ЦПС рассмотрены в статье [2].

GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) - это стандартный протокол для передачи сообщений в системах релейной защиты и автоматики подстанций.

Достоинства протокола GOOSE:

- Высокая скорость передачи: GOOSE обеспечивает быструю передачу сообщений между устройствами, что важно для систем релейной защиты и автоматики, где время реакции является критически важным.
- Простота реализации: протокол GOOSE относительно прост в реализации, что упрощает разработку алгоритмов защиты.
- Низкие требования к сети: GOOSE использует широковещательную передачу, что позволяет устройствам обмениваться сообщениями без необходимости настроить маршрутизацию или адресную инфраструктуру и прокладки отдельного провода к каждому устройству;
- Отказоустойчивость: GOOSE использует механизм самообнаружения ошибок, что обеспечивает высокую надёжность и отказоустойчивость системы;
- Поддержка стандарта МЭК 61850: GOOSE является частью стандарта МЭК 61850, что обеспечивает совместимость между устройствами разных производителей;
- Установка и прокладка кабелей требуют меньшего времени, ресурсов и финансовых затрат.

Таким образом, вторая архитектура ЦПС действительно предлагает значительные преимущества, особенно связанные с использованием современных цифровых протоколов и улучшением взаимодействия между устройствами.

Сигнал в релейной защите (РЗ) — это управляющее воздействие, вырабатываемое в результате обработки информации о состоянии электрической системы. [3]

Некоторые виды сигналов в РЗ:

— Аналоговые сигналы. Характеризуют контролируемые величины ЭС (токи, напряжения и зависящие от них величины) в месте установки защиты и в других местах электрической системы, например, на другом конце линии.

— Входная дискретная (бинарная) информация (0/1), в том числе сигналы от коммутационных аппаратов, других устройств РЗ и от обслуживающего персонала.

— Цифровая информация от других устройств РЗ, характеризующая как текущие значения переменного тока, так и логические сигналы, получаемые посредством цифровых коммуникационных интерфейсов. [3]

Для создания алгоритма работы защит с использованием GOOSE-сообщений необходимо определить сигналы, которые возможно передать с использованием протокола GOOSE, и описать логику обработки этих сообщений. В таблице 1 указаны основные сигналы на отходящей линии 6(10) кВ и те сигналы, которые могут быть заменены на GOOSE-сообщения. Эти сигналы будут переданы по локальной сети вместо традиционных контрольных кабелей.

В таблице 1 столбец «Сигнал» содержит название конкретного сигнала, который передается между различными устройствами в системе защиты и управления электроэнергетической установкой. Сигналы могут быть командными (например, включение или отключение выключателя), информационными (состояние выключателя) или аварийными (срабатывание защиты).

Во втором столбце указывается источник сигнала, то есть устройство или компонент системы, которое генерирует данный сигнал. Источником может быть ключ управления, терминал защиты, АСУ (автоматизированная система управления) и так далее.

В третьем столбце указывается приемник сигнала, то есть устройство или компонент системы, которому этот сигнал предназначен. Приемниками могут быть терминалы защиты, выключатели, лампы сигнализации и другие элементы системы.

Столбец «Возможность в замене» указывает, возможна ли замена традиционного способа передачи данного сигнала (через контрольные кабели) на цифровую передачу посредством GOOSE-сообщений. Если замена возможна, указывается "GOOSE-сообщения". Если нет, указывается "Нет".

Столбец «Описание» содержит краткое пояснение того, какой именно процесс или событие инициируется данным сигналом. Например, включение или отключение выключателя, срабатывание защиты, передача команд управления и так далее.

Таблица 1 – Основные сигналы в ячейки КРУ-6(10)кВ

Сигнал	Откуда	Куда	Возможность замены	Описание
1	3	4	5	6
Вкл. от ключа	Ключ управления	Терминал Л	Включение выключателя терминала с	Включение выключателя
Откл. от ключа	Ключ управления	Терминал Л	Отключение выключателя терминала с	Отключение выключателя

Вкл. от ТУ	АСУ	Терминал Л	GOOSE-сообщения	Включение выключателя
Откл. от ТУ	АСУ	Терминал Л	GOOSE-сообщения	Отключение выключателя
Датчик ДГЗ	Устройство ДЗ	Терминал Л	GOOSE-сообщения	Срабатывание дуговой защиты
Клапан ДГЗ	Клапан ДГЗ	Терминал Л	Нет	Срабатывание клапана ДГЗ
Включен выключатель	Выключатель	Терминал Л	Нет	Положение выключателя
Отключен выключатель	Выключатель	Терминал Л	Нет	Положение выключателя
Ав. ЦУ отключен	Ав. ЦУ	Терминал Л	Нет	Отключен АВ цепей управления
Ключ АПВ/ввод	Ключ АПВ	Терминал Л	Ввод АПВ с дисплея	Ввод АПВ
Ключ АПВ/вывод	Ключ АПВ	Терминал Л	Вывод АПВ с дисплея	Вывод АПВ
Срабатывание АЧР	Терминал ТН	Терминал Л	GOOSE-сообщения	Срабатывание АЧР
Команда отключить	Терминал Л	Выключатель	Нет	Отключение выключателя
УРОВ ВВ	Терминал Л	Терминал ВВ	GOOSE-сообщения	Срабатывание УРОВ
УРОВ СВ	Терминал Л	Терминал СВ	GOOSE-сообщения	Срабатывание УРОВ
Блокировка ЛЗШ	Терминал Л	Терминал ВВ	GOOSE-сообщения	Блокировка ЛЗШ
ЛЗЛ	Терминал ПЛ	Терминал Л	GOOSE-сообщения	Срабатывание ЛЗЛ
Аварийное отключение	Терминал Л	Терминал ЦС	GOOSE-сообщения	Сигнализация «Аварийное отключение»
Вызов	Терминал Л	Лампа «Вызов»	Нет	Сигнализация «Вызов»

Рассмотрим пример передачи сигналов контрольным кабелем на примере работы ЛЗШ(Логической защиты шин).

На рисунке 1 показана логическая схема работы ЛЗШ.

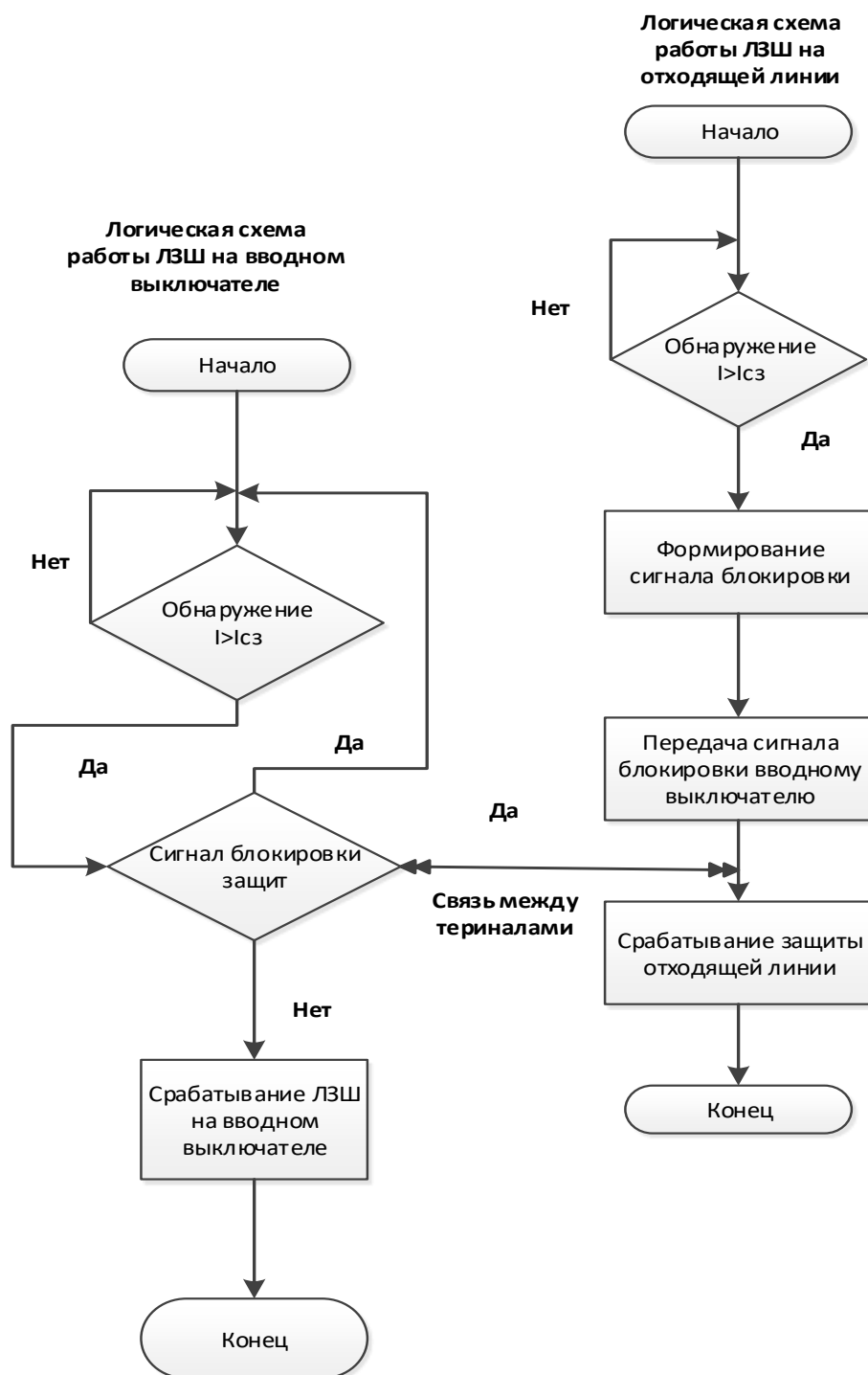


Рисунок 1 – Логическая схема работы ЛЗШ

Контрольный кабель передает сигнал напрямую между устройствами, что исключает необходимость в передаче данных по сети. Рассмотрим более подробно отдельные операции алгоритма функционирования ЛЗШ:

#### 1. Обнаружение неисправности.

Один из терминалов, контролирующих состояние отходящей линии фиксирует возникновение аварийного режима (например по величине протекающего по линии тока: ток превышает уставку). По внутренней логике работы терминал принимает решение о необходимости блокировки ЛЗШ.

#### 2. Формирование сигнала блокировки.



После обнаружения неисправности терминал формирует электрический сигнал блокировки ЛЗШ. Этот сигнал передается по контрольному кабелю непосредственно на другие терминалы, участвующие в защите шин.

### 3. Передача сигнала блокировки.

Сигнал блокировки передается по контрольному кабелю ко всем терминалам, связанным с данной линией или шиной. В случае использования аналогового сигнала контрольный кабель физически соединяет устройства, нет необходимости в использовании сетевого протокола для передачи данных. В этом случае формируется общая шина блокировки ЛЗШ, на которую отправляется информация со всех отходящих линий и эта информация поступает на соответствующий дискретный вход терминала ВВ и СВ.

### 4. Прием и обработка сигнала блокировки:

Терминалы вводного и секционного выключателей при получении сигнала блокировки ЛЗШ блокируют действие соответствующей защиты.

Рассмотрим алгоритма работы ЛЗШ для КРУ 6(10)кВ с учетом замены дискретного сигнала блокировки на GOOSE-сообщения:

#### 1. Обнаружение неисправности:

- на одном из терминалов, контролирующих состояние линии или другого элемента энергосистемы, происходит обнаружение неисправности (например, короткое замыкание).

- терминал анализирует параметры неисправности и принимает решение о необходимости активации блокировки ЛЗШ.

#### 2. Формирование GOOSE-сообщения:

- после обнаружения неисправности терминал формирует GOOSE-сообщение, содержащее информацию о блокировке ЛЗШ.

- сообщение содержит уникальный идентификатор, указывающий на тип неисправности и место её возникновения. Этот сигнал передается по внутриобъектовой локальной вычислительной сети (ЛВС) Ethernet. непосредственно на другие терминалы, участвующие в защите шин.

#### 3. Передача GOOSE-сообщения:

- GOOSE-сообщение отправляется по ЛВС всем другим терминалам, участвующим в защите шин.

- передача осуществляется с использованием широковещательной рассылки, чтобы гарантировать доставку сообщения всем заинтересованным сторонам.

#### 4. Приём и обработка GOOSE-сообщения:

- все терминалы, получившие сообщение, проверяют его целостность и аутентичность.

- если сообщение корректно, каждый терминал выполняет соответствующие действия в зависимости от своей роли и конфигурации.

Как видно из описания алгоритма, затрагивается процесс передачи информации между терминалами РЗА, при этом основной алгоритм работы защиты остается неизменным.

Этот алгоритм описывает последовательность действий и сообщений, которые будут передаваться между различными компонентами КРУ 6(10)кВ с

использованием GOOSE-сообщений там, где это возможно. Сигналы, которые невозможно заменить на GOOSE-сообщения, остаются в виде традиционных контрольных кабелей.

При сравнении двух алгоритмов можно сделать следующие выводы:

Контрольный кабель обеспечивает прямую передачу электрических сигналов между устройствами без использования сетевых протоколов. Такой подход позволяет быстро передавать сигналы блокировки при обнаружении неисправности, исключая задержки, связанные с обработкой данных в сети. Высокая начальная стоимость прокладки кабельной инфраструктуры может потребовать значительных начальных инвестиций, особенно если проект охватывает большие расстояния или сложные топологии.

Применение GOOSE-сообщений:

Требует использования стандартной сети Ethernet и протоколов IEC 61850 для передачи сообщений о блокировках. GOOSE-сообщения обеспечивают быструю и надежную передачу информации между устройствами, позволяя эффективно реагировать на аварии и сбои. Преимущество данного подхода заключается в возможности масштабируемости системы и гибкости управления потоками данных.

Сравнение подходов:

Использование контрольного кабеля может быть более надежным в условиях высокой электромагнитной обстановки, так как прямой физический контакт уменьшает вероятность помех.

Применение GOOSE-сообщений упрощает интеграцию различных устройств и систем, но требует наличия надежной и защищенной сети связи.

Роль операторов и технического персонала:

Независимо от выбранного способа передачи сигналов, оператор должен своевременно получать уведомления об авариях и принимать меры по их устранению.

Снятие блокировки и возврат к нормальной работе требуют координации действий между автоматическими системами и персоналом.

Таким образом, выбор между двумя методами зависит от конкретных условий эксплуатации и требований к системе защиты.

## Список литературы

1. Прокопьев В.В. Проектирование сети ЦПС на примере ПС 110 кВ «Медведевская» / В.В. Прокопьев, Р.И. Федоров // Релейная защита и автоматизация. – 2018.

2. Тихомирова А. А. Электроэнергетика, электротехника и информационные технологии : материалы Всероссийской научно-технической конференции (30—31 мая 2024 г., Петрозаводск) / под общ. ред. А. А. Тихомирова ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования Петрозав. гос.ун-т. — Петрозаводск : Издательство ПетрГУ, 2024 — 1 CD-ROM. — Систем. требования : PC, MAC с процессором Intel 1,3 ГГц и выше ; Microsoft Windows, MacOS X ;

256 Мб (RAM); Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

3. Козлов А.Н. Микропроцессорные средства управления в электроэнергетике. Часть 1. Построение основных функций цифровых релейных защит: учебное пособие / сост. А.Н. Козлов. — Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2017. — 54 с

4. Егоров Е.П. Методы и средства наладки оборудования для цифровой подстанции / Е.П. Егоров и др. // Сборник научных трудов НПП «ЭКРА». — 2018. — С. 42-50.

# **ВОДОРОДНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ: ПРИНЦИП РАБОТЫ, ПРЕИМУЩЕСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ**

**Петровская Т.А., Андреев Р.Е.,**

**Учреждение образования «Национальный детский технопарк», г. Минск**

*Аннотация:* В данной статье проводится детальный сравнительный анализ современных типов топливных элементов (ТЭ), рассматриваются их ключевые характеристики, преимущества и ограничения. Основное внимание уделяется наиболее перспективным технологиям: протонообменным мембранным (PEM), твердооксидным (SOFC), щелочным (AFC), прямым метанольным (DMFC) и топливным элементам на расплавах карбонатов (MCFC).

*Ключевые слова:* водород, водородные топливные элементы, декарбонизация, ТЭ.

## **Введение**

Современная энергетика стоит на пороге масштабных изменений, связанных с поиском альтернатив традиционным ископаемым видам топлива. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области являются топливные элементы (ТЭ) — устройства, преобразующие химическую энергию топлива непосредственно в электричество с высоким КПД и минимальным воздействием на окружающую среду. В отличие от двигателей внутреннего сгорания, в которых энергия выделяется в процессе горения, сопровождающегося вредными выбросами, топливные элементы производят электричество за счет электрохимических реакций, а их единственным продуктом в случае использования чистого водорода становится вода. Топливные элементы могут помочь в декарбонизации современной, а также создании новой безуглеродной энергетики

Хотя все топливные элементы работают по схожему принципу, их эксплуатационные параметры существенно различаются, что предопределяет области эффективного использования. Яркий пример - протонообменные мембранные модели (PEM), чьи преимущества в виде мгновенного старта и малых габаритов сделали их идеальным решением для транспортных средств. Совершенно иная ситуация с твердооксидными системами (SOFC) - их выдающаяся энергоэффективность нашла применение в стационарных энергокомплексах. Что касается щелочных элементов (AFC), то их высокая производительность омрачается требованием к чистоте окислителя, сужающим сферу применения до космических программ. Такое технологическое разнообразие делает крайне актуальным проведение детального сопоставительного исследования, которое поможет выявить конкурентные

преимущества каждой технологии и наметить пути их оптимального использования в различных отраслях промышленности.

Цель данной статьи — систематизировать знания о современных типах топливных элементов, провести их всестороннее сравнение по ключевым параметрам (КПД, рабочие температуры, стоимость, долговечность) и оценить потенциал их внедрения в различных отраслях. Особое внимание будет уделено технологическим вызовам, таким как необходимость снижения стоимости катализаторов или повышения срока службы элементов, а также инновационным подходам к их решению. Результаты такого анализа могут быть полезны как исследователям, работающим в области водородной энергетики, так и инженерам, занимающимся разработкой энергоустановок нового поколения.

Проведем сравнительный анализ разных типов топливных элементов (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнительная характеристика топливных элементов

Тип ТЭ	Рабочая температура	КПД (%)	Топливо	Катализатор	Преимущества	Недостатки	Применение
МОПТЭ	60-80°C	40-60	H <sub>2</sub>	Pt	Быстрый запуск, компактность	Чувствительность к СО, высокая стоимость	Транспорт, портативные устройства
ЩТЭ	65-220°C	60-70	H <sub>2</sub>	Ni, Ag	Высокий КПД, дешевые катализаторы	Чувствительность к СО <sub>2</sub>	Космос, подводные аппараты
РКТЭ	600-700°C	60-65	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , биогаз	Ni	Гибкость по топливу, когенерация	Долгий запуск, коррозия	Промышленные установки
ФКТЭ	150-220°C	40-85	H <sub>2</sub> , риформированный газ	Pt	Стабильность, устойчивость к СО	Низкая удельная мощность	Стационарная энергетика
ТОТЭ	600-1000°C	60-70	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , угольный газ	Керамика	Высокий КПД, топливная гибкость	Долгий прогрев, хрупкость	Крупные электростанции
ПЭТЭ	60-100°C	40-60	H <sub>2</sub>	Pt	Компактность, быстрый отклик	Требуют увлажнения	Портативные устройства
ПОМТЭ	60-90°C	30-40	CH <sub>3</sub> OH	Pt-Ru	Простота заправки	Низкий КПД, СО <sub>2</sub> выделение	Электроника, мобильные устройства

ТПТЭ	60-80°C	40-60	H <sub>2</sub>	Pt	Высокая мощность, экологичность	Высокая стоимость	Транспорт, резервное питание
------	---------	-------	----------------	----	---------------------------------------	----------------------	------------------------------------

Проведя сравнительный анализ рассмотрим наиболее перспективные виды топливных элементов, а также их применение.

Современный рынок топливных элементов представлен тремя наиболее перспективными технологиями, каждая из которых занимает свою стратегическую нишу в энергетическом секторе. Топливные элементы с полимерным электролитом (ТПТЭ/МОПТЭ) прочно утвердились как оптимальное решение для транспортного сектора благодаря уникальному сочетанию эксплуатационных характеристик. Их ключевое преимущество - способность к практически мгновенному запуску (менее 1 минуты), что кардинально отличает их от высокотемпературных аналогов, требующих часов для выхода на рабочий режим. Компактные размеры и высокая удельная мощность (до 1 кВт/кг) позволяют эффективно интегрировать эти системы в транспортные средства, сохраняя при этом приемлемый КПД на уровне 40-60% и полное отсутствие вредных выбросов. Технологическая зрелость ТПТЭ подтверждается их серийным производством такими лидерами отрасли как Ballard, Toyota и Hyundai. Ярким примером успешного внедрения служат автобусы Mercedes-Benz Citaro FuelCell с запасом хода 350 км, доказавшие свою надежность в условиях интенсивной городской эксплуатации.

В стационарной энергетике безусловным лидером становятся твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), предлагающие беспрецедентные показатели эффективности. Их ключевое преимущество - рекордный КПД, достигающий 70% в электрохимическом режиме и возрастающий до 85% в гибридных схемах с газовыми турбинами. Важнейшей особенностью ТОТЭ является топливная универсальность - они способны работать на природном газе, биогазе и синтез-газе без необходимости сложной предварительной очистки. Долговечность этих систем, достигающая 40 000 часов работы, обусловлена отсутствием жидких компонентов в их конструкции. Практическим подтверждением эффективности ТОТЭ служат энергоустановки Bloom Energy мощностью 100-250 кВт, успешно обеспечивающие электроэнергией корпоративные объекты таких гигантов как Apple, eBay и Walmart.

Особую нишу в промышленном секторе занимают топливные элементы на расплаве карбонатов (РКТЭ), сочетающие энергетическую эффективность с экологической безопасностью. Их отличительная черта - способность к когенерации, одновременно производя электроэнергию (КПД 60%) и полезное тепло (25-30% энергии). Технология демонстрирует впечатляющую

экологическую совместимость за счет утилизации CO<sub>2</sub> непосредственно в рабочем цикле, а также экономическую эффективность, обеспечивая стоимость 1 кВт·ч на 30-40% ниже по сравнению с фосфорнокислыми аналогами. Реальным подтверждением работоспособности концепции служит электростанция FuelCell Energy в Калифорнии мощностью 2.8 МВт, работающая на биогазе с муниципальных очистных сооружений.

Несмотря на очевидные перспективы, каждая из технологий сталкивается с существенными барьерами на пути массового внедрения. Для ТПТЭ основными вызовами остаются высокая стоимость платиновых катализаторов (около \$50/кВт), недостаточно развитая водородная инфраструктура и ограниченный ресурс при работе в режиме переменных нагрузок. ТОТЭ требуют решения проблем термоциклической стойкости, сокращения времени запуска (сейчас составляющего 4-24 часа) и снижения капитальных затрат. РКТЭ нуждаются в повышении коррозионной стойкости компонентов, предотвращении деградации электролита и уменьшении чувствительности к примесям серы в топливе.

С точки зрения технологической готовности (TRL) ситуация выглядит неоднородной: ТПТЭ достигли максимального 9 уровня и представлены коммерческими продуктами, тогда как ТОТЭ (TRL 7-8) и РКТЭ (TRL 8) пока остаются на стадии демонстрационных установок и промышленных образцов. Рыночные перспективы технологий оцениваются экспертами как чрезвычайно благоприятные: к 2030 году ожидается рост рынка ТПТЭ для транспорта до \$28 млрд, стационарных ТОТЭ - до \$14 млрд, промышленных РКТЭ - до \$9 млрд. Для реализации этого потенциала необходимы скоординированные усилия по развитию производственных цепочек (особенно для редкоземельных металлов), созданию адекватной нормативной базы и масштабным инвестициям в НИОКР, направленным на снижение стоимости технологий на 30-50% к 2030 году. В совокупности эти три технологии образуют "золотой треугольник" водородной энергетики, взаимодополняя друг друга и охватывая все ключевые сектора современной экономики.

### Список литературы

1. Топливные (водородные) элементы/ячейки URL: [https://intech-gmbh.ru/energy\\_units/](https://intech-gmbh.ru/energy_units/) (дата обращения: 28.07.2025)
2. Топливные элементы. Устройство, виды, принцип действия топливных элементов. URL: [https://eti.su/articles/over/over\\_1544.html](https://eti.su/articles/over/over_1544.html) (дата обращения: 28.07.2025)
3. Козлов Сергей Иванович, Фатеев Владимир Николаевич Топливные элементы с твердым полимерным электролитом // Транспорт на альтернативном

топливе. 2016. №4 (52). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/toplivnye-elementy-s-tverdym-polimernym-elektrolitom> (дата обращения: 28.07.2025).

4. Кусамин А. А., Осмоловский С. А., Черкашин В. А., Феськова Е. В., Никифоров А. Г. ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ. УСТРОЙСТВО, ВИДЫ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ // Экономика и социум. 2022. №5-1 (96). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/toplivnye-elementy-ustroystvo-vidy-printsip-deystviya-toplivnyh-elementov> (дата обращения: 28.07.2025).



# **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ ОПЕРАТОРУ В СИСТЕМАХ ДИСПЕТЧЕРСКОГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

**Ахремчик П.О., Ахремчик О.Л.,**

**Тверской государственный технический университет, г. Тверь**

Аннотация: В данной статье выделяются функции составляющих системы диспетчерского контроля. Дается теоретико-множественное описание представления данных в системах. Отмечается возможность расчета и отображения интегральных показателей. Предлагается использовать комбинации визуальных, звуковых тональных и речевых сигналов для представления данных. Используемые для сообщений термины и аббревиатуры планируется выделять на основе графов знаний, определяющих модель деятельности оператора.

*Ключевые слова:* контроль, оборудование, режим, сообщение, оператор, система.

В настоящее время системы автоматизации объектов электроэнергетики обязательно включают в себя контуры контроля и управления, замыкаемые через человека-оператора (диспетчера). Представление данных о состоянии объекта осуществляется с помощью мнемосхем панелей оператора. Целью проведения исследований является увеличение быстродействия человеко-машинного взаимодействия. Объектами исследования авторов являются мнемосхемы систем диспетчерского контроля объектов электроэнергетики.

Программное обеспечение систем диспетчерского контроля и управления строится по технологии клиент-сервер с редуцированием операций обработки данных на стороне клиента. Формирование данных для визуализации обеспечивается программным обеспечением систем диспетчерского контроля (SCADA систем). За оператором закрепляются функции: наблюдения, изменения заданий; обращения к модулям архивации и обработки данных; пуска-останова (в том числе аварийного) оборудования для производства, преобразования и передачи электрической энергии. Определение заданий производится на основе решения комплекса задач, в который входит прогнозирование нагрузки оборудования и составление заявок генерирующей компании на выработку требуемой мощности на следующем временном интервале. Формирование заявок осуществляется с учетом опыта и оценки интегральных характеристик электроэнергетической системы в зоне ответственности оператора.

Программное обеспечение системы контроля реализует функции опроса измерительных преобразователей параметров оборудования; расчёта характеристик, отражающих состояние объекта контроля; отображения значений параметров; регистрации и хранения значений контролируемых и рассчитываемых параметров; формирования сигнализаций и блокировок; передачи данных.

Визуализация и отображение данных на мнемосхемах осуществляются на основе программной реализации алгоритма построения таблиц событий [1].

Подобная таблица представляет собой строки символов, имеющих разные цвета текста или фона для сообщений разного уровня важности (приоритета) (рисунок 1) [2]. Исторически подобные таблицы имели графическое отображение на диаграммной ленте самописцев систем контроля.

Теоретико-множественное описание представляемых в системе диспетчерского контроля данных о состоянии энергетического объекта:

$$\langle \{Fr_j\}; T_{\Delta 1}; S_{1зр} \text{AND} S_{1зв}; T_{\Delta 2}; S_{2зр} \text{AND} S_{2зв}; \dots; T_{\Delta i}; \dots; S_{iзр} \text{AND} S_{iзв} \rangle, \quad (1)$$

где  $\{Fr_j\}$  – множество фреймов интерфейса оператора,  $j = 1, 2, \dots$ ;  $T_{\Delta i}$  – время предъявления сообщения;  $S_{iзр}$ ,  $S_{iзв}$  – визуальный и акустический сигналы, передающие информацию об изменениях,  $i = 1, 2, \dots$

Фреймы могут быть видимые и скрытые. Скрытые фреймы появляются по запросу и по результату работы подпрограмм, называемых скриптами. Множество фреймов видимого поля мнемосхемы содержит: список объектов контроля; список сигналов; временную развертку напряжений; отображение диаграммы токов и напряжений; график изменения комплексного сопротивления выбранного участка системы электроснабжения; спектрограмму; таблицу событий; отчетные формы о количестве потребленной электрической энергии по заданным временным интервалам; отчет об аварийных событиях. Возможности компьютерных систем позволяют рассчитывать и отображать динамику интегральных показателей, например комплексного сопротивления электроэнергетической системы (рис. 2) [2].

N	Дата/Время	Имя	Содержание
460	11.10.2011 11:10:51.308	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
461	11.10.2011 11:10:51.310	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
462	11.10.2011 11:10:51.313	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
463	11.10.2011 11:10:51.314	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
464	11.10.2011 11:10:51.318	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
465	11.10.2011 11:10:51.320	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
466	11.10.2011 11:10:51.326	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
467	11.10.2011 11:10:51.411	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
468	11.10.2011 11:11:30.086	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
469	11.10.2011 11:11:30.482	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
470	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
471	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
472	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
473	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
474	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
475	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
476	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
477	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
478	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
479	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
480	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
481	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
482	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
483	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
484	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
485	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
486	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
487	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
488	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
489	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3
490	11.10.2011 11:12:40.762	SPNOV M 3	В-6 ТТОН ин 32 выключатель отключен, МБ3

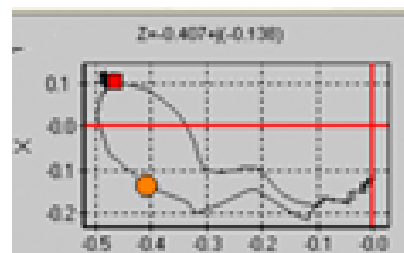


Рисунок 1 – Пример таблицы сообщений оператору

Рисунок 2 – Пример отображения комплексного показателя

Конъюнкция переменных  $S_{iзр}$  и  $S_{iзв}$  в (1) отражает особенность представления данных в виде образа, содержащего символическое сообщение и звуковой сигнал. Инновационность авторского подхода заключается в использовании для  $S_{iзв}$  звуковых тональных и речевых сигналов [3]. Тональные сигналы регламентируются нормативными требованиями к сигналам предупредительной и аварийной сигнализации. Речевые сигналы не определены стандартами и во многом определяются исходя из индивидуального опыта проектирования и эксплуатации систем автоматизации. Многоуровневость программного обеспечения и наличие продуктов разработки разных участников производственной деятельности не позволяют использовать единые словари. Существование отечественного стандарта, определяющего терминологию в сфере электроэнергетики, позволяет сформировать обязательное требование технического задания на разработку программного обеспечения. Сущность

требования заключается в том, что в технической документации и на мнемосхемах использовались термины, определённые нормативными документами. В настоящее время этого нет. Разработчики программного обеспечения пользуются своими словарями, содержащими большое количество аббревиатур, не имеющих повсеместного применения.

Построение и применение словарей для конкретных приложений предлагается производить на основе графов знаний, вершинам которых сопоставляются термины, используемые в интерфейсах, а дугам - отношения, определяющие контекст сообщения. Подобные графы отражают модели деятельности оператора в зависимости от режима работы электроэнергетического оборудования.

Таким образом, при представлении данных оператору в системах диспетчерского контроля электроэнергетического оборудования применяются комбинации звуковых и визуальных сигналов. Унификацию терминологического состава сообщений предлагается осуществлять на основе графов знаний с минимизацией субъективно формируемых аббревиатур и словоформ разработчиков. Использование единых словарей и сокращение числа аббревиатур позволяет исключить операции расшифровки и соответствия терминов в модели действий оператора, что сокращает время обработки информации и повышает вероятность правильной оценки состояния контролируемого объекта.

#### Список литературы

1. Jamieson G. A. Ecological interface design for petrochemical process control: an empirical assessment // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Systems and Humans, 2007. Vol. 37. N 6. P. 906–920.
2. Программное обеспечение «СКАДА\_НЕВА». Руководство пользователя. ЭС.ПО.РП-01. СПб.: Энергосоюз. 2021. 305 с.
3. Ахремчик П.О., Ахремчик О.Л. Модификация алгоритмов разработки интерфейсов систем диспетчерского контроля и учета электроэнергии // Сб. докл. II Всероссийской научно-практ. конф. «Интеллектуальная энергетика». Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2024. С. 304–306.

# **ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ КОМПЬЮТЕРНАЯ И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ**

**Греков Э.Л., канд. техн. наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Оренбургский государственный университет», г.  
Оренбург**

Аннотация: в статье приводятся задачи, решаемые в изучаемой дисциплине студентами направления электроэнергетика и электротехника профиля электропривод и автоматика. Приводится состав лабораторной базы.

*Ключевые слова: микроконтроллеры, образование.*

Современные электроприводы и системы автоматизации представляют собой миниЭВМ, которые решают специализированные задачи по управлению двигателями и электрооборудованием. В обязательном порядке в них присутствуют микроконтроллеры с достаточным быстродействием со специально разработанным ПО. Поэтому инженерная подготовка по профилю электропривода должна включать в себя дисциплину, изучаемую микропроцессорные средства.

На лекционных занятиях студентам даются основные понятия, обобщенные структуры микропроцессорных систем управления (МПСУ), примеры построения. Уделяется внимание типовым схмотехническим решениям:

- подключение аналоговых однополярных и двухполярных сигналов;
- подключение дискретных входных сигналов с разными уровнями напряжения;
- дискретные выходы релейные и транзисторные;
- интерфейсы связи;
- гальваническая развязка входных и выходных сигналов;
- применение типовых датчиков физических сигналов в МПСУ и их подключение.

Теоретическая часть помогает студентам представлять внутреннее устройство доступных на рынке управляющих систем, их возможности, а также правильные и неправильные способы подключения внешних сигналов и объектов управления.

На практических и лабораторных занятиях студентами изучаются основы низкоуровневого программирования (backend) на доступных микроконтроллерах. Знакомство с азами программирования происходит на базе системы Arduino (рисунок 1) [1]. Множество плат расширений, многочисленные

примеры в сети Интернет позволяют не уделять много внимания этому на аудиторных занятиях, а давать студентам задачи на самостоятельное изучение. Достаточно провести 1-2 занятия для ознакомления с синтаксисом и логикой языка С и разобрать на практике пару примеров с подключением различных входных и выходных сигналов.



Рисунок 1 – Основная плата Arduino Uno

Наиболее сложные задачи студентам приходится решать при ознакомлении с ассемблером, для изучения логики работы исполняемых программ, непосредственно хранимых во Flash памяти микроконтроллеров.

На практических занятиях используются макетные платы с 8-ми разрядным микроконтроллером Microchip PIC18F4520 (рисунок 2), основные параметры которого приведены в таблице 1. Программируются микроконтроллеры с помощью свободно распространяемой программы MPLAB IDE (рисунок 3) на языке assembler [2].

На практических занятиях уделяется внимание логике построения таких программ (инициализация, основной цикл, п/п прерываний, библиотека п/п), построению по техническому заданию блок-схемы основного алгоритма, его кодированию и отладке в реальном времени.

8-ми битные микроконтроллеры больше подходят для управления медленными процессами. Для задач электропривода, когда сигналы изменяются за миллисекунды, необходимы более быстродействующие 32-х разрядные микроконтроллеры. Программирование таких МПСУ студентами изучается на базе микроконтроллера STM32F407VET (рисунок 4) [3]. Основные параметры приведены в таблице 2. Программируются микроконтроллеры с помощью свободно распространяемой программы STMCubeIDE (рисунок 5) на языке С.

STM32F407CubeIDE позволяет в графическом виде выполнить инициализацию процессора (рисунок 6), подключить библиотеки и операционную систему реального времени FreeRTOS.

Таблица 1 – Основные параметры микроконтроллера PIC18F4520

№	Параметр	Величина
1	Архитектура	RISC
2	Разрядность, бит	8
3	Максимальная тактовая частота, МГц	40
4	Максимальное быстродействие, MIPS	10
5	Объем ОЗУ, кБайт	1,5
6	Объем ПЗУ (flash), кБайт	32
7	Кол-во аналог. сигналов / разрядность	13
8	Кол-во дискретных сигналов	36
9	Напряжение питания, В	5
10	Интерфейсы	PWM, SPI, I2C, USART

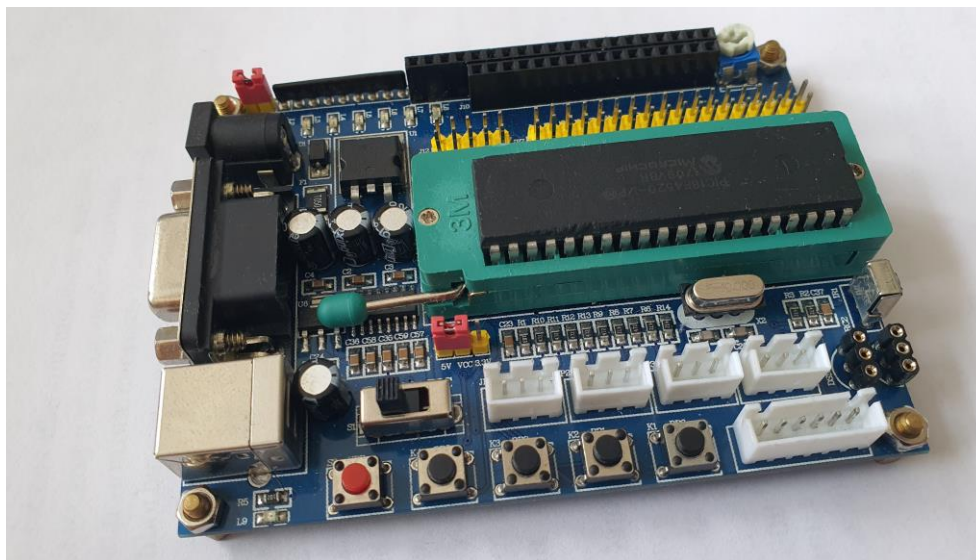


Рисунок 2 – Макетная плата с PIC18F4520

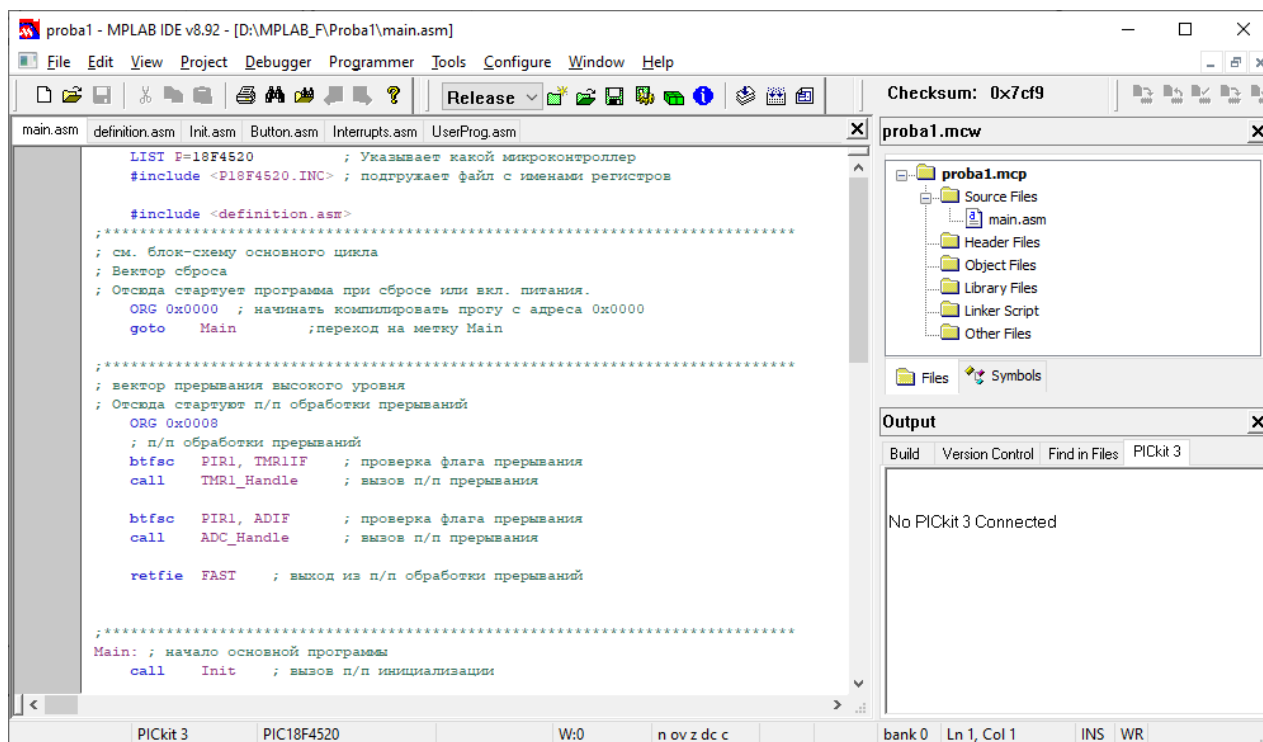


Рисунок 3 – Внешний вид программы MPLAB IDE

Таблица 2 – Основные параметры микроконтроллера STM32F407VET

№	Параметр	Величина
1	Архитектура	RISC COTREX-M4
2	Разрядность, бит	32
3	Максимальная тактовая частота, МГц	168
4	Максимальное быстродействие, DMIPS	210
5	Объем ОЗУ, кБайт	192
6	Объем ПЗУ (flash), кБайт	512
7	Кол-во аналог. сигналов / разрядность	16
8	Кол-во дискретных сигналов	82
9	Напряжение питания, В	3.3
10	Интерфейсы	CAN, Eth, I2C, SPI, UART, USB





Рисунок 4 – Макетная плата с STM32F407VET

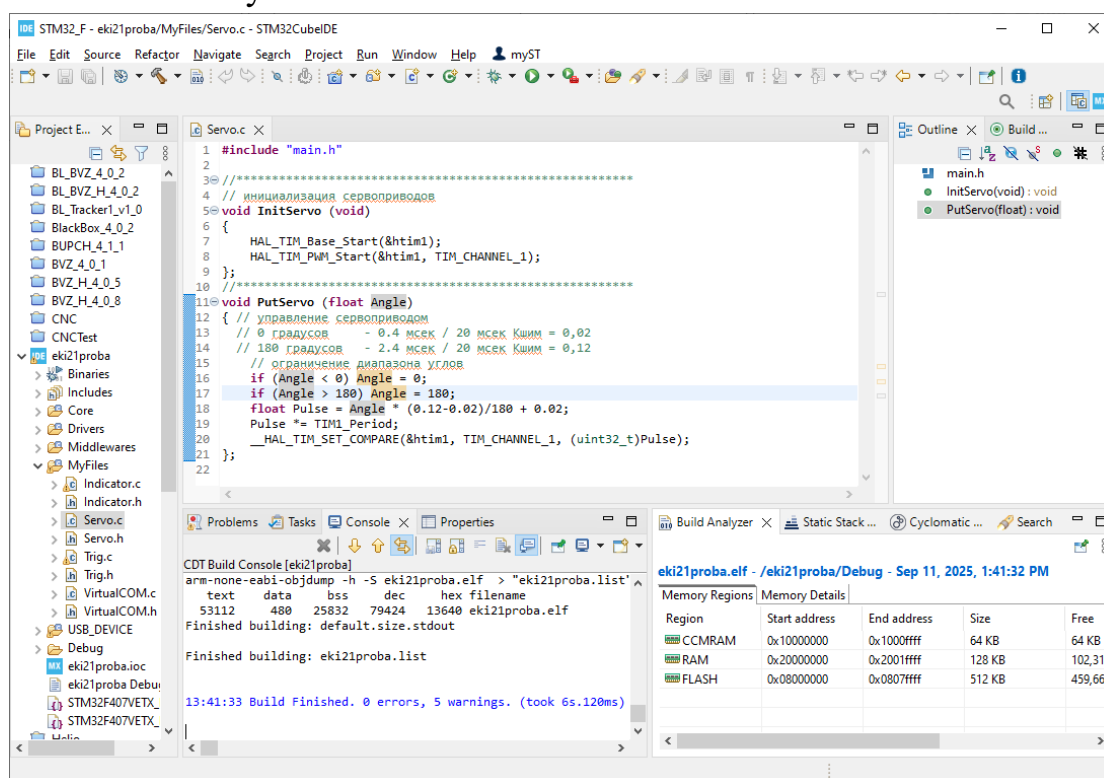


Рисунок 5 – Внешний вид программы STM32CubeIDE



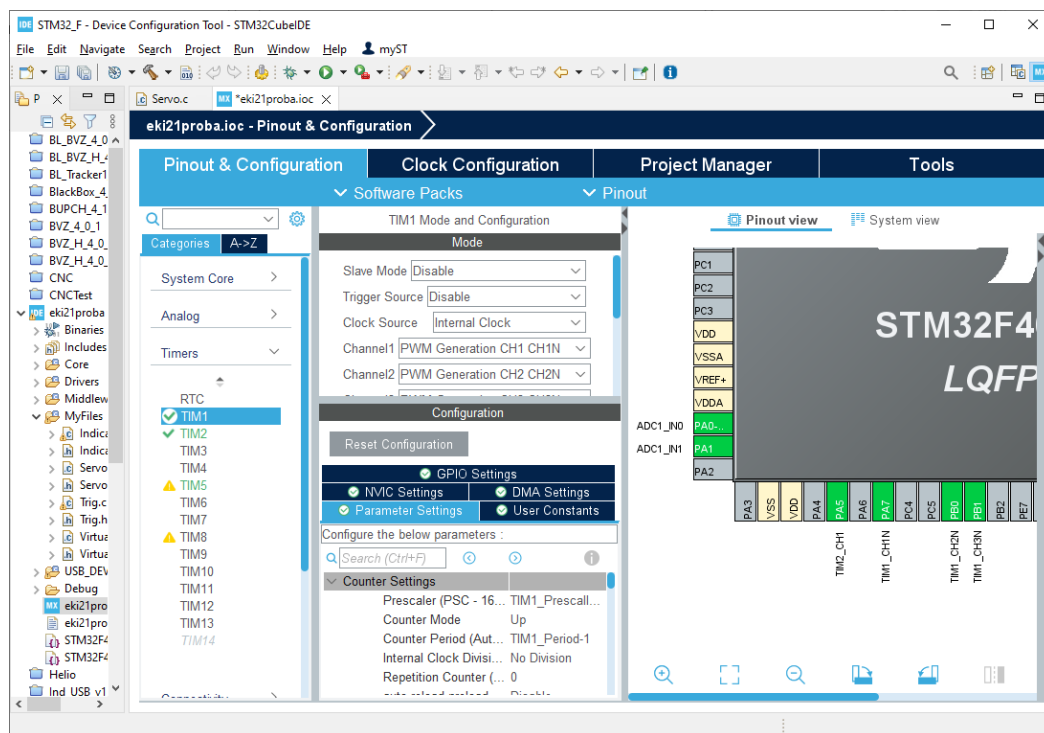


Рисунок 6 – Графическая оболочка инициализации микроконтроллера

Быстродействие микроконтроллера позволяет реализовать упрощенную систему управления силовой частью преобразователя частоты для регулирования скоростью вращения асинхронным двигателем.

В качестве отечественной альтернативы планируется использовать в учебном процессе 32-ти разрядные микроконтроллеры с ядром Cortex-M3 выпускает ЗАО «ПМК Миландр» - серия 1986BE9х [4]. 8-ми и 16-ти разрядные микроконтроллеры выпускают отечественные фирмы Ангстрем, Миландр, НИИЭТ [5].

#### Список литературы

1. Сайт, посвященный платформе Arduino. Режим доступа : <https://arduino.ru/>
2. Сайт технической поддержки Microchip. Режим доступа <https://microchip.com.ru/>
3. Сайт фирмы STMicroelectronics. Режим доступа [https://www.st.com/content/st\\_com/en.html](https://www.st.com/content/st_com/en.html)
4. Ермак, М. Российские микроконтроллеры с ядром Cortex-M3 и пример реализации проекта / М. Ермак // Компоненты и технологии. – 2010. – № 9(110). – С. 74-77. – EDN MWMEWH.
5. Сравнительная таблица отечественных микроконтроллеров: [электронный ресурс]. Режим доступа : <https://chipinfo.pro/mcu/ruscomparison.shtml>

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ В ИЗОЛИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ**

**Ермолаев А.В., студент магистратуры, Толстухина Е.А., студент  
магистратуры, Соловьева А.С., старший преподаватель,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Вятский государственный университет», г. Киров**

**Аннотация:** Представлена модель автоматизированной системы стабилизации частоты в изолированной энергосистеме. Выполнено моделирование переходного процесса в среде Simulink, проанализировано поведение системы при воздействии ступенчатого возмущения. Подтверждена эффективность ПИД-регулятора в условиях ограниченной генерации.

**Ключевые слова:** стабилизация частоты, изолированная энергосистема, управление, моделирование, ПИД-регулятор, Simulink.

Изолированные энергосистемы представляют собой энергокомплексы, работающие без связи с внешней сетью. К таким системам можно отнести электроснабжение удалённых населённых пунктов, промышленных объектов, военных баз и островных территорий. В таких условиях обеспечение стабильной частоты – ключевая задача, так как любое отклонение может привести к выходу из строя оборудования или нарушению синхронной работы генераторов [1].

Для управления частотой применяются различные алгоритмы, однако на практике наибольшее распространение получили ПИД-регуляторы. Они просты в реализации, адаптируются под различные режимы, а также эффективно компенсируют отклонения при изменениях нагрузки.

Автоматизированная система регулирования частоты представляет собой замкнутую систему управления с отрицательной обратной связью. Генератор, как инерционный объект, реагирует с запаздыванием, и задача регулятора – обеспечить быстрое восстановление частоты при внешних воздействиях [2].

ПИД-регулятор включает в себя:

Пропорциональный (Р) канал – мгновенно реагирует на текущую ошибку;

Интегральный (I) – устраняет постоянное смещение;

Дифференциальный (D) – реагирует на скорость изменения ошибки, сглаживает переходные процессы.

Выходной сигнал регулятора подаётся на модель генератора, представленного в виде передаточной функции

$\frac{num(s)}{den(s)}$ , где учтены динамические характеристики.

Для проведения моделирования разработана схема в среде Simulink (рисунок 1), где задаётся ступенчатое возмущение – имитируется резкое изменение нагрузки.

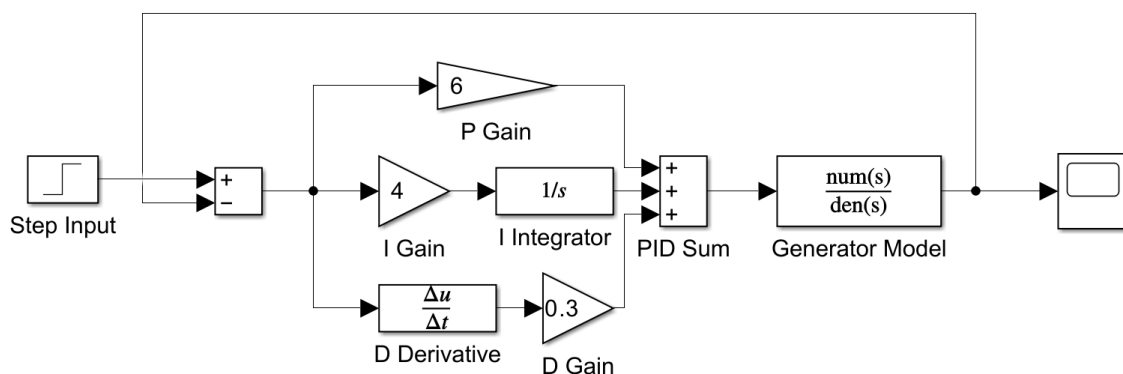


Рисунок 1 – Структурная схема ПИД-регулятора в системе стабилизации частоты

Сигнал ошибки поступает на три параллельных канала: пропорциональный, интегральный и дифференциальный. После обработки сигналы суммируются и поступают на объект управления. Выход генератора замыкается через обратную связь, формируя систему автоматического регулирования частоты [3].

Результаты моделирования приведены на рисунке 2. При подаче ступенчатого сигнала на вход системы наблюдается характерный переходный процесс.

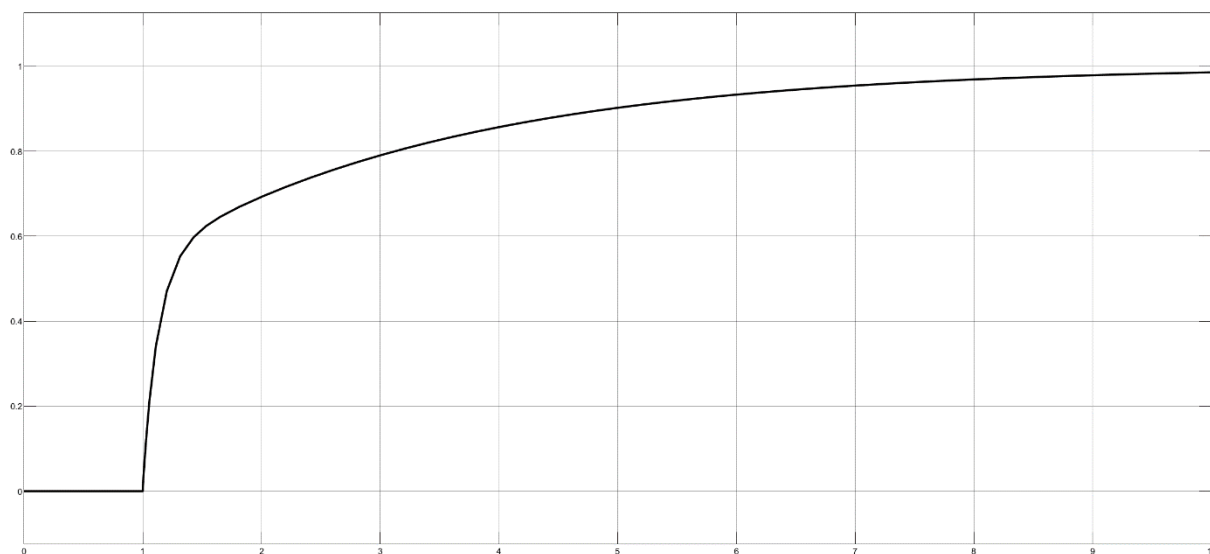


Рисунок 2 – Переходный процесс частоты при воздействии ступенчатого сигнала

В начальный момент времени происходит резкое отклонение частоты, которое эффективно компенсируется за счёт действия ПИД-регулятора. Уже к 3 секунде после скачка частота восстанавливается до 95 % от заданного уровня. Благодаря корректно подобранным коэффициентам ( $P = 6$ ,  $I = 4$ ,  $D = 0.3$ ), процесс стабилизации происходит без перерегулирования.

Система демонстрирует удовлетворительную устойчивость, быстродействие и точность. После начального отклонения амплитуда колебаний уменьшается, и система выходит на установившееся значение.

Стабилизация частоты особенно важна:

- при работе генераторов в изолированном режиме;

- при резком подключении или отключении крупных потребителей;
- в системах с низкой инерцией;
- в автономных энергетических установках (ДЭС, ВЭС, ПЭС).

Отсутствие регулирования приводит к частым аварийным отключениям, нарушению синхронности, нестабильности напряжения [4].

Проведённое моделирование подтверждает эффективность использования ПИД-регуляторов для стабилизации частоты в изолированной энергосистеме. Система обеспечивает устойчивое поведение, сглаживает переходные процессы и адаптируется под внешние воздействия. Модель в Simulink даёт возможность гибкой настройки параметров и визуального анализа динамики.

В дальнейшем возможно применение адаптивных и нечётких регуляторов, а также интеграция интеллектуальных алгоритмов (нейросетей, логики нечёткого вывода) для повышения эффективности регулирования в условиях неопределённости и переменных режимов.

#### Список литературы

1. Хондошко, Ю. В. Технологически изолированные энергосистемы России / Ю. В. Хондошко, А. А. Воробьев // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2023. – № 101. – С. 88-91. – DOI 10.22250/20730268\_2023\_101\_88. – EDN LHQWDN.
2. Карпов В.Э. ПИД-управление в нестрогом изложении. М.: НИИ информационных технологий; 2012. 34 с.
3. Системы цифрового управления: лабораторный практикум / А.А. Шкромадо, Р.В. Шестов, А.Н. Бирюков. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 66 с.
4. Габриэльян, Д. Д. Метод стабилизации частот генераторов / Д. Д. Габриэльян, С. С. Воробьев, О. Г. Егорочкин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т. 12, № 6. – С. 55-58. – EDN IJBLIH.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЛЭП**  
**Ермолаев А.В., студент магистратуры, Соловьева А.С., старший**  
**преподаватель,**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования «Вятский государственный университет», г. Киров**

Аннотация: В статье рассматривается модель дистанционной защиты, реализованная в среде Simulink. Исследуются осциллограммы сопротивления и расстояния до места короткого замыкания (КЗ) для различных участков линии. Представлен анализ переходных процессов и точности определения места КЗ.

Ключевые слова: *дистанционная защита, короткое замыкание, сопротивление, Simulink, моделирование, осциллограмма*

Современные электроэнергетические системы требуют высокой надёжности и быстродействия защитных устройств. Одним из ключевых элементов защиты является дистанционная защита, основанная на измерении импеданса между точкой установки реле и предполагаемым местом короткого замыкания (КЗ) [1, 2]. Такое решение позволяет не только обнаружить сам факт аварии, но и локализовать её по длине линии.

Принцип действия дистанционной защиты заключается в том, что в нормальных условиях токи и напряжения находятся в пределах заданных номиналов. Однако при КЗ резко возрастает ток, а напряжение на защищаемом участке падает. Из этих параметров можно рассчитать полное сопротивление участка до места замыкания, а зная параметры линии — определить и расстояние до КЗ.

Дистанционная защита работает по следующему фундаментальному соотношению:

$$Z = \frac{U}{I}, \quad (1)$$

где  $Z$  — полное сопротивление линии до точки КЗ,  $U$  и  $I$  — фазные значения напряжения и тока, измеренные на подстанции.

Если известно удельное сопротивление линии  $z'$ , расстояние до точки повреждения можно выразить как:

$$L = \frac{Z}{z'} \quad (2)$$

где  $z'$  — удельное сопротивление линии (Ом/км),  $L$  — расстояние до КЗ.

Эти выражения лежат в основе алгоритмов обработки сигналов в реле дистанционной защиты [3].

Для проверки алгоритма была собрана модель линии электропередачи в MATLAB Simulink, включающая блоки измерения фазных напряжений и токов,

RMS-измерители и арифметические блоки вычисления сопротивления [4,5]. Пример реализации показан на рисунке 1.

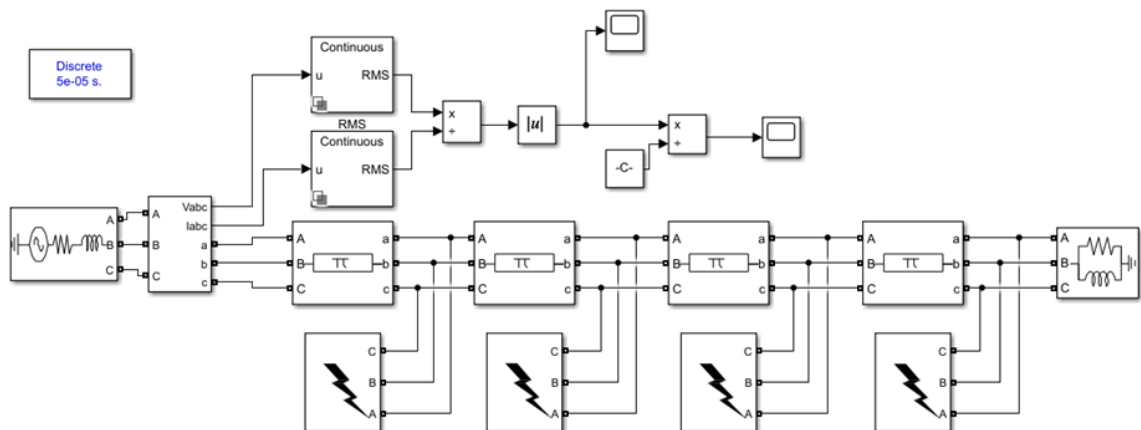


Рисунок 1 – Структура модели линии электропередачи с измерением сопротивления в MATLAB Simulink

В модель были встроены блоки для имитации КЗ в различных точках – на расстояниях 25, 50, 75 и 100 км от начала линии. Все замыкания были заданы как трёхфазные симметричные, чтобы исключить влияние несимметрии на расчёты.

Во время нормального режима сопротивление составляет около 1200 Ом. На рисунке 2 представлена осциллограмма фазных сопротивлений при КЗ на расстоянии 50 км.

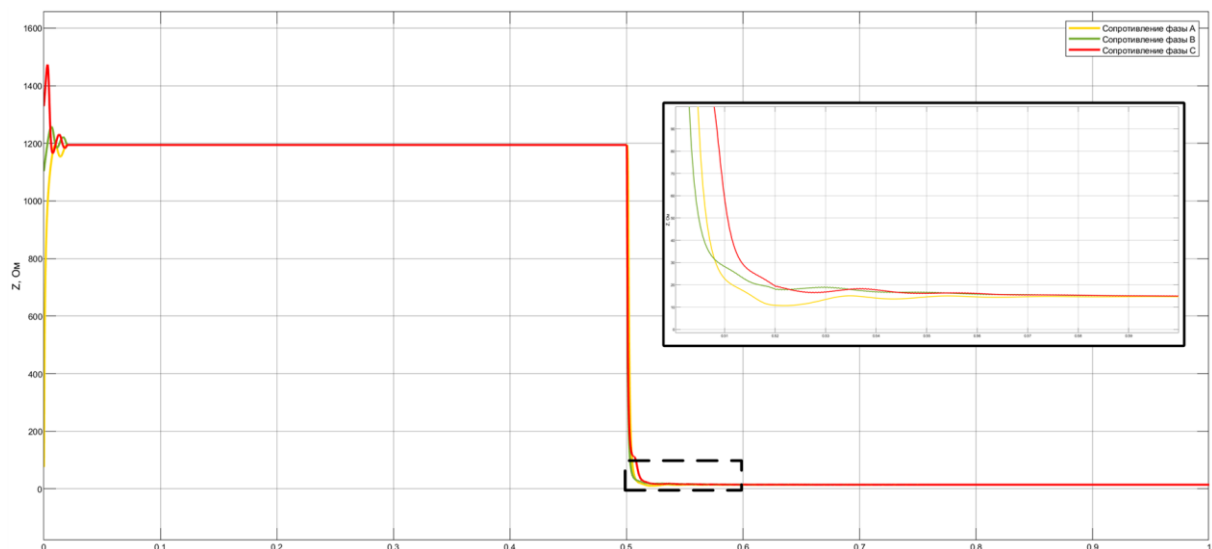


Рисунок 2 – Динамика сопротивлений фаз А, В и С при КЗ на расстоянии 50 км

До момента аварии (0,5 с) сопротивление сохраняется на уровне 1200 Ом. После срабатывания КЗ, сопротивление резко падает и в течение ~0.2 с стабилизируется на значении, соответствующем расстоянию 50 км. Это поведение характерно для всех фаз, с незначительными колебаниями, вызванными переходным процессом и колебаниями тока и напряжения.

Такое быстрое восстановление указывает на надёжность используемого алгоритма и достаточную чувствительность к изменениям в сети.

На основе рассчитанных значений сопротивления, модель дополнительно вычисляет расстояние до замыкания. График расстояния для фаз А, В и С представлен на рисунке 3.

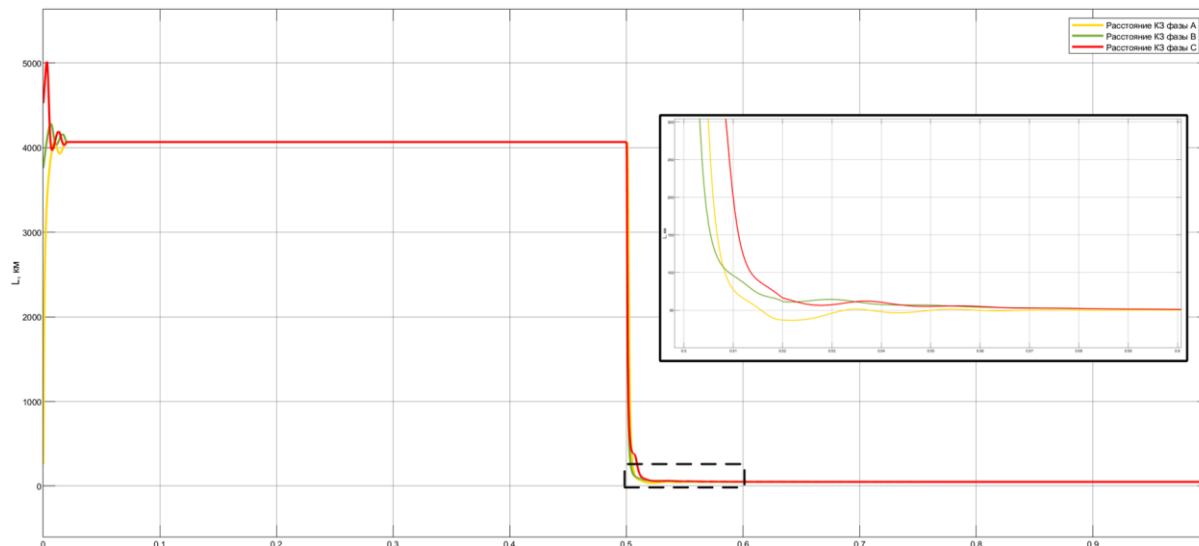


Рисунок 3 – Динамика расчётного расстояния до КЗ для каждой фазы

Как видно, значения расстояния после переходного процесса стабилизируются на отметке 50 км. Важно отметить, что при КЗ на других расстояниях (25, 75, 100 км), наблюдалась аналогичная динамика: резкое падение сопротивления с последующей стабилизацией в пределах 0,2 с.

Следует отметить, что в первые миллисекунды после КЗ значения сопротивления и расстояния нестабильны. Это связано с колебаниями напряжения, наводками и воздействием начальной нагрузки. Несмотря на это, встроенная логика фильтрации и усреднения в RMS-блоках позволяет достаточно быстро сформировать устойчивую оценку параметров аварии.

Срабатывание дистанционной защиты происходит в течение менее чем 0,2 секунды с момента возникновения короткого замыкания, что соответствует нормативным требованиям по быстродействию для первой зоны защиты. Однако при этом важно понимать, что точное определение расстояния до КЗ невозможно – расчётный результат всегда содержит некоторую погрешность. Это обусловлено влиянием переходных процессов, токов нагрузки, затухающих составляющих и различий в сопротивлениях по фазам [6].

#### Заключение

Проведённое исследование подтверждает эффективность дистанционной защиты, основанной на измерении сопротивления и расчёте расстояния до места КЗ. Алгоритм быстро и точно определяет место аварии, с переходом к точному значению уже через 0,2 с после возникновения замыкания. Это делает

предложенный метод применимым для практического использования в системах автоматической защиты и мониторинга линий электропередачи.

### Список литературы

1. Копьёв, В.Н. Релейная защита. Принципы выполнения и применения: учебное пособие / В.Н. Копьёв. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – С 153.
2. Федоров, В. А. Библия релейной защиты и автоматики / В.А. Федоров; Новосибирский институт повышения квалификации. 2004.
3. Евминов, Л. И. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебно-методическое пособие / Л. И. Евминов, Г. И. Селиверстов. - Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. - 531 с.
4. Костюченко, Л.П. Имитационное моделирование систем сельского электроснабжения в программе MATLAB: учеб. пособие / Л.П. Костюченко; Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2012. 215 с.
5. Ермолаев, А. В. Моделирование перенапряжений в электрических сетях с использованием программного комплекса MATLAB Simulink / А. В. Ермолаев, Д. В. Демидов, А. С. Соловьева // Инновационные технологии в обучении и производстве : Материалы XVIII Всероссийской заочной научно-практической конференции. В 3 т., Камышин, 19–20 ноября 2024 года. Том 1. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2024. – С. 60-64. – EDN AZKKCJ.
6. Киреева Э.А., Цырук С.А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. Москва: Академия, 2020. 288 с.



# **СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПОДГОТОВКЕ ВЫСОКОКВАЛИФИЦИРОВАННЫХ КАДРОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

**Митрофанов С.В., канд. техн. наук, доцент, Морозов В.А.,  
доцент,**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Оренбургский  
государственный университет», г. Оренбург**

*Аннотация. Рассмотрены методологические аспекты подготовки высококвалифицированных кадров для современной энергетики. Масштабность и разноплановость актуальных задач энергетики определяют необходимость разносторонней подготовки специалистов для строительства, эксплуатации и развития энергообъектов. Начиная с истоков Оренбургского государственного университета (ОГУ), и далее, в рамках деятельности Института энергетики, электроники и связи ОГУ, успешно решаются задачи подготовки кадров для энергетики с учетом современных вызовов науки и образования.*

*Ключевые слова: энергетика, энергообъект, ОГУ, ИЭЭС, энергетические технологии, кадры для энергетики, подготовка кадров, практико-ориентированный подход.*

Современная энергетика представляет собой совокупность энергетических производств, функционально объединённых в большие энергетические системы, которые производят, перерабатывают и распределяют топливно-энергетические ресурсы, энергию мощность для потребителей.

Впечатляющие воображение масштабы и разноплановый характер задач энергетики, определяют необходимость весьма разносторонней подготовки специалистов для строительства, эксплуатации и развития электроэнергетических объектов. Так, например, для полного цикла производства работ по сооружению подстанции в электросетевом комплексе, требуется выполнить строительные, электромонтажные и пусконаладочные работы. Причем, современные подстанции и установленное на них высокотехнологичное оборудование имеют высокую степень автоматизации и развитую систему средств коммуникации и связи с применением передовых цифровых технологий. Поэтому в последнее время значительно повысился спрос на энергетиков, специалистов с компетенциями программиста и проектировщика.

Примечательно то, что одной из первых специальностей, в начале образования Оренбургского государственного университета (ОГУ), семьдесят лет назад в 1956 году, была открыта специальность «Электрификация промышленных предприятий и установок», на базе которой впоследствии и образовался электротехнический факультет В разные годы деканами были А.С. Заблицкий, Г.В. Дель, А.А. Кувшинов, В.Л. Бобанский. В дальнейшем, особая

значимость и востребованность кадров в сфере энергетики, способствовала тому, что в составе ОГУ на базе электротехнического факультета был создан Институт энергетики и информатики (директор И.Г. Кирин). Далее был образован электротехнический факультет, а затем электроэнергетический факультет (декан В.М. Вакулук, С.В. Митрофанов). В 2022 году был организован Институт энергетики, электроники и связи (ИЭЭС).

Сейчас ИЭЭС представляет собой современный, оснащенный передовым оборудованием Институт. В его состав входят три кафедры, два студенческих конструкторских бюро, ФабЛаб «Электроинженерия», лаборатория электронных средств учебного назначения, лаборатория рентгеновских систем и электротехническая лаборатория, которая имеет лицензию в Ростехнадзоре. Большое количество электроизмерительного и научного оборудования, высококвалифицированных кадров в этих подразделениях позволяет выполнять НИОКР, а также оказывать инженеринговые услуги ведущим предприятиям Оренбургской области и других регионов по следующим направлениям:

*Электротехнические и электромеханические комплексы и системы по темам:*

- модернизация систем управления электропривода станочного оборудования;
- автоматизация технологических процессов;
- разработка микропроцессорных систем управления электроприводов постоянного и переменного тока с высокими энергетическими показателями;
- разработка систем автоматики для управления электрооборудованием электротехнических установок.

*Повышение надежности и экономичности элементов систем электроснабжения по темам:*

- расчет потерь мощности в системах электроснабжения;
- расчет статической и динамической устойчивости энергосистем предприятия;
- разработка систем автоматизации сбора и обработки экспериментальных данных эксплуатации электрооборудования, в том числе расчет уставок релейной защиты и автоматики;
- повышение надежности систем электроснабжения предприятий средствами релейной защиты и противоаварийной автоматики;
- расчет токов короткого замыкания и уставок релейной защиты в системах электроснабжения предприятий;
- тепловизионное обследование объектов контроля в соответствии с СДАНК-02-2020 с температурой в диапазоне от – 40 °С до +2000 °С.

*Энергосберегающие технологии в энергетике по темам:*

- разработка интеллектуальных систем управления внутренним, наружным и уличным освещением;
- разработка энергосберегающих мероприятий, направленных на снижение потерь в системах электроснабжения;
- анализ показателей качества электрической энергии в энергосистеме и разработка мероприятий по их улучшению;

- повышение экономичности режима электропотребления посредством оптимального распределения потоков реактивной мощности по элементам электрической сети в схеме внутреннего электроснабжения с выбором мест установки и мощности компенсаторных установок;

- анализ систем электроснабжения с помощью тепловизионного обследования;

- внедрение в производственный цикл тригенерационных установок;

- модернизация систем химводоподготовки с системами обратного осмоса;

- модернизация систем отопления и водоснабжения зданий и сооружений;

- модернизация вентиляции и кондиционирования;

- модернизация системы пневмоинструмента.

Работы сотрудников ИЭЭС внедрены в производство на многих предприятиях, что позволяет снизить затраты на производство единицы продукции и повысить надежность и бесперебойность работы технологических процессов. Сотрудники института обладают высокими профессиональными знаниями в вышеперечисленных областях. Расчеты выполняются сотрудниками, имеющими ученые степени. Они имеют большой опыт работы с предприятиями газоперерабатывающей и машиностроительной отрасли. В институте работает электротехническая лаборатория,

В настоящее время ИЭЭС ОГУ производит обучение по наиболее значимым и востребованным направлениям подготовки кадров для энергетики, электросетевого комплекса и электроустановок промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства.

Современные вызовы науки и образования отражаются и на методологических подходах к организации подготовки инженерных кадров для энергетики. Это обстоятельство обусловлено проблемными вопросами со стороны отрасли энергетики, которые образуют комплекс актуальных задач в образовательной сфере высшей школы [1]. Предлагается рассмотреть решение указанных вопросов подготовки кадров с позиций системного подхода [2,4].

По нашему мнению, наиболее существенные и значимые проблемы в современной энергетике можно отразить следующими направлениями.

*Старение кадров.* Исторически, после окончания вуза, выпускники попадали на производство в трудовые коллективы, которые профессионально формировались довольно длительное время, иногда даже с момента строительства и ввода в эксплуатацию объектов энергетики. В этом случае у молодых специалистов обеспечивалась непрерывность связи полученных в вузе теоретических знаний с освоением глубоких практических навыков и умений от работников с большим производственным опытом эксплуатации.

*Существенный технологический разрыв.* Активное внедрение новых энергетических технологий, таких как Smart Grids, возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и накопителей энергии различных типов и д.р. затруднено необходимостью модернизации производственного комплекса и активизации научных исследований в этом направлении. Образовательные программы, в ряде случаев, могут не успевать отражать динамику развития передовых

технологических процессов в энергетике. Причем, обостряет эту ситуацию и необходимость столь же динамичной модернизации лабораторной базы высшей школы и организации мест практики студентов на передовых предприятиях энергетической отрасли.

*Реакция общества.* Недостаточное продвижение в общественное сознание значимости энергетики для развития и жизнеобеспечения общества в целом. Иногда высказывается мнение о ее консервативности и малой внешней привлекательности. Однако, следует отметить то, что в энергетической отрасли, в настоящее время, активно применяются новые конструктивные и изоляционные материалы, эксплуатируются и развиваются аппаратно-программные комплексы в диспетчерско-технологическом управлении сложными системными объектами, внедряются энергосберегающие технологии и передовые средства автоматизации.

*Высокая степень цифровизации объектов энергетики.* Данное обстоятельство требует от работников отрасли технических компетенций в области: SCADA систем в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП) и интеллектуальных систем учёта энергоресурсов, специальных знаний в области защиты информации и кибербезопасности (защита критической инфраструктуры) и д.р.

Решение приведенных выше проблем.

*Современное обучение.* С учетом вышеперечисленных обстоятельств, для обеспечения технологического суверенитета России, уровень подготовки кадров в высшей школе должен реально опережать существующие технологические тренды в энергетике [3,5]. При отсутствии поддержки работодателей это практически невозможно.

В построении системы образования целесообразно проводить курс на развитие междисциплинарного подхода и внедрения элементов практико-ориентированного обучения [6]. При освоении таких направлений можно давать студентам в рамках факультативных дисциплин следующие компетенции:

- моделирование энергосистем и оптимизация их режимов работы;
- современные технологии в области энергосбережения;
- интеллектуальные системы, цифровые протоколы и спецификации обмена данными;
- построение вычислительных сетей;
- технологии возобновляемой энергетики;
- прогнозирование и управление электропотреблением.

*Развитие системы переподготовки и повышения квалификации.* При этом, может быть обеспечен наиболее важный принцип образовательного процесса – непрерывность обучения, с учётом требований современных технологий в области эксплуатации, управления и развития в энергетической отрасли. Важное значение имеют и дистанционные курсы получения актуальных технических знаний.

*Развитие взаимодействия школа-вуз.* Ранняя профессиональная ориентация в энергетику и начальная подготовка школьников старших классов общеобразовательных школ в центрах дополнительного образования ведущих

вузов. При этом, необходимо обеспечить гармоничную связь школьных знаний с реальными технологиями и оборудованием в энергетике. В этой связи, можно привести пример центра дополнительного образования «Прогресс» ОГУ, в котором с текущего года начинает работать дополнительная общеразвивающая программа «Лаборатория электроэнергетика», ориентированная на школьников 8 – 11 классов (14 – 17 лет). Программа разработана сотрудниками института энергетики, электроники и связи ОГУ, на базе лабораторной базы и аудиторий которого, планируется проведение теоретических и практических занятий. Основной целью данной программы является развитие интереса обучающихся к познанию физических явлений окружающего мира, формирование интеллектуальных и творческих способностей детей средствами расширенного изучения разделов физики, касающихся всех сторон электроэнергетических технологий на производстве и в быту, формирование основ технического инженерного мышления, подготовка к поступлению в высшие учебные заведения по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника». Школьники смогут реально осознать связь знаний, которые они получают в школе, с реализацией этих знаний в технических решениях и оборудовании в электроэнергетике, а также сложных системах управления технологическими процессами в энергосистеме и системах электроснабжения по отраслям.

В заключение, отметим, что вызовы современной энергетики предстоит преодолевать будущим энергетикам-студентам, которые в настоящее время обучаются в вузах и должны активизировать свои усилия в получении необходимых технических компетенций. Поэтому при подготовке высококвалифицированных кадров необходимо учитывать, так же, следующие обстоятельства:

1. Постоянное совершенствование и развитие новых энергетических технологий (ВИЭ и др.).

2. Современная подготовка специалистов энергетиков, требует освоения большого количества технических дисциплин и значительного объёма научных знаний, а также практических стажировок на современном технологическом оборудовании энергообъектов (электростанции различных типов, электрические сети энергосистем, оборудование систем электроснабжения, региональные диспетчерские управления энергосистем, релейная защита и автоматика и др.).

3. Образование в сфере энергетики даёт специалистам широкий набор актуальных знаний, навыков и технических компетенций, чрезвычайно востребованных и применимых во многих других современных отраслях народного хозяйства и направлениях практической деятельности.

#### Список литературы

1 Вакулюк, В. М. Подготовка кадров для электроэнергетической отрасли Оренбуржья [Электронный ресурс] / В. М. Вакулюк, С. В. Митрофанов, В. А. Морозов // Высшее образование в России, 2014. - № 7. - С. 122-128. . - 7 с.- Библиогр.: с. 127 (5 назв.). Посвящается проблеме подготовки бакалавров для электроэнергетической отрасли Оренбургской области.

2 Митрофанов, С. В. Подготовка студентов электроэнергетического профиля с учетом практических требований электромонтажных организаций [Электронный ресурс] / Митрофанов С. В., Кильметьева О. И., Морозов В. А. // Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации : сб. материалов Междунар. науч. конф., посвящ. 60-летию Оренбург. гос. ун-та, 15-17 сент. 2015 г. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования "Оренбург. гос. ун-т" ; М-во образования Оренбург. обл. ; [гл. ред. С. Н. Летута]. - Электрон. дан. - Оренбург : Университет, 2015. - Ч. 1. - С. 290-295. . - 6 с.

3 Морозов, В. А. Применение методологии коучинга в инженерном образовании для развития руководящих и лидерских качеств студентов [Электронный ресурс] / Морозов В. А., Митрофанов С. В., Кильметьева О. И. // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы : труды VIII Всерос. науч.-техн. конф., 25-27 окт. 2016 г., Оренбург / М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбург. гос. ун-т". - Электрон. дан. - Оренбург : Агентство "Пресса", 2016. - . - С. 81-84. . - 4 с.

4 Митрофанов, С. В. Методические принципы внедрения в учебный процесс практических задач организации производства на примере электромонтажной организации [Электронный ресурс] / Митрофанов С. В., Морозов В. А. // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всерос. науч.-метод. конф., 3-5 февр. 2016 г., Оренбург / М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбург. гос. ун-т". - Электрон. дан. - Оренбург : ОГУ, 2016. - . - С. 328-332. . - 5 с.

5 Кильметьева, О. И. Методология деловой игры как инструмент совершенствования учебно-практических навыков студентов электроэнергетического профиля [Электронный ресурс] / О. И. Кильметьева, С. В. Митрофанов, В. А. Морозов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всерос. науч.-метод. конф. (с междунар. участием), Оренбург, 26-27 янв. 2022 г. / Оренбург. гос. ун-т ; ред. А. В. Пыхтин. - Оренбург : ОГУ, 2022. - . - С. 1086-1089. . - 4 с.

6 Морозов, В. А. Методология практико-ориентированного обучения для освоения профильных дисциплин направления 13.03.02 [Электронный ресурс] / В. А. Морозов, С. В. Митрофанов, О. И. Кильметьева // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : сб. материалов Всерос. науч.-метод. конф., Оренбург, 1-3 февр. 2024 г. / Оренбург. гос. ун-т ; ред. А. В. Зайцев. - Оренбург : ОГУ, 2024. - . - С. 1179-1185. . - 7 с.

# **РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТ ПАРОВЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ**

**Соколов В.Ю., канд. техн. наук, доцент, Нечетов И.В., студент,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Оренбургский государственный университет», г  
Оренбург**

**Аннотация:** В данной статье описывается нелинейная динамическая модель котла с естественной циркуляцией. Модель основана на физических принципах, то есть балансе массы, энергии и импульса. Используется системный подход, позволяющий по-новому взглянуть на физику уровня воды в барабане и массового расхода в трубопроводе. Модель обеспечивает быструю динамическую реакцию, необходимую для описания работы парового котла в условиях сильно изменяющейся нагрузки. Новые возможности модели включают в себя многокамерную модель работы экранных и водоопускных труб, модель уровня воды в барабане и динамическую модель потока воды в трубопроводах продувки. Подробно рассмотрено применение модели для проектирования системы управления. Предложенные усовершенствования были опробованы на паровом котле среднего давления А-110 Теплоэлектроцентрали.

Динамические модели для котлов были и ранее были опубликованы в литературе. Разработанные работы были сосредоточены на получении эмпирических моделей, способных описывать внутреннюю динамику с ограниченной точностью. На протяжении многих лет основное внимание уделялось разработке моделей, основанных на физических принципах. Модели паровых котлов с естественной циркуляцией имеют множество различных форматов, например, линейные/ нелинейные, высокого/низкого порядка, групповые/распределенный параметр, а также были адаптированы к различным технологиям тепловых электростанций.

Цель работы состоит в том, чтобы разработать модель, которая отражала бы внутреннюю быструю динамику, необходимую для учета больших и быстрых изменений паровой нагрузки котла.

Схема поперечного сечения парового котла с естественной циркуляцией представлена на рисунке 1.

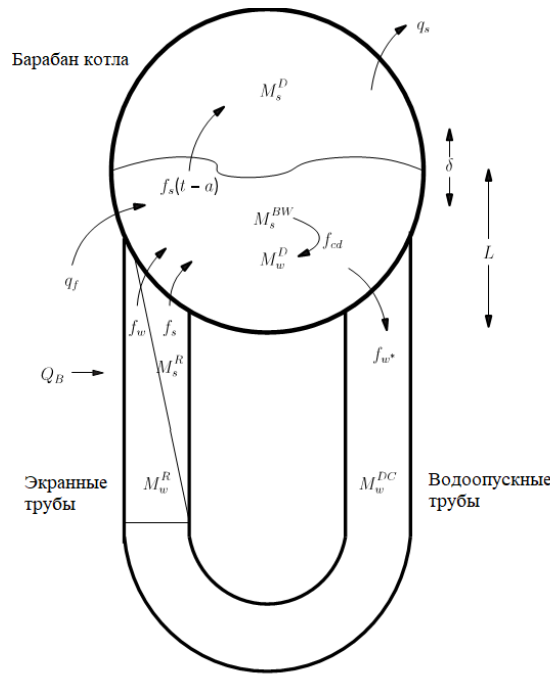


Рисунок 1 – Схема поперечного сечения парового котла с естественной циркуляцией

Модель для измерения уровня воды в барабане, необходимо определить  $L$  как установившуюся высоту уровня воды, а  $\delta$  - как колебания в пределах  $L$ . Чтобы определить высоту уровня воды, необходимо знать не только массу воды в барабане, но и массу пара под линией подачи воды,  $M_s^{BW}$ . Выражение может быть получено путем повторного применения принципа сохранения массы:

$$M_s^{BW}(t) = \varphi(t) - \varphi(t-a) \quad (1)$$

$$\varphi(t) = f_s(t) - f_{cd}(t) \quad (2)$$

где  $f_s(t)$ ,  $f_{cd}(t)$  обозначают массовый расход пара, выходящего из стояков, и массовый расход конденсата, образующийся в барабане, соответственно. Используя  $AR$  для обозначения общей площади стояков.

Масса пара и воды, выходящая из определенного сечения за определенный промежуток времени, должна иметь одинаковое соотношение  $\alpha^i$ , следовательно:

$$\alpha^i = M_s R^i / (M_s^{Ri} + M_w^{Ri}) = f_s^i \Delta / (f_s^i \Delta + f_w^i \Delta) \quad (3)$$

Максимальная производительность в режиме непрерывной работы составляет 39 МПа. Ниже приведены подробные сведения о физических параметрах, использованных при моделировании:  $A^R = 1,5 \text{ (м}^2\text{)}$ ;  $V^R = 10,5 \text{ (м}^3\text{)}$ ;  $A^D = 9,46 \text{ (м}^2\text{)}$ ;  $V^D = 10,2 \text{ (м}^3\text{)}$ ;  $L^{DC} = 7 \text{ (м)}$ ;  $A^{DC} = 0,62 \text{ [м}^2\text{]}$ ;  $V^{DC} = 9,32 \text{ (м}^3\text{)}$ ;  $M_m^D = 7400 \text{ (кг)}$ ;  $M_m^R = 40\,700 \text{ (кг)}$ ;  $P_0 = 3,90 \cdot 10^6 \text{ (Па)}$ .

Регулятор уровня воды в барабане регулирует массовый расход питательной воды в барабан. Традиционный регулятор состоит из классического контура обратной связи, управляемого погрешностью уровня воды, и регулятора



прямого действия, который использует поток пара из котла для предупреждения возникновения возмущений в подаче пара. Однако наибольшее возмущение происходит когда скорость изменения составляет не менее 8,75 мм/сек. Из-за геометрии барабана увеличение расхода питательной воды может привести к изменению, быстрое изменение не может быть компенсировано потоком питательной воды. Традиционная стратегия не учитывает этот факт. На практике общая мощность контроллера является отражением измерения. Проблема с таким поведением контроллера заключается в том, что подача питательной воды является непродуктивной. Снижение расхода питательной воды при высоком давлении пара приведет к значительному снижению уровня в барабане в будущем, и наоборот. Из-за свертки с экспоненциальным спадом приведенное выше уравнение также можно записать в виде:

$$M_s^{BW}(t) = 2fs(t) + \lambda 2(fs(t - \tau), \quad 0 \leq \tau < t, \quad (4)$$

где  $\lambda 2$  - обозначает конец интеграла свертки. Следовательно, любое изменение  $fs(t)$  будет отображаться в  $M_s^{BW}(t)$  через короткий интервал, т.е. они пропорциональны. Рассмотрим уравнение 4 для верхней секции экранных труб, тогда можно видеть, что  $fs(t)$  пропорциональна  $fw(t)$ , а  $fw(t)$  пропорциональна  $P$ . Таким образом,  $\delta$  (приблизительно) пропорциональна  $P$ . С учетом того факта, что  $P$  пропорционально  $qs$ , это дает физическое объяснение рисунку 2.

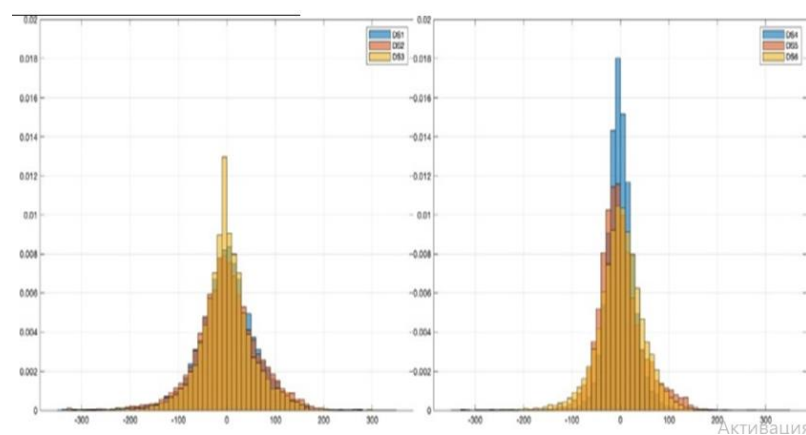


Рисунок 2 – Нормализованная гистограмма для наборов данных 1-3 (слева) и наборов данных 4-6 (справа)

Регулятор расхода пара регулирует открытие парового клапана на основе внешнего заданного значения и измерения текущего расхода пара через клапан. Клапан расположен между барабаном и пароприемником. Массовый расход пара из котла в паровой ресивер пропорционален разности давлений  $\Delta P$  между ними, а также зависит от открытия клапана подачи пара.

Отклонения объема пропорциональны требуемому расходу пара. Основным следствием этого является необходимость снижения значительных колебаний расхода пара, и единственным доступным инструментом является регулятор парового клапана. Рассматриваются два сценария, а именно:

Увеличение нагрузки. Когда нагрузка паром увеличивается, давление в паровом ресивере снижается, поэтому поток пара из котла должен увеличиваться. В таких условиях адекватной реакцией управления является быстрое уменьшение открытия клапана подачи пара. Таким образом, поток пара уменьшается. должно уменьшиться. В отличие от предыдущего сценария, открытие регулирующего клапана в этом сценарии неэффективно в качестве соответствующего управляющего воздействия, поскольку независимо от того, насколько открыт клапан, поток пара ограничен на  $\Delta P$ . Единственным решением является использование спускного клапана для выпуска пара либо в атмосферу, либо в другое независимое оборудование. Необходимо учитывать два обстоятельства, а именно, выпускной клапан должен быть расположен как можно ближе либо к источнику возмущения потока пара, либо к приемнику пара, и постоянная времени регулятора выпускного клапана должна быть того же порядка, что и постоянная времени подачи пара возмущения потока.

В совокупности оба варианта обеспечивают жизнеспособную стратегию снижения скачков уровня воды в барабане из-за колебаний расхода пара.

Количественная оценка улучшения работы котла, чтобы проиллюстрировать улучшение показателей отклонений уровня воды в барабане котла, было проведено сравнение шести наборов данных, каждый из которых охватывал период не менее 5 дней. Три набора данных соответствуют работе котла до внесения изменений (1–3), а три набора данных – после внесения изменений (4–6). На рисунке 2 показана нормализованная гистограмма отклонений уровня воды в барабане для каждого набора данных. Стандартное отклонение для набора уровня воды в барабане (1–3) составляет (60,9, 66,7, 54,9) миллиметров соответственно, тогда как для наборов данных (4) составили (28,7, 46,8, 47,6) соответственно. Отсюда следуют два вывода, а именно гистограммы, представленные на рисунке 2, показывают, что новое регулирование приводит к более узкому распределению уровня воды в барабане, чем те, которые соответствовали первоначальному регулированию. Это может быть означать, что уровень воды в барабане регулируется ближе к заданному значению, и использование нового регулятора привело к снижению стандартного отклонения уровня воды в барабане в среднем на 32,5%

Модель котла, работающего при сильно изменяющихся нагрузках, новые возможности модели включают в себя многокамерную модель стояков, новую модель уровня воды в барабане и новую динамическую модель потока воды в продувочных трубопроводах. Параметры модели могут быть получены непосредственно из физических характеристик любого котла. Было представлено сравнение с реальными данными котла, которые подтверждают эффективность модели и подчеркивают преимущества в условиях быстрого изменения нагрузки. Также были описаны возможности модели для управления котлом, при этом особое внимание было уделено снижению перепадов уровня воды в барабане при значительных и быстрых изменениях расхода пара. Результаты экспериментов с паровым котлом подтвердили улучшение показателей перепадов уровня воды в барабане, достигнутое благодаря пересмотренному закону регулирования.

## Список литературы

1. Б. А. Соколов, Устройство и эксплуатация паровых и водогрейных котлов малой и средней мощности, 2008;
2. Р.И. Эстеркин, Паровые котлы, 1989;
3. Ю. М. Липов, Котельные установки и парогенераторы, 2003.
4. Е.Ф. Бузников, К.Ф. Роддатис, Производственные и отопительные котельные, 1984;
5. Джерри Гилм, Разработка систем управления котлом, 2020;
6. Л.Н. Сидельковский, Котельные установки промышленных предприятий, 2009.
7. Г.А. Липатников, М.С. Гузеев, Автоматическое регулирование объектов теплоэнергетики, 2007;
8. В.В. Пугач, Разработка системы автоматического управления котлом, 2019.

# **ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ЭКСПЕРТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ**

**Семенова Н.Г., доктор пед. наук, канд. техн. наук, профессор, Полянских  
А.А., студент магистратуры,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Оренбургский государственный университет», г.  
Оренбург**

Аннотация: Статья посвящена оценке работоспособности вакуумного выключателя на основе методов экспертного оценивания. Представлены: результаты обработки оценок экспертов методами непосредственного оценивания, парных сравнений и ранжирования.

*Ключевые слова: экспертное оценивание, метод непосредственного оценивания, коэффициент приближения, метод парных сравнений, метод ранжирования, матрица ожидания.*

Экспертное оценивание – метод принятия решения, который позволяет дать оценку объекту, основываясь на мнениях специалистов (экспертов). Проведение экспертной оценки оправдано в случаях, когда отсутствует возможность принять решение, основываясь на точных расчетах в условиях полной или частичной неопределенности и рисков. Методы экспертного оценивания используются при необходимости выбрать наиболее предпочтительный вариант из представленного множества вариантов. [1]

Основными функциями оценивания работоспособности вакуумного выключателя ВВ/TEL-10-20/1000 нами определены следующие: не годен к эксплуатации; необходимость в ремонте; годен к эксплуатации.

Для реализации поставленной задачи по определению наиболее точной оценки работоспособности вакуумного выключателя в исследовании были использованы методы экспертного оценивания, такие как: непосредственное оценивание, парное сравнение, а также метод ранжирования. Алгоритмы перечисленных методов экспертного оценивания адаптированы для поставленной задачи.

Для определения наиболее точной оценки работоспособности были привлечены три эксперта: электромонтер, старший мастер, начальник ЛПЭ.

Программная реализация методов непосредственной оценки, парных сравнений и ранжирования осуществлена с помощью программы Mathcad.

## **1. Обработка оценок экспертов по методу непосредственного оценивания**

Результаты диагностирования экспертами, используемые в методе непосредственного оценивания, сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Заданные индивидуальные оценки диагностирования

Оценка работоспособности, $x_{ij}$	Электромонтер	Старший мастер	Начальник ЛПЭ
Не годен к эксплуатации	0,2	0,1	0,1
Необходимость ремонта	0,5	0,2	0,1
Годен к эксплуатации	0,8	0,7	0,9

Исходные данные и фрагмент расчета средней групповой оценки трех экспертов представлены на рисунке 1 и по формулам 1-13 соответственно.

$m := 3$  - количество экспертов  
 $n := 3$  - количество результатов  
 $\varepsilon := 0.01$  - заданная точность

$$X := \begin{pmatrix} 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.5 & 0.2 & 0.1 \\ 0.8 & 0.7 & 0.9 \end{pmatrix}$$

Рисунок 1 – Исходные данные

Групповая оценка результатов третьего приближения:

$$x3_1 = k2_1 \cdot \sum_{j=1}^m (X_{1,j}) = 0,145. \quad (1)$$

$$x3_2 = k2_2 \cdot \sum_{j=1}^m (X_{2,j}) = 0,23. \quad (2)$$

$$x3_3 = k2_3 \cdot \sum_{j=1}^m (X_{3,j}) = 0,843. \quad (3)$$

Нормировочный коэффициент третьего приближения:

$$\lambda3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (X_{i,j} \cdot x3_i) = 2,265. \quad (4)$$

Коэффициенты компетентности третьего приближения:

$$k3_1 = \frac{1}{\lambda3} \cdot \sum_{j=1}^n (X_{j,1} \cdot x3_j) = 0,361. \quad (5)$$

$$k3_2 = \frac{1}{\lambda3} \cdot \sum_{j=1}^n (X_{j,2} \cdot x3_j) = 0,287. \quad (6)$$

$$k3_3 = \frac{1}{\lambda3} \cdot \sum_{j=1}^n (X_{j,3} \cdot x3_j) = 0,352. \quad (7)$$

Проверка окончания итерационного процесса и условия:

$$\max(|x3_1 - x2_1|) = 1,733 \cdot 10^{-3}. \quad (8)$$

$$\max(|x3_2 - x2_2|) = 4,708 \cdot 10^{-4}. \quad (9)$$

$$\max(|x3_3 - x2_3|) = 8,984 \cdot 10^{-3}. \quad (10)$$

$$\max(|x3_1 - x2_1|) \leq \varepsilon = 1. \quad (11)$$

$$\max(|x3_2 - x2_2|) \leq \varepsilon = 1. \quad (12)$$

$$\max(|x3_3 - x2_3|) \leq \varepsilon = 1. \quad (13)$$

Условие выполняется.

Полученные данные:  $X_3 = (0,145; 0,23; 0,843)$ , указывают на то, что наиболее предпочтительной оценкой работоспособности вакуумного выключателя является «Годен к эксплуатации».

## 2. Обработка оценок экспертов по методу парных сравнений

В таблицах 2, 3 и 4 представлены результаты оценки экспертов работоспособности вакуумного выключателя по методу парных сравнений.

Таблица 2 – Оценки парного сравнения первого эксперта

Оценка работоспособности, $x_{ij}$	Результат № 1	Результат № 2	Результат № 3
Не годен к эксплуатации	0,5	0	0
Необходимость в ремонте	1	0,5	0,5
Годен к эксплуатации	1	1	0,5

Таблица 3 – Оценки парного сравнения второго эксперта

Оценка работоспособности, $x_{ij}$	Результат № 1	Результат № 2	Результат № 3
Не годен к эксплуатации	0,5	0,5	0,5
Необходимость в ремонте	0,5	0,5	0
Годен к эксплуатации	0,5	0,5	0,5

Таблица 4 – Оценки парного сравнения третьего эксперта

Оценка работоспособности, $x_{ij}$	Результат № 1	Результат № 2	Результат № 3
Не годен к эксплуатации	0,5	0	1
Необходимость в ремонте	1	0,5	0
Годен к эксплуатации	1	1	0,5

Исходные данные, составление матрицы ожидания и фрагмент обработки оценок представлены на рисунке 2 и по формулам 14-21 соответственно.

ORIGIN := 1

n := 3 кол-во экспертов  
m := 3 кол-во результатов  
ε := 0.01 точность

$$E1 := \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0.5 \\ 1 & 1 & 0.5 \end{pmatrix} \quad E2 := \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix} \quad E3 := \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 1 \\ 1 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 0.5 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} x_{1,1} &:= \frac{1}{2} + \frac{0-0}{2 \cdot n} = 0.5 & x_{1,2} &:= \frac{1}{2} + \frac{0-2}{2 \cdot n} = 0.167 & x_{1,3} &:= \frac{1}{2} + \frac{1-1}{2 \cdot n} = 0.5 \\ x_{2,1} &:= 1 - x_{1,2} = 0.833 & x_{2,2} &:= x_{1,1} = 0.5 & x_{2,3} &:= \frac{1}{2} + \frac{0-2}{2 \cdot n} = 0.167 \\ x_{3,1} &:= 1 - x_{1,3} = 0.5 & x_{3,2} &:= 1 - x_{2,3} = 0.833 & x_{3,3} &:= x_{1,1} = 0.5 \end{aligned}$$

Матрица ожидания оценок каждой из пар результатов

$$x = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.167 & 0.5 \\ 0.833 & 0.5 & 0.167 \\ 0.5 & 0.833 & 0.5 \end{pmatrix}$$

Рисунок 2 – Исходные данные и составление матрицы ожидания  
Нормировочный коэффициент (шаг 3):

$$\lambda_3 = K(x) \cdot x \cdot k_2 = 1,449. \quad (14)$$

Коэффициент важности объекта:

$$\begin{aligned} k_3 &= \frac{1}{\lambda_3} \cdot x \cdot k_2, \\ k_3^T &= (0,274 \quad 0,31 \quad 0,417). \end{aligned} \quad (15)$$

Проверка окончания итерационного процесса и условия:

$$|k_3 - k_2| = 5,532 \cdot 10^{-3}. \quad (16)$$

$$|k_3 - k_2| = 7,998 \cdot 10^{-4}. \quad (17)$$

$$|k_3 - k_2| = 4,732 \cdot 10^{-3}. \quad (18)$$

$$\max(|k_3 - k_2|) \leq \varepsilon = 1. \quad (19)$$

$$\max(|k_3 - k_2|) \leq \varepsilon = 1. \quad (20)$$

$$\max(|k_3 - k_2|) \leq \varepsilon = 1. \quad (21)$$

Условие выполняется.

На основании полученного результата по методу парных сравнений:  $K_3 = (0,274; 0,31; 0,417)$  наиболее предпочтительной оценкой работоспособности вакуумного выключателя является Результат №3.

### 3. Обработка оценок экспертов по методу ранжирования

В таблице 5 представлены результаты оценки альтернатив по методу ранжирования тремя экспертами.

Таблица 5 – Оценки альтернатив по методу ранжирования тремя экспертами

Оценка работоспособности, $x_{ij}$	Электромонтер	Старший мастер	Начальник ЛПЭ
Не годен к эксплуатации	3	3	2
Необходимость ремонта	2	1	3
Годен к эксплуатации	1	2	1

Исходные данные, составление матрицы ожидания и фрагмент обработки оценок представлены на рисунке 3 и по формулам 22-29 соответственно.

$$\begin{aligned}
 n &:= 3 \quad \text{кол-во экспертов} \\
 m &:= 3 \quad \text{кол-во результатов} \\
 \varepsilon_{\text{max}} &:= 0.01 \quad \text{точность} \\
 R_{\text{exp}} &:= \begin{pmatrix} 3 & 3 & 2 \\ 2 & 1 & 3 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \\
 R1 &:= \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 0.5 \end{pmatrix} \quad R2 := \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 1 \\ 1 & 0 & 0.5 \end{pmatrix} \quad R3 := \begin{pmatrix} 0.5 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 0.5 \end{pmatrix} \\
 x_{1,1} &:= \frac{1}{2} + \frac{0-0}{2 \cdot n} = 0.5 & x_{1,2} &:= \frac{1}{2} + \frac{1-2}{2 \cdot n} = 0.333 & x_{1,3} &:= \frac{1}{2} + \frac{0-3}{2 \cdot n} = 0 \\
 x_{2,1} &:= 1 - x_{1,2} = 0.667 & x_{2,2} &:= x_{1,1} = 0.5 & x_{2,3} &:= \frac{1}{2} + \frac{1-2}{2 \cdot n} = 0.333 \\
 x_{3,1} &:= 1 - x_{1,3} = 1 & x_{3,2} &:= 1 - x_{2,3} = 0.667 & x_{3,3} &:= x_{1,1} = 0.5 \\
 \text{Матрица ожидания оценок каждой из пар результатов} \\
 x &:= \begin{pmatrix} 0.5 & 0.333 & 0 \\ 0.667 & 0.5 & 0.333 \\ 1 & 0.667 & 0.5 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рисунок 3 – Исходные данные и составление матрицы ожидания  
Нормировочный коэффициент (шаг 3):

$$\lambda_3 = K(x) \cdot x \cdot k_2 = 1,273. \quad (22)$$

Коэффициент важности объекта:

$$k_3 = \frac{1}{\lambda_3} \cdot x \cdot k_2, \quad (23)$$

$$k_3^T = (0,152 \quad 0,348 \quad 0,5).$$

Проверка окончания итерационного процесса и условия:

$$|k_3 - k_2| = 4,319 \cdot 10^{-3}. \quad (24)$$

$$|k_3 - k_2| = 2,259 \cdot 10^{-4}. \quad (25)$$

$$|k_3 - k_2| = 2,059 \cdot 10^{-3}. \quad (26)$$

$$\max(|k_3 - k_2|) \leq \varepsilon = 1. \quad (27)$$

$$\max(|k_3 - k_2|) \leq \varepsilon = 1. \quad (28)$$

$$\max(|k_3 - k_2|) \leq \varepsilon = 1. \quad (29)$$

Условие выполняется.



Из полученных расчетов:  $K_3 = (0,152; 0,348; 0,5)$  можно сделать вывод, что наиболее предпочтительной оценкой работоспособности вакуумного выключателя является «Годен к эксплуатации».

Таким образом, по трём методам экспертного оценивания получили одну и ту же оценку работоспособности вакуумного выключателя ВВ/TEL-10-20/1000 – это «Годен к эксплуатации», что доказывает достоверность разработанных алгоритмов.

Практическая ценность заключается в том, что разработанные программы позволяют уменьшить время, необходимое для принятия решения о выборе наилучшей альтернативы, и повысить обоснованность этого решения благодаря программной реализации методов экспертной оценки.

### Список литературы

1. Семенова, Н.Г. Исследование и моделирование электроэнергетических объектов: учебное пособие / Н.Г. Семенова, Л.А. Влацкая; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2022. – 125 с.

# **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТАВА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ЕГО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ**

**Влацкая Л.А., канд. техн. наук, доцент, Туктамышев Р.И. студент  
магистратуры,**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Оренбургский государственный университет»,  
Оренбург**

Аннотация: в данной статье отражен анализ существующих методов оценки электропотребления и состава электрооборудования химического завода. Рассмотрены различные подходы к анализу электрической энергии. Проведен сравнительный анализ достоинств и недостатков каждого метода, с акцентом на преимущества технологического подхода.

*Ключевые слова:* электропотребление, электрооборудование, техноценнологический подход.

Эффективное управление электропотреблением является ключевым фактором для обеспечения конкурентоспособности и устойчивого развития химического предприятия. В условиях растущих цен на электроэнергию и повышению требований к энергоэффективности, оценка состава установленного на предприятии электрооборудования и его электропотребления становится важной, поскольку позволяет исследовать структуру электропотребления, выявлять основных потребителей и анализировать потери электрической энергии. Это в свою очередь способствует выявлению неэффективных участков технологического процесса предприятия, оптимизации электропотребления и повышению энергоэффективности работы предприятия в целом [1].

Таким образом, разработка эффективного алгоритма оценки состава электрооборудования предприятия и его электропотребления является актуальной задачей, требующей анализа существующего опыта и применения современных методов.

Данная статья представляет собой обзор научно-технической литературы, посвященной методам, которые могут быть использованы для оценки разнообразия установленного на химическом предприятии электрооборудования и его электропотребления.

В настоящее время для оценки электропотребления и состава электрооборудования могут быть использованы:

- статистический метод;
- методы экспертных оценок;
- техноценнологический подход.

Статистический метод основан на сборе данных об установленном электрооборудовании и потребляемой им электроэнергии в определенном временном интервале. Полученные статистические данные позволяют [4]:

- проводить анализ данных для выявления основных факторов, влияющих на электропотребление;
- формировать модели, описывающие зависимость между электропотреблением и различными факторами.
- осуществлять прогноз будущего потребления электроэнергии, что является их несомненным достоинством.

Несмотря на вышеуказанные преимущества, к недостаткам следует отнести:

- погрешность, поскольку статистический метод основан на предположении. Из-за различных факторов, таких как измерительные ошибки, неправильное функционирование счетчиков или пропуски данных, могут возникать погрешности, что может привести к неточным и некорректным результатам;
- невозможность учета влияния внешних факторов, таких как изменения в климатических условиях, экономические факторы или изменения в производственных процессах;
- построение статистических моделей может быть сложным и требовать экспертных знаний в области статистики и анализа данных.

Методы экспертных оценок – это методы, основанные на опросе экспертов, обладающих знаниями и опытом в области электроэнергетики. Они оценивают различные факторы, влияющие на электропотребление. Наиболее распространенными являются: метод непосредственного оценивания; метода парных сравнений; метод обобщенных ранжировок [2]. Достоинства данных методов:

- учет факторов, которые сложно оценить количественно, например, такие как состояние оборудования и квалификация персонала;
- быстрое получение результата, поскольку не требует сбора и обработки больших объемов данных;
- квалифицированные специалисты-эксперты могут выявить скрытые проблемы и недостатки в системе электроснабжения и электропотребления.

Недостатки методов экспертной оценки:

- субъективность, поскольку на результат анализа сильно зависят личные оценки каждого эксперта.
- возможная высокая стоимость проведения опроса, т.к. услуги квалифицированных экспертов могут быть дорогостоящими.

– трудоемкость обработки результатов опроса экспертов, что может требовать специальных навыков.

Техноценологический подход основан на описании сложных систем на основе ценологических понятий. Таким образом, электропотребление предприятия рассматривается как искусственная система, представляющая собой сообщество изделий (электрооборудования) со слабыми связями и слабым взаимодействием. Для оценки состояния системы-техноценоза и выявления потенциала для оптимизации энергопотребления используются гиперболические распределения (Н-распределения): ранговое параметрическое; ранговидовое и видовое [3].

– анализ технологических процессов с целью определения потребления энергии на каждом этапе производственного процесса;

– возможность выявления потенциала энергосбережения, на основе результатов которого можно разрабатывать меры по снижению потребления электрической энергии.

К недостаткам данного метода можно отнести:

– стоимость внедрения, т.к. реализация оценки электропотребления на основе техноценологического подхода требует установки датчиков и счетчиков на различных этапах производственного процесса.

В таблице 1 приведены достоинства и недостатки рассмотренных методов.

Таблица 1 – Достоинства и недостатки методов анализа электропотребления

Метод	Достоинства	Недостатки
Статистический метод	– простота реализации; – доступность данных; – выявление трендов и закономерностей.	– низкая точность; – невозможность учета влияния внешних факторов; – построение статистических моделей требовать знаний экспертов.
Методы экспертных оценок	– возможность учета сложноформализуемых факторов; – быстрое действие получения результата; – возможность выявления скрытых проблем экспертами.	– субъективность оценок; – высокая стоимость проведения опроса; – трудоемкость обработки результатов

Продолжение таблицы 1

Техноценологический подход	<ul style="list-style-type: none"> <li>– системный подход;</li> <li>– учет разнообразия оборудования;</li> <li>– возможность выявления неэффективных элементов.</li> </ul>	– необходимость сбора детальной информации о оборудовании и его электропотреблении.
----------------------------	--	---

На основе вышеизложенного, наиболее целесообразным для решения поставленной в работе задачи представляется техноценологический подход. Несмотря на сложность реализации и необходимость сбора детальной информации, он позволяет получить наиболее полную и объективную оценку состава электрооборудования химического завода и его электропотребления.

#### Список литературы

1. Левин, М.А. Электрооборудование и электротехнологии [Текст]: Краткий курс лекций для студентов 3 курса / М.А. Левин. – ФГОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2015, – 69 с.
2. Самохвалов, Ю. Я. Экспертное оценивание: методический аспект [Текст]: / Ю. Я. Самохвалов, Е. М. Наumenко. – Киев: ДУИКТ, 2007. — 264 с.
3. Гнатюк, В. И. Оптимальное управление электропотреблением регионального электротехнического комплекса (техноценоза) [Текст]: / В. И. Гнатюк. – М.: Институт народнохозяйственного прогнозирования, 2005. – 148 с.
4. Кычкин, А.В. Организация системы автоматического учета и статистического анализа электропотребления крупного офисного здания [Текст]: А.В. Кычкин, К.А. Борковец, Н.А. Ежова // Вестник ПНИПУ—2017. —№22. — С.5-22.

# **МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОРНЫЙ МОДУЛЬ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ РАДИАЦИОННЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕНТГЕНОДИАГНОСТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

**Е.А. Корнев, канд. физ.-мат. наук, доцент, А.С. Лелюхин, д-р техн. наук, доцент, С.С. Фролов, канд. техн. наук, Д.А. Муслимов, канд. техн. наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет»**

Аннотация: представлены результаты проектирования многоканального детекторного модуля рентгеновского излучения. Приведены функциональная схема модуля, принципиальная схема и результаты моделирования характеристик двухкаскадного усилителя одного канала детектирования, описание конструктивных особенностей печатной платы и модуля в целом.

*Ключевые слова: рентгеновское излучение, сцинтилляционные детекторы, фотодиоды, усилитель, амплитудно-частотная характеристика.*

В настоящее время в медицинской практике широко используются неинвазивные средства контроля радиационных и электрических параметров рентгенодиагностических аппаратов. Средства контроля конструктивно выполнены в портативном виде и предназначены для измерения ряда параметров: анодного напряжения, первого слоя половинного ослабления (СПО1), времени экспозиции, дозы и мощности дозы, второго слоя половинного ослабления (СПО2), полной и постоянной фильтрации в алюминиевом эквиваленте, эффективной энергии и коэффициента однородности излучения [1,2]. Область применения устройств контроля ограничена задачами контроля перечисленных параметров излучателей рентгенодиагностических аппаратов с частотными питающими устройствами при проведении приемо-сдаточных испытаний, сертификации, паспортизации и техническом обслуживании.

Первичными преобразователями устройств контроля различной модификации являются обычно одно- или многоканальные детекторные модули, которые на входе оснащены мишенью для позиционирования в пучке излучения рентгенодиагностического аппарата. За поверхностью мишени размещается модулирующая решетка-фильтр, обеспечивающая формирование градиентного поля, воздействующего на сцинтилляционные или другие преобразователи рентгеновского излучения в детекторном модуле.

Цель настоящей работы – проектирование многоканального детекторного модуля рентгеновского излучения для устройства контроля радиационных параметров и электрических характеристик, подобного прибору «Фотон-1» [2], но с использованием вместо сцинтилляционных кристаллов ВГО (германат висмута,  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) комбинированных планарных детекторов высокоэнергетического излучения S8559 (Hamamatsu, Япония) на основе оптически сопряженных сцинтилляторов CsJ (цезий йод) и фотодиодов (далее СД).

Авторами представляемой работы ранее была разработана измерительная установка и исследованы параметры и характеристики СД типа S8559 [3].

Измерительная установка была оснащена генерирующим источником рентгеновского излучения моноблочного типа с платой управления и измерительным одноканальным услителем. Установка позволила оценить уровни шумов СД типа S8559, а также измерить уровни выходных токов в диапазоне от единиц до сотен наноампер и длительностей токов от единиц до тысяч миллисекунд в широком диапазоне интегральных интенсивностей рентгеновского излучателя. Результаты исследований параметров СД предопределили исходные данные для проектирования представляемого ниже многоканального детекторного модуля (МДМ).

Функциональная схема МДМ (рисунок 1) содержит десять детекторов СД с соответствующими измерительными усилителями и фильтрами по цепям питания. Детекторы СД подключаются к входам измерительных усилителей  $In_{i,j}$  без смещения катодом к общей шине. Все измерительные усилители имеют общий тестовый вход  $Tst$  для настройки коэффициентов передачи усилителей от импульсных генераторов. Трёхполюсный вход источника питания для всех каналов общий. Для каждого вывода питания микросхем операционных усилителей (ОУ) предусмотрено по RC-фильтру нижних частот – для компенсации влияния импульсных помех от соседних каналов.

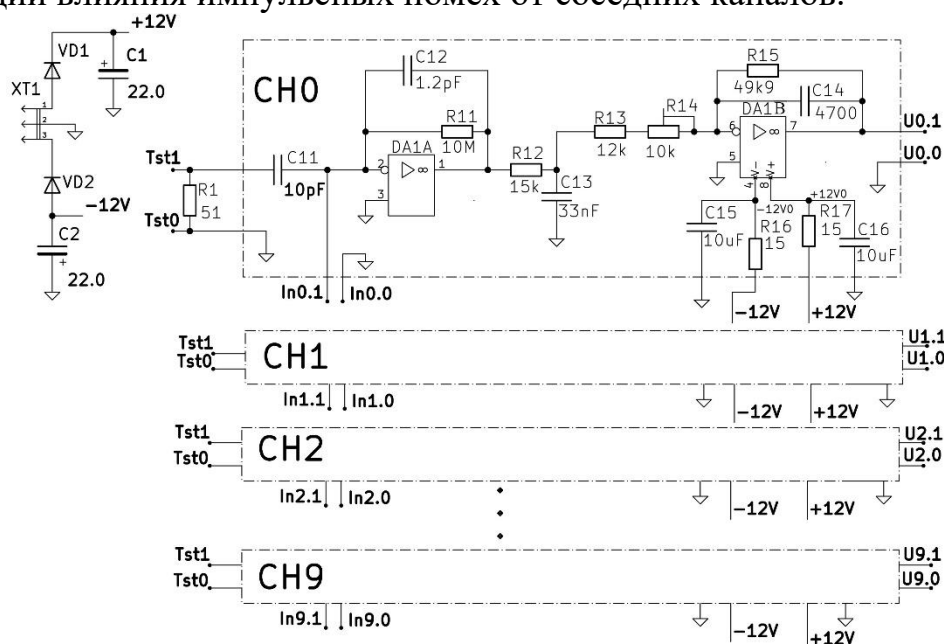


Рисунок 1 – Функциональная схема многоканального детекторного модуля

Измерительный усилитель каждого канала МДМ построен на малошумящих ОУ DA1. Схема спроектирована с непосредственными межкаскадными связями (рисунок **Ошибка! Источник ссылки не найден.**) и производит двойную инверсию входного сигнала: сначала в первом каскаде на операционном усилителе DA1A при преобразовании фототока СД в напряжение, затем в инвертирующем каскаде на операционном усилителе DA1B. Оба ОУ DA1A и DA1B расположены на одном кристалле микросхемы DA1 AD8676.

Инверсный усилитель представляет собой активный ФНЧ 1-го порядка с усилением по напряжению (DA1B, R13, R14, R15, C14) и связан с первым

каскадом посредством пассивного ФНЧ 1-го порядка (R12, C13). Применение двух каскадов ФНЧ 1-го порядка в принципе исключает вероятность неустойчивой работы усилителя.

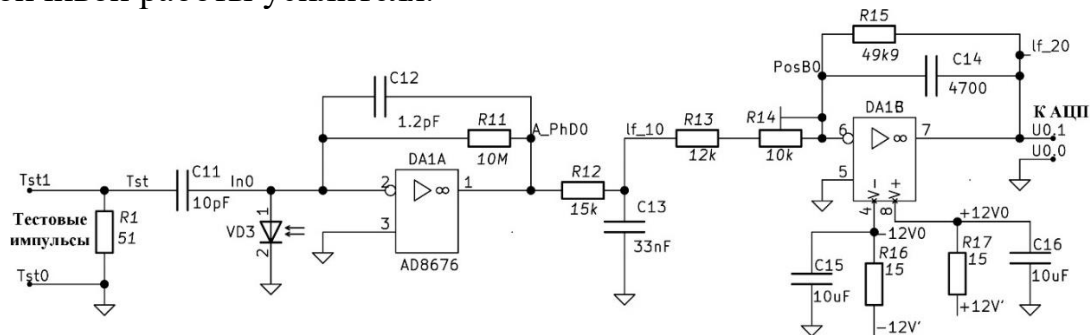


Рисунок 2 – Принципиальная схема одного канала детекторного модуля

Результаты моделирования передаточного сопротивления  $Z_{21}(f)$  измерительного усилителя показали, что полоса пропускания усилителя (рисунок 3) соответствует расчетной и находится в диапазоне частот от 0 до 420 Гц. Полоса пропускания выбрана из условия, что длительность токовых импульсов с детектора варьируется в пределах от единиц миллисекунд до нескольких секунд. При этом основная часть спектральной плотности одиночных токовых импульсов наиболее короткой длительности в 1 мс согласована с полосой пропускания усилителя.

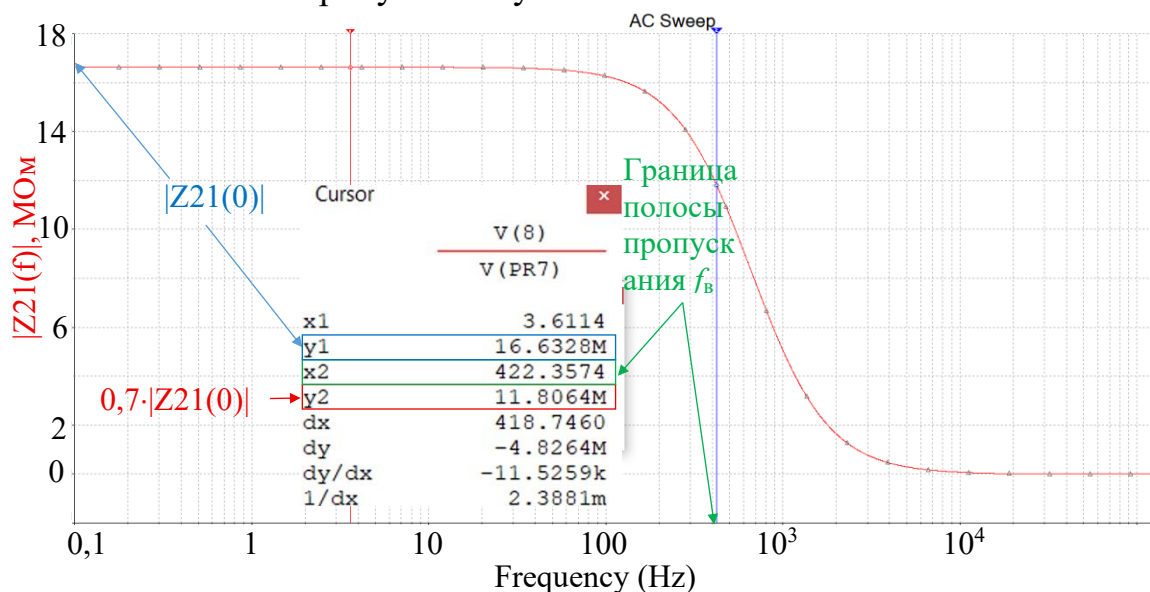


Рисунок 3 – Амплитудно-частотная характеристика передаточного сопротивления одного канала

Импульсная характеристика так же моделировалась в программе Multisim при коротком входном импульсе длительностью 30 мкс и амплитудой 1 мкА. Длительность импульсной характеристики – порядка 2,5 мс (рисунок 4).



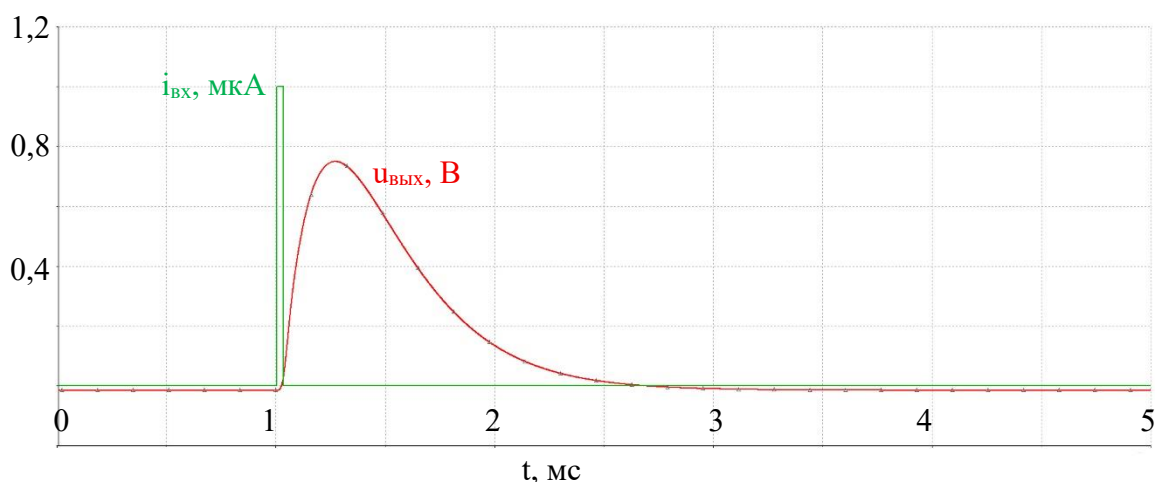


Рисунок 4 – Импульсная характеристика канала

Входное сопротивление усилителя составляет величину менее 0,4 Ом, диапазон выходных напряжений в пределах от –10 до 10 В. Для регулирования усиления предусмотрено переменное сопротивление R14 в цепи обратной связи активного ФНЧ, позволяющее изменять его коэффициент передачи  $K_u$  от 1,14 до 2,08 в полосе пропускания, а общий коэффициент передачи тока СД в выходное напряжения усилителя – от 11,4 до 20,8 МОм.

Уровни сигналов в каналах МДМ в составе устройства контроля радиационных и электрических параметров рентгенодиагностических аппаратов могут отличаться более, чем на порядок. Поэтому при трассировке печатной платы МДМ были минимизированы возможные перекрестные паразитные связи между каналами. Для этого каждый вывод внешнего питания, включая «0 В», трассированы для каждого канала по топологии «звезда». Также разведены по каналам оба полюса тестового входа. Сигнальная «земля» и «земля» питания разделены и соединяются только на центральном контакте разъема ХТ1 (схема рисунка 1). Для обеспечения электромагнитной и радиационной помехозащищенности МДМ размещается в корпусе-экране из алюминиево-магниевого и свинцового сплавов.

Таким образом, разработанный многоканальный детекторный модуль рентгеновского излучения может быть применен как широкодиапазонное средство измерения уровней и длительностей выходных токов сцинтилляционных детекторов для создания новых модификаций устройств контроля радиационных и электрических параметров рентгенодиагностических аппаратов медицинского назначения.

#### Список литературы

1. Application notes: Piranha HVL and TF AN011. Conversion tables between HVL and Total Filtration. <https://rtigroup.com/resource-center/rti-documentation>
2. Лелюхин А.С., Муслимов Д.А. Устройство контроля радиационных параметров и электрических характеристик «Фотон-1» // XI Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники.

Программа и материалы конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2024. – С. 50 – 56. ISBN 978-5-7629-3417-6

3. Корнев Е.А., Лелюхин А.С., Фролов С.С., Муслимов Д.А. Измерительная установка для исследования сцинтилляционных рентгеновских детекторов // Приборы. 2025. №8. – с. 7 - 12.

# ТЕСТОВЫЕ СИГНАЛЫ С ЛИНЕЙНО МЕНЯЮЩИМИСЯ ЛОГАРИФМИЧЕСКИМИ СПЕКТРАМИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ

Фролов С.С., канд. техн. наук,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Оренбургский государственный университет»

Аннотация: предложены тестовые сигналы с линейно меняющимися в логарифмическом масштабе спектрами. Указанные сигналы целесообразны при измерении частотных характеристик фильтров в окрестностях границ полос пропускания и могли бы ускорить процесс анализа по сравнению гармоническими функциями.

Ключевые слова: логарифмический масштаб, линейные спектры, тестовый сигнал, частотные характеристики.

В работах [1 - 3] рассмотрено применение тестовых сигналов вида

$$D_c(x, N) = \frac{\sin\{Nx/2\}}{\sin\{x/2\}} = \begin{cases} 2 \sum_{k=0}^{0,5N-1} \cos\{(2k+1)x/2\} & \text{при } N = 2K, \\ 1 + 2 \sum_{k=1}^{0,5(N-1)} \cos\{2k \cdot x/2\} & \text{при } N = 2K - 1 \end{cases} \quad (1)$$

с равномерным спектром для автоматизированного анализа частотных характеристик (ЧХ) фильтров нижних (ФНЧ) и верхних частот (ФВЧ), полосовых фильтров (ПФ).

Эксперименты с электронным микропроцессорным макетом, реализующим метод, подтвердили значительное сокращение времени анализа ЧХ в звуковом диапазоне и приемлемую погрешность измерения в полосах пропускания (ПП). Но погрешность измерения в полосе задерживания (ПЗ) и на границах полос значительно возрастала и уступала точности измерений при обычном гармоническом воздействии.

В докладе выполнен поиск сигналов со спектрами: линейно нарастающим (рисунок 1,а) для измерения спадов АЧХ на границе ПП ФНЧ или правой границе ПП ПФ, меняющемся по закону  $1/f$  (рисунок 1,б) для измерения подъёмов АЧХ на границе ПП ФВЧ и левой границе ПП ПФ.

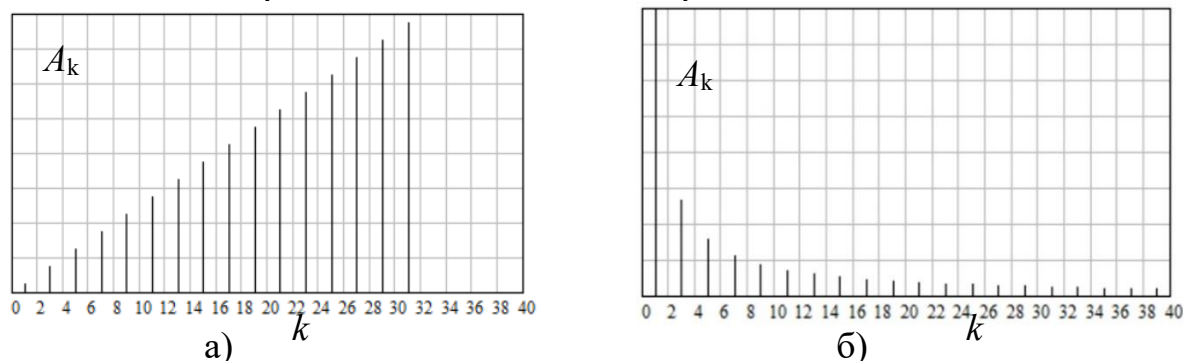


Рисунок 1 – Нарастающий (а) и спадающий (б) спектры

Показанные спектры в логарифмическом масштабе являются, соответственно, линейно нарастающим и линейно спадающим.

Сигнал с линейно нарастающими спектрами легко получается, если продифференцировать выражение правой части (1)

$$\frac{dD_c(x, N)}{dx} = \frac{\left( \frac{\sin\{N x/2\}}{\sin\{x/2\}} \right)}{dx} = \begin{cases} \sum_{k=0}^{0,5N-1} -(2k+1) \sin\{(2k+1)x/2\} & \text{при } N = 2K, \\ \sum_{k=1}^{0,5(N-1)} -2k \cdot \sin\{2k \cdot x/2\} & \text{при } N = 2K + 1 \end{cases} \quad (2)$$

Если рассчитывать массив из  $N/2$  отсчётов тестового сигнала в режиме реального времени с помощью правой части (2), потребуется для каждой выборки вычислить сумму из  $N/2$  или  $(N - 1)/2 - 1$  отсчётов гармонической функции. Если же пользоваться выражением производной  $dD_c(x, N)/dx$ , количество вычислений уменьшится в  $N/2$  раз.

Выражение левой части (1) дифференцируется достаточно легко

$$\frac{dD_c(x, N)}{dx} = \frac{\left( \frac{\sin\{N x/2\}}{\sin\{x/2\}} \right)}{dx} = \frac{(1 - N^2) \sin\{N x/2\}}{4 \cos\{x/2\}} \quad (3)$$

Результаты преобразований проверены сравнением диаграмм (2) и (3) при разных  $N = 8 \dots 32$  в программе Mathcad.

Очевидно, получить детерминированный (не дробовый шум) спадающий по закону  $1/f$  спектр можно, проинтегрировав, например первую строку правой части (1), сумму косинусов при четных  $N$

$$\int_{N=2K} D_c(x, N) dx = \int \frac{\sin\{N x/2\}}{\sin\{x/2\}} dx = 4 \sum_{k=0}^{0,5N-1} \frac{\sin\{(2k+1)x/2\}}{2k+1} \quad (4)$$

Однако автору неизвестны аналитические методы интегрирования левой части выражения (4). Однако расчётные исследования в программе Mathcad показал - графиков сумм правой части (4) при разных  $N$  похожи на аппроксимации прямоугольной симметричной относительно начала координат функции с амплитудой  $\pi$  и периодом  $4\pi$  ограниченным рядом Фурье (рисунок 2, 3).

Известен спектр периодических прямоугольных импульсов, аналогичных сигналу на рисунке 4 по форме, с амплитудой  $U_0$

$$\dot{A}_n = -i \frac{4 \cdot U_0}{\pi \cdot n} \left( \sin\left\{n \frac{\pi}{2}\right\} \right)^2 = \begin{cases} -i \cdot \frac{4 \cdot U_0}{\pi \cdot (2k+1)} & \text{при } n = 2k+1, \\ 0 & \text{при } n = 2k \end{cases}$$

При  $U_0 = \pi$

$$\dot{A}_{2k+1} = -i \cdot \frac{4}{(2k+1)}, \quad \dot{A}_{2k} = 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (5)$$

что соответствует амплитудам и фазам гармоник ряда (4).

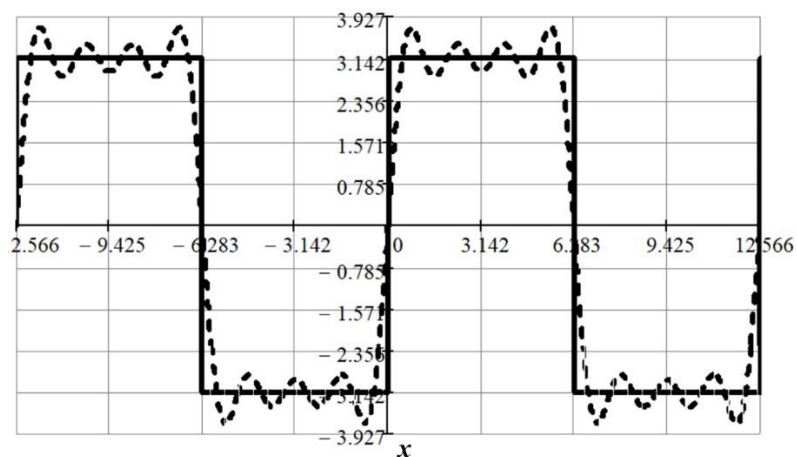


Рисунок 2 – Сигнал со спектром вида  $1/f$  при  $N=8$  на фоне импульсов

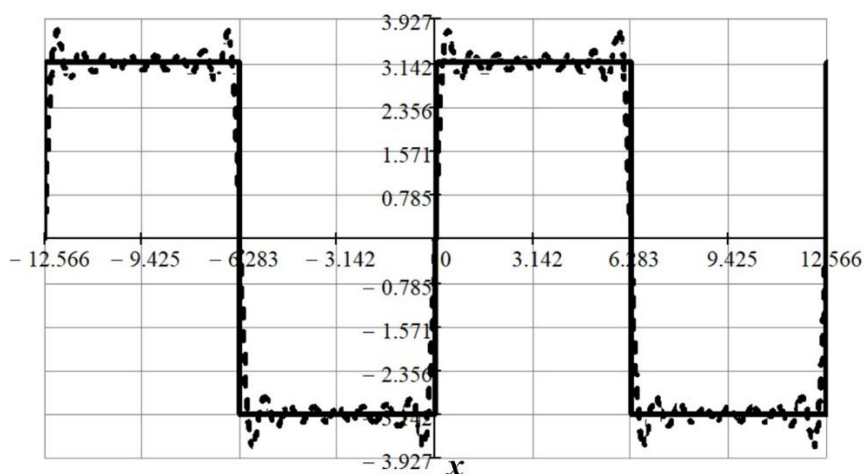


Рисунок 3 – Сигнал со спектром вида  $1/f$  при  $N=16$  на фоне импульсов

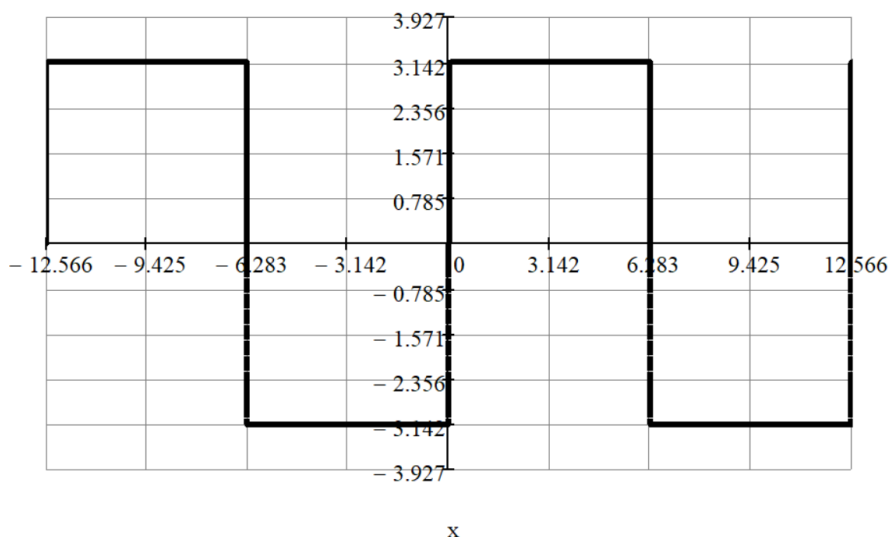


Рисунок 5 – Прямоугольные импульсы с периодом  $4\pi$  и амплитудой  $\pi$

Эксперименты в программе Mathcad показали – результат ДПФ дискретизированных последовательностей одного периода импульса рисунка 4 близок к спектру (5) с погрешностью менее 5% для первой половины гармоник.

Таким образом, по результатам работы предлагаются к применению при автоматизированном анализе ЧХ на границах ПП тестовый сигнал вида (3) и симметричные прямоугольные импульсы (рисунок 4). Сигнал вида (3) целесообразен для исследования ЧХ на границе полосы пропускания ФНЧ и правой границе полосы пропускания ПФ. Прямоугольные импульсы, соответственно, потребуются для автоматизированного анализа ЧХ в области границы полосы пропускания ФВЧ и левой границы полосы пропускания ПФ.

#### Список литературы

1. Фролов, С.С. Воспроизведение фрагмента сигнала с прямоугольным линейчатым спектром системы измерения частотных характеристик фильтров нижних частот / С.С. Фролов, О.В. Худорожков, А.А. Лукьянчиков, П.А. Павлов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2024, т. 30, №2. – с. 196 - 208.

2. Фролов, С.С. Оценка производительности измерения частотных характеристик фильтров нижних частот при тестировании сигналом с равноамплитудным комплексным рядом / С.С. Фролов, А.А. Лукьянчиков, Н.М. Наумов, А.А. Демешко // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2024, т. 30, №3. – с. 426 – 437.

3. Фролов, С.С. Перспективы применения тестовых гармонических равноамплитудных рядов с полосовым спектром в измерителях частотных характеристик узкополосных фильтров / С.С. Фролов, А.А. Лукьянчиков, Н.М. Наумов, А.А. Демешко // Приборы. – 2024, №11. – с. 1 – 7.

## **ПРИМЕРЫ ПОСЛЕДСТВИЙ ОТСУТСТВИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ И ЗАНУЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ**

**Ямансарин Ильдар Ильдусович, к.т.н., доцент,  
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего  
образования «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург**

Все знают про защитное заземление электрооборудования и знают, что без него работать опасно для жизни. Про заземление рассказывают на уроках БЖД студентам, всем работникам на вводном инструктаже при устройстве на работу. Электротехнический персонал предприятий проходит изучение, проверку знаний по электробезопасности и обязательно должен знать о заземлении и занулении электрооборудования. В статье мы рассмотрим два случая, связанных с отсутствием заземления и зануления.

Первый случай произошел в Илекском районе на территории птицекомплекса. Несовершеннолетний Г. помогал взрослым ухаживать за птицами на территории базы птицекомплекса. Проходя мимо окна Г. коснулся плечом металлического корпуса вытяжного вентилятора и оказался под напряжением 220В. Обувь у него была влажной, стоял он на металлической поилке наполненной водой. Освободиться сам от действия электрического тока он не смог. Приехавшая скорая помощь констатировала смерть Г.

Причиной смерти несовершеннолетнего Г является совокупность нарушений норм ПУЭ [1]. Вентилятор которого коснулся Г. был смонтирован с нарушением ПУЭ п.п. 1.7.49, 1.7.51, 1.7.171, 1.7.172, 1.7.173, 1.7.174, а именно металлический корпус не был заземлен (занулен). В коробке выводов вентилятора имелся винт для зануления корпуса, к нему не был подсоединен нулевой провод. Питающий провод был 3-х жильным, т.е. в нем отсутствовал нулевой защитный PEN проводник. Металлический корпус вентилятора должен был быть соединен посредством (отсутствующего) нулевого провода с нулевой шиной в вводном электрощите (Рисунок 1).

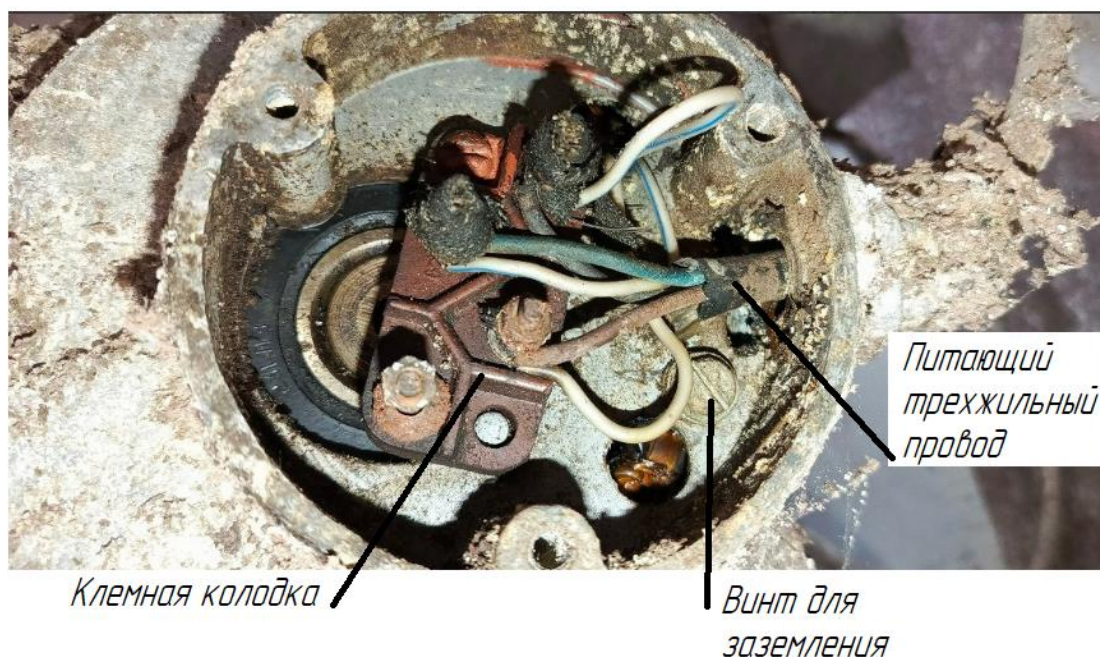


Рисунок 1 – коробка выводов электродвигателя вентилятора

Особенностью управления вентиляторами установленными на птицекомплексе являлось питание всех 4-х вентиляторов от одного автоматического выключателя. Т.е. все 4 вентилятора включаются и выключаются одновременно от одного выключателя. В этом случае нет возможности, например, отключить только один неисправный вентилятор на ремонт. Поэтому при выходе из строя одного из вентиляторов на него все равно подавалось напряжение при включении других вентиляторов.

Один из вентиляторов в процессе эксплуатации вышел из строя, внутри электродвигателя обгорели провода и один из проводов металлической частью коснулся корпуса электродвигателя (Рисунок 2). При подаче на вентилятор напряжения он не работал (лопасти вентилятора не вращались), а корпус оказывался под напряжением 220 Вп. 1.7.49 ПУЭ. При этом автоматический выключатель не срабатывает на отключение, т.к. корпус электродвигателя не заземлен п. 1.7.51 ПУЭ. Выходу из строя электродвигателя способствовало включение через «сборный» 3-х фазный автоматический выключатель состоящий из двухполюсного и однополюсного автоматического выключателя. Неодновременная подача напряжения на фазы электродвигателя приводит к протеканию токов больше номинальных и нагреву и к ускоренному износу изоляции и выходу из строя электродвигателя. В случае срабатывания автоматического выключателя в аварийном режиме, на электродвигатель вентилятора все равно подается напряжение через второй выключатель п. 1.7.171 ПУЭ.



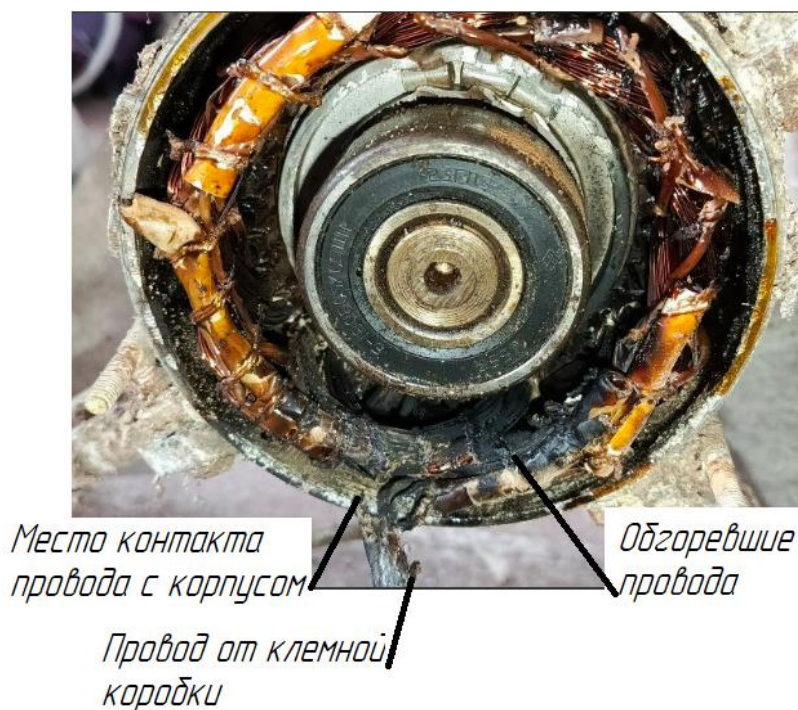


Рисунок 2 – Вид на внутреннюю часть электродвигателя вентилятора

На момент несчастного случая исправные вентиляторы были включены. На вентилятор к которому прикоснулся несовершеннолетний Г. тоже было подано напряжение, при этом вентилятор не работал, корпус вентилятора был под напряжением 220 В.

Несовершеннолетний Г. видел, что вентилятор не работает (лопасти не вращаются), поэтому без опасений коснулся его. Так как между корпусом вентилятора и металлической поилкой на которой стоял Г. не была выполнена система выравнивания потенциалов (п.1.7.173, п.1.7.174 ПУЭ), то через тело Г. протекает ток по пути фазный провод – корпус двигателя – тело Г. – металлическая поилка на которой стоит Г. – земля – заземляющее устройство трансформаторной подстанции. На рисунке 3 показана схема и путь протекания тока.

Если принять сопротивление тела Г. за 1000 Ом, напряжение на корпусе 220 В, то ток протекающий через тело составит  $220/1000=220$  мА.

Полученное значение больше не отпускающего тока 15-20 мА. При действии не отпускающего тока человек не в состоянии самостоятельно выйти из контакта с электрической цепью, поэтому Г. не смог сам освободиться или отойти от вентилятора. При этом величина протекающего тока недостаточна для срабатывания автоматического выключателя.

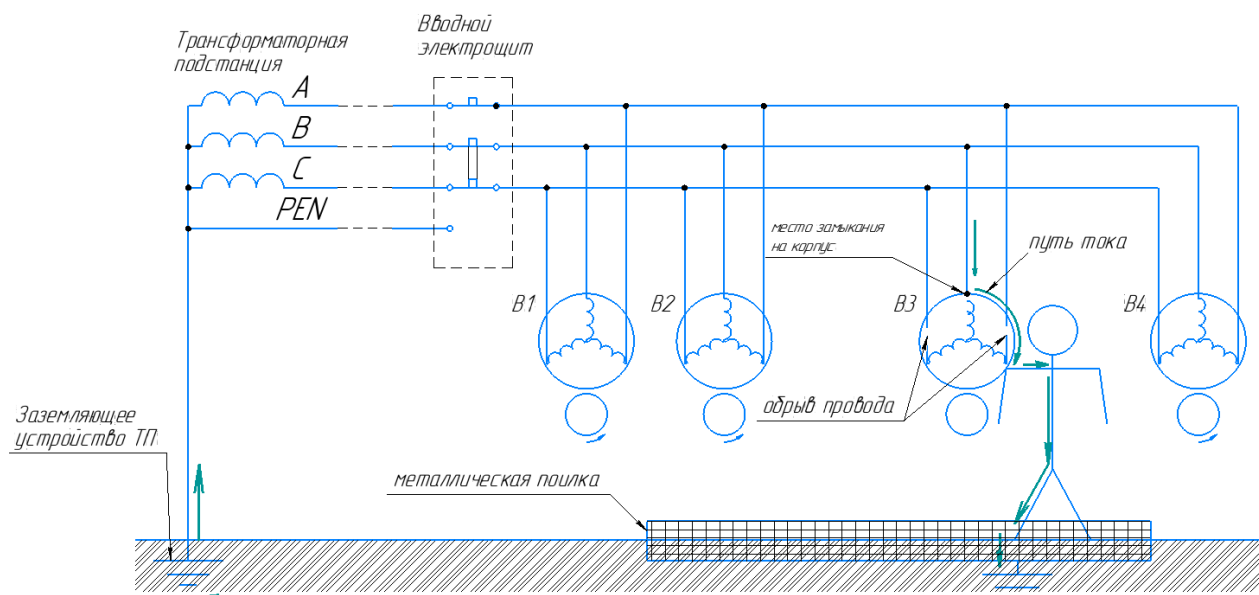


Рисунок 3 – Электрическая схема с места несчастного случая

Нарушения норм ПУЭ были допущены при монтаже вентиляторов и питающего провода, и не были устранены в процессе эксплуатации, так как были проигнорированы правила ПТЭЭП п.7 [2].

Устранение нарушений норм ПУЭ предполагает следующую минимально возможную совокупность мероприятий: повторное заземления на вводе в здание, использование 5-ти проводного питающего кабеля, заземление или зануление корпусов двигателей вентиляторов, выравнивание потенциалов.

Второй случай произошел в конце марта 2025 года по адресу г. Оренбург, пр. Победы 149/1. Вечером в субботу жители двух подъездов начали массово жаловаться на яркие вспышки лампочек, выход из строя бытовой техники подключенной к электросети продолжавшееся в течении 15 минут. Одновременно с этим на 10 этаже 2-го подъезда у одного из жителей произошел пробой питающего кабеля на заземленный квартирный электрощит. Пробой произошел вследствие некачественно проведенных электромонтажных работ, когда ввод кабеля в электрощит был проведен через самодельное, неаккуратное отверстие имеющие множество острых заусенцев. Подобные заусенцы в электрощитах имеются повсеместно на всех этажах.

Инструментальные замеры показали ток короткого в водном электрощите составляет 3000 А, напряжение во всех трех фазах 233 В. Вводный электрощит расположен в подвале первого подъезда, подвал сухой, электромонтаж выполнен на первый взгляд качественно, следов аварийных режимов работы не обнаружено, нулевой провод присоединен надежно.

Измерения в подъезде на разных этажах показали следующие результаты: ток короткого замыкания от 1100 до 1400 А, напряжение на разных этажах изменялось от 220 до 243 В. Такие результаты свидетельствуют о явном плохом контакте в нулевом проводе, либо обрыве нулевого провода.

При более подробном исследовании вводного электрощита выяснилось, что между нулевой шиной вводного электрощита и нулевой шиной распределительного электрощита нет перемычки. То есть электросеть двух

подъездов эксплуатировалась без нулевого «металлического» провода. Функцию нулевого провода выполняло заземление.

Замыкание фазного провода на заземленный электрощит приводит к смещению нейтральной точки в трехфазной нагрузке дома, в результате в квартиры на двух других фазах подается линейное напряжение 380В. Бытовая техника не рассчитана на такое напряжение и начинает выходить из строя. Аппараты защиты во вводном электрощите не срабатывают штатно, так как сопротивление линии ограничивается сопротивлением включенной бытовой техники, и сопротивлением «земли». Результат отсутствия «нуля» материальный ущерб двух подъездов 17 этажного дома. Кто виноват? – Застройщик и управляющая компания эксплуатирующая данное электрооборудование.

#### Список литературы

- 1 Правила устройства электроустановок (6-ое, 7-ое издание)
- 2 Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии. 2022 г.

