

СЕКЦИЯ 7

«НАУЧНО- МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИКИ»

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ РЗИА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗНЫХ СПОСОБОВ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ НА НАТУРНЫХ МОДЕЛЯХ Акпаев Н.А., Валиуллин К.Р., канд. техн. наук, доцент.....	1035
ВЫБОР МОЩНОСТИ БАТАРЕИ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ/ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ Андросов В.И., доцент, Ларькина А.А.	1041
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКИ Андросов В.И., доцент, Полякова Л.Ю., канд. техн. наук, доцент	1051
РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО ОШИБОЧНОМУ ПОДКЛЮЧЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЧЕТЧИКА Андросов В.И., доцент, Шарипова С.Г., канд. хим. наук, доцент	1054
АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ПОДВЕСНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ МЕТОДОМ ТЕПЛОВОЙ СИММЕТРИИ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗОРА Балтентеков М.Е., Валиуллин К.Р. кан. тех. наук, доцент	1056
СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ Булыгин Б.А., Влацкая Л.А., канд. техн. наук, доцент	1065
ОРГАНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ Быковская Л.В., канд. техн. наук, доцент, Быковский В.В., канд. техн. наук, доцент	1071
РАЗРАБОТКА МАССОВЫХ ОТКРЫТЫХ ОНЛАЙН КУРСОВ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ Быковская Л.В., канд. техн. наук, доцент, Ушакова Н.Ю., канд. техн. наук, доцент	1075
АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ ПРИМЕНИМОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ Валиуллин К.Р., канд. техн. наук, доцент, Шостак И.В.	1079
АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ВЫБОРА УСТАВОК РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ Валиуллин К.Р., канд. техн. наук, доцент, Козлов С.А.	1085
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОБИЛЬНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ Величко В.А., Косенко А.Д., канд. техн. наук, доцент.....	1091

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫБОРА ПРИОРИТЕТНОГО НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РАЙОНА ГОРОДА Влацкая Л.А., канд. техн. наук, доцент, Гусева Д.С.....	1096
АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПО ВЫБОРУ АЛГОРИТМА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДСТАНЦИЕЙ Влацкая Л.А., канд. техн. наук, доцент, Абсалямов А.А.....	1102
К ВОПРОСУ ИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ-ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКОВ Влацкая Л.А., канд. техн. наук, доцент, Сташкевич А.С.....	1107
АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ Глошкин П.А., Косенко А.Д., канд. техн. наук, доцент	1112
АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ Грачев Д.А., Соколов В.Ю., канд. техн. наук, доцент	1118
ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГРАММНЫМ СРЕДСТВАМ-ТРЕНАЖЕРАМ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ-ЭЛЕКТРИКОВ Комиссарова Т.В. ¹ , Семенова Н.Г. ² , д-р пед. наук, канд. техн. наук, профессор.....	1124
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА - КОСМИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ Коровин Н.В., Иванова А.П., д-р техн. наук, профессор.....	1129
АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОНОМНЫХ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ Коротков Н.В., Безгин А.С., канд. техн. наук, доцент	1133
ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА МАТНСАД ДЛЯ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ЦЕХОВОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ Косенко А.Д., канд. техн. наук, доцент, Юрченко Е.А.	1137
АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ НАХОЖДЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ЛЭП Кочетков Д.А., Семенова Н.Г., д-р пед. наук, канд. техн. наук, профессор ...	1142
SCADA-ПЛАТФОРМЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ: ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И СПЕЦИФИКА Ларькина А.А., Шарипова С.Г., канд. хим. наук, доцент	1148
ПРИМЕНЕНИЕ ТАБЛИЧНОГО ПРОЦЕССОРА MS EXCEL ПРИ РЕШЕНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ Ларькина А.А., Андросов В.И., доцент.....	1152
САУ БАРАБАННЫМ КОТЛОМ: ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ ЧЕТКОЙ ЛОГИКИ И КАСКАДНЫХ СХЕМ Ларькина А.А.	1157

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ РАЗЪЕМНЫХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ Масяев М.Н., Косенко А.Д., канд. техн. наук, доцент	1160
ИГРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ В ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ-ЭНЕРГЕТИКОВ Моисеев Д.А., Шинкарев В.В.	1165
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНТЕГРАЦИИ ПРАКТИЧЕСКИХ НАВЫКОВ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ПОДГОТОВКИ КАДРОВ Морозов В.А., Митрофанов С.В., канд. техн. наук, доцент	1169
АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ ОТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЛЭП 220 КВ Мягкенко Д.Ю., Быковская Л.В., канд. техн. наук	1174
АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ Рева К.Ю., Митрофанов С.В. канд. техн. наук, доцент	1179
АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ДАННЫХ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ Рыжков К.А., Косенко А.Д., канд. техн. наук, доцент	1188
АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПО ВЫБОРУ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ Семенова Н.Г., д-р пед. наук, канд. техн. наук, профессор; Ищенко Б.В.	1194
КОНЦЕПЦИЯ СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И УПРАВЛЕНИЯ НАГРУЗКАМИ Сильвашко С.А., канд. техн. наук, доцент, Татаренко Э.А.	1199
АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ Синявский И.И., Валиуллин К.Р., канд. техн. наук, доцент	1204
ОРГАНИЗАЦИЯ ОБМЕНА ДАННЫМИ МЕЖДУ ПЛК OMRON И ВНЕШНИМИ УСТРОЙСТВАМИ ПО ИНТЕРФЕЙСУ MODBUS RTU Смотрин В.А., Воронин Н.С., Сорокин В.А.	1215
АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ Соколов В.Ю., канд. техн. наук, доцент, Новиков И.К.	1223

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ Соколов В.Ю., канд. техн. наук, доцент, Мицура Д.И.	1229
АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ Соколов В.Ю., канд. техн. наук, доцент, Коротков В.В.	1235
АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ Сорокин М.А., Косенко А.Д. канд. техн. наук, доцент.	1240
АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОРИЕНТАЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ Токжанов Е.Е., Митрофанов С.В. канд. техн. наук, доцент	1246
ТЕХНОЦЕНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ СТРУКТУРНО-ВИДОВОЙ СБАЛАНСИРОВАННОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ЗАВОДА Туктамышев Р.И., Влацкая Л.А., канд. техн. наук, доцент.	1253
ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ СТЕНДЫ, КАК ДОПОЛНЕНИЕ К ТРАДИЦИОННЫМ ФОРМАМ АУДИТОРНОЙ РАБОТЫ Филяк М.М., канд. техн. наук, доцент, Шаршнев К. В.	1258
ПЛАТА СОПРЯЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ ТОКА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С МОДУЛЕМ АЦП Фролов С.С., канд. техн. наук, Иов К.С., Лукьянчиков А.А., Сохибназаров Х.А., Ямансарин И.И., канд. техн. наук, доцент	1262
ПРОМТИНГ В ПРЕПОДАВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН: ОПЫТ ИНТЕГРАЦИИ НА ОСНОВЕ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ «СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА» Ханжин С.В., Ханжина Н.В.	1266
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ УСТРОЙСТВА ЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛОГО ДОМА Шлейников В.Б., канд. техн. наук, Викторова Е.В.	1274
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ Шустиков А.А., Влацкая Л.А., канд. техн. наук, доцент	1279
О РАСПРЕДЕЛЕНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ Ямансарин И.И., канд. техн. наук, доцент, Падеев А.С., канд. техн. наук, доцент, Сурков Д.В., канд. техн. наук	1286

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ РЗА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗНЫХ СПОСОБОВ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ НА НАТУРНЫХ МОДЕЛЯХ

**Акпаев Н.А., Валиуллин К.Р., канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Развитие цифровых подстанций и переход на стандарт МЭК 61850 предъявляют новые требования к системам релейной защиты и автоматики (РЗА). В частности, возникает необходимость оценки применимости технологии GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) как альтернативы традиционным контрольным кабелям для передачи дискретных сигналов между устройствами защиты на подстанциях напряжением 6–10 кВ. Хотя стандарт МЭК 61850-8-1 предусматривает механизмы для надежной передачи данных, практические вопросы применимости GOOSE-сообщений, в частности их быстродействие, надежность функционирования блокировок и соответствие временных характеристик нормативным требованиям, остаются недостаточно изученными на натуральных моделях.

Целью исследования является экспериментальное сравнение характеристик системы РЗА при использовании двух способов передачи сигналов — сетевой (GOOSE) и проводной (контрольные кабели) — на натурной модели подстанции 6–10 кВ.

Испытательный стенд предназначен для исследования характеристик релейной защиты и автоматики (РЗА) цифровой подстанции 6–10 кВ при передаче дискретных сигналов по технологии GOOSE в соответствии с IEC 61850-8-1. Основная задача стенда — обеспечить сопоставление параметров быстродействия и функциональной надежности двух способов межустройственного обмена: традиционной передачи по контрольным кабелям и сетевой передачи по Ethernet (GOOSE) в идентичных режимах.

Испытательный стенд выполнен в виде модели схемы электроснабжения собственных нужд электростанции напряжением 6–10 кВ и включает коммутационные аппараты вводов, секционный выключатель и выключатель отходящей линии. Схема стенда предусматривает питание от источника с последующим распределением нагрузки по двум секциям шин через вводные выключатели ВВ-6(10) кВ 1с.ш. и ВВ-6(10) кВ 2с.ш., а также управление отходящим присоединением выключателем В-6(10) кВ. В рамках проводимых испытаний секционный выключатель СВ-6(10) кВ используется для имитации типовой конфигурации секционирования шин, при этом в отдельных режимах может находиться в отключенном состоянии согласно условиям испытаний.

Первичная схема электрических присоединений стенда представлена на рисунке 1. Схема включает три основные ветви:

Ток от источника питания (ЭС) проходит через вводные выключатели ВВ-6(10) кВ 1с.ш. и ВВ-6(10) кВ 2с.ш., затем распределяется на потребителей 1 секции шин и 2 секции шин.

Выключатель В-6(10) кВ управляет отходящей линией и оборудован защитами, реализованными на терминале SEPAM 80.

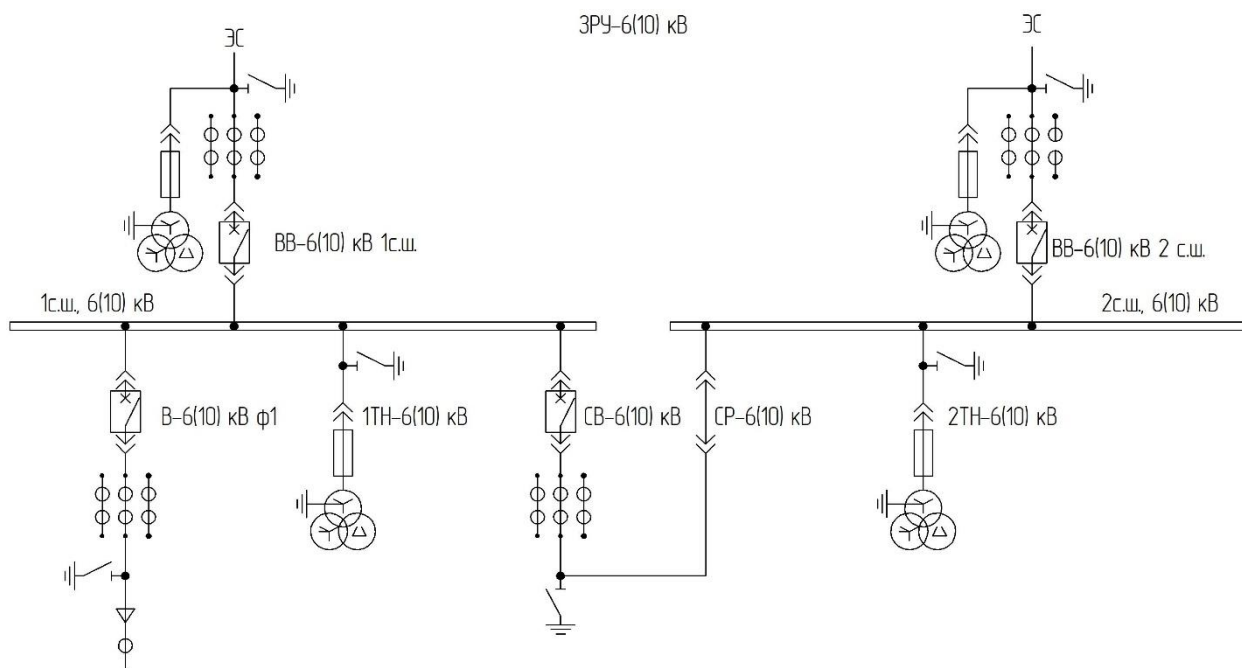


Рисунок 1 – Первичная схема испытательного стенда

Функции РЗА в составе стенда реализованы микропроцессорными терминалами SEPAM Series 80, обеспечивающими выполнение защит и автоматики присоединений, а также поддержку обмена по IEC 61850, включая передачу GOOSE-сообщений. Применение терминалов указанного класса позволяет воспроизводить типовые алгоритмы подстанционного уровня (блокировки, команды отключения/включения, сигналы готовности и межустройственные разрешения) и анализировать временные параметры их выполнения в зависимости от используемого канала связи.

Коммуникационная подсистема стенда построена на базе Ethernet-сети с использованием коммутатора и логики взаимодействия Publisher–Subscriber, принятой для GOOSE: одно устройство формирует (публикует) сообщения, а другие устройства принимают их в качестве подписчиков по мультикаст-адресации. Такой подход обеспечивает событийно-ориентированный обмен дискретными данными с минимальными задержками и является базовым механизмом реализации «горизонтальных» связей между IED на цифровых подстанциях.

Для обеспечения корректной сопоставимости результатов на стенде организованы два параллельных канала передачи дискретных сигналов между терминалами РЗА:

– сетевой канал (GOOSE): обмен осуществляется по Ethernet в соответствии с IEC 61850-8-1 с использованием механизма Publisher–Subscriber и мультикаст-доставки;

– каждый терминал SEPAM S80 оснащается модулем ACE850 - это 2-портовый модуль для релейных устройств серии SEPAM (40, 60, 80), предназначенный для подключения терминалов защиты к сети Ethernet;

– проводной канал (hardwired): эквивалентные сигналы передаются традиционно по дискретным входам/выходам через контрольные кабели.

Одновременная работа двух каналов позволяет выполнять сравнение задержек передачи, устойчивости блокировок и корректности функционирования защит в реальном времени при одинаковых воздействиях.

Испытательные воздействия (имитация аварийных и переходных режимов по токам/напряжениям) формируются программно-техническим комплексом РЕТОМ-61, предназначенным для проверки и наладки устройств РЗА различных поколений в ручном и автоматическом режимах. Функциональные возможности комплекса (генерация многоканальных токов и напряжений, регистрация реакций и временных параметров) обеспечивают воспроизводимость условий эксперимента и инструментальную основу для последующего анализа быстродействия и селективности защит.

В целом структура стенда обеспечивает выполнение экспериментальных исследований, ориентированных на оценку применимости GOOSE как замены части традиционных контрольных цепей, а также на определение требований к уставкам (в частности, выдержкам времени) при наличии сетевых межустройственных блокировок в логике защит подстанции 6–10 кВ.

Упрощенная схема взаимодействия шкафа с другими устройствами РЗА приведена на рисунке 2.

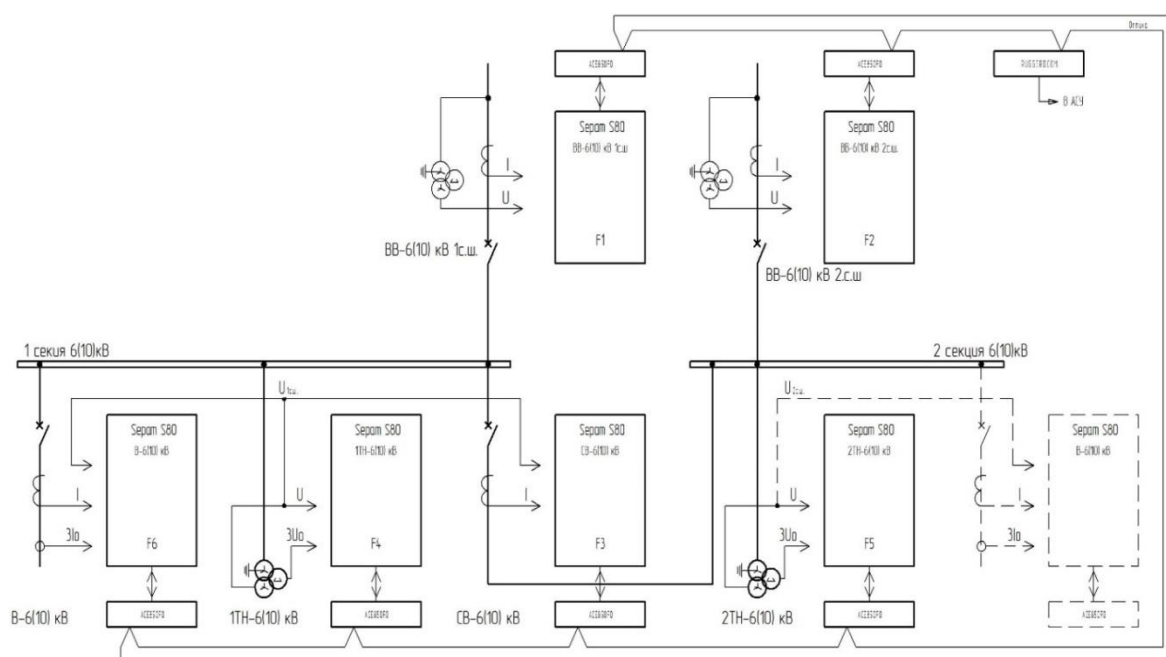


Рисунок 2 – Схема взаимодействия Sepam с другими устройствами РЗА
Архитектура РЗА:

Дифференциальная защита шин 6-10 кВ реализована на базе устройства SEPAM 80, которое получает информацию о токах и состояниях от терминалов через два параллельных канала:

1. Канал GOOSE: GOOSE-сообщения передаются по Ethernet-коммутатору в соответствии с IEC 61850-8-1.

2. Канал по контрольным кабелям: дискретные сигналы передаются по медным кабелям.

Оба канала работают одновременно, что позволяет сравнивать их характеристики в реальном времени.

Все установленные терминалы объединяются в единую систему связи с остальной инфраструктурой распределительного пункта, позволяя централизованно контролировать работу защитных функций и диагностировать состояние оборудования.

1) Подключение РЕТОМ-61 к SEPAM S80

РЕТОМ-61 подключается к SEPAM S80 по шести токовым каналам для имитации дифференциальной схемы. Прямые токи (I1, I2, I3) подаются на клеммы первой секции шин (ввод Q1+QG1), обратные токи (I4, I5, I6) — на отходящую линию. Разность токов $\Delta I = 0.2 I_n$ создает условие срабатывания ДЗШ. Напряжение на всех фазах устанавливается равным нулю (режим короткого замыкания).

2) Каналы блокировки между устройствами

Первый канал — GOOSE (основной): SEPAM S80 в режиме Publisher формирует сообщение G401 "Блок_ДЗШ" и рассылает его по мультикаст-адресу через Ethernet-коммутатор. SEPAM S80 на ВВ-10 1с.ш. в режиме Subscriber принимает GOOSE и активирует блокировку. Время жизни сообщения TTL = 5000 мс.

Второй канал — Hardwired (контрольный кабель): с выхода DO3 SEPAM S80 отходящей линии экранированный кабель КВВГ 2×1.5 подключается к дискретному входу DI1 SEPAM S80 вводного выключателя.

Проверяется наличие напряжения 220 В DC на обоих терминалах (. Светодиод POWER должен гореть зеленым. РЕТОМ-61 подключается к сети 220 В переменного тока, проводится самотестирование комплекса.

Физическая связь Ethernet проверяется по индикаторам LINK/ACTIVE на портах коммутатора. В программе SFT2841 GOOSE-монитор показывает активность канала G401 с периодичностью 5 секунд.

3) Настройка РЕТОМ-61

Комплекс переводится в режим T81 "Дифференциальная защита". Реле 1 — SEPAM S80 вводной выключатель, реле 2 — SEPAM S80 отходящая линия.

4) Проверочный запуск

Перед основными испытаниями подается нормальный ток 5А без аварийных параметров. Проверяется отсутствие ложных срабатываний, стабильность GOOSE-сообщений и активность всех каналов осциллографии. Журнал событий устройств должен показать статус «READY».

Процесс испытаний и результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Процесс испытания

№	Исходное состояние схемы стенда	Выполняемые действия	Работа РЗА	Заключение
1	Вводной выключатель включен, СВ отключен; выключатель отходящей линии включен.	Имитируется проходное КЗ через 1-ую с.ш. на отходящей линии (Подается 3-х фазный ток). Неполная ДЗШ с выдержкой времени 150 мс.	Пускается МТЗ отходящей линии, блокирует срабатывание неполной ДЗШ. С заданной выдержкой времени отключается выключатель отходящей линии и снимается блокировка неполной ДЗШ.	Неполная ДЗШ блокируется правильно.
2	Вводной выключатель включен; СВ отключен; выключатель отходящей линии включен.	Имитируется проходное КЗ через 1-ую с.ш. на отходящей линии (Подается 3-х фазный ток). Неполная ДЗШ с выдержкой времени 0 мс.	Пускается МТЗ отходящей линии и одновременно срабатывает неполная ДЗШ. Блокирующий срабатывание неполной ДЗШ сигнал приходит позже.	Неполная ДЗШ срабатывает правильно. Необходима выдержка времени на срабатывание неполной ДЗШ.

Таблица 2 - Замер времени работы неполной ДЗШ с выдержкой времени 0 мс.

	По GOOSE-сообщениям	По контрольным кабелям	Разница
Подача тока, мс	0	0	0
Время команды отключения неполной ДЗШ, мс	19		
Время подачи блокирующего сигнала от отходящей линии мс	33	24	9
Время приема блокирующего сигнала от отходящей линии в неполной ДЗШ , мс	35	29	6
Время команды отключения отходящей линии, мс	1008		
Время отключения выключателя, мс I101 (Включено) I102 (Отключено)	1017 1025		
Время снятия блокирующего сигнала от ОЛ, мс	1210	1214	-4
Время снятия блокирующего сигнала от ОЛ в неполной ДЗШ, мс	1212	1219	-7

Вывод: Функция дифференциальной защиты быстродействующая. Действующую выдержку времени неполной ДЗШ принимаем равной 150 мс.

Таблица 3 - Замер времени блокировки работы неполной ДЗШ

	По GOOSE-сообщениям	По контрольным кабелям	Разница
Подача тока, мс	0	0	0
Время подачи блокирующего сигнала от отходящей линии, мс	38	28	10
Время приема блокирующего сигнала от отходящей линии в неполной ДЗШ, мс	36	30	6
Время команды отключения отходящей линии (Sepam 80), мс	1008		
Время отключения выключателя, мс I101 (Включено) I102 (Отключено)	1016 1027		
Время снятия блокирующего сигнала от отходящей линии, мс	1212	1215	-3
Время снятия блокирующего сигнала от отходящей линии в неполной ДЗШ, мс	1214	1223	-9

Вывод: Больше время передачи по GOOSE-сообщениям обусловлено особенностями модуля связи Sepam. Времена прохождения сигналов по контрольным кабелям и по GOOSE-сообщениям соизмеримы. Блокировка неполной ДЗШ по контрольным кабелям и по GOOSE-сообщениям проходит надежно.

Список литературы

1. IEC 61850-8-1:2011. Communication networks and systems for power utility automation. Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2011. – URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/6021> (дата обращения: 02.01.2026).
2. Sepam series 20, series 40, series 60, series 80 – Digital protection relays: catalogue. – Schneider Electric, 2013. – URL: https://www1.lk.dk/flipbooks/Sepam_Catalogue_2013_Series_20-40-60-80_-_Digital_protection_relays/content/Sepam-20-40-60-80.pdf (дата обращения: 02.01.2026).
3. РЕТОМ-61 — устройство испытательное. – ЭНЕРГОСЕРВИСГРУПП, 2019. – URL: <https://energo-sg.ru/devices/retom-61-ustrojstvo-ispytatelnoe/> (дата обращения: 02.01.2026).

ВЫБОР МОЩНОСТИ БАТАРЕИ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ/ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Андросов В.И., доцент, Ларькина А.А.
Кумертауский филиал ОГУ

Компенсация реактивной мощности часто применяется для регулирования напряжения у потребителей. В качестве компенсирующих устройств (КУ) применяют батареи конденсаторов (БК). Для уменьшения перетоков реактивной мощности по линиям электропередач (ЛЭП) и трансформаторам, КУ должны размещаться вблизи мест потребления реактивной мощности. При этом элементы сети разгружаются по реактивной мощности. Это приводит к уменьшению потерь мощности и напряжения.

Если, батареи конденсаторов включаются последовательно с нагрузкой в конце ЛЭП, для уменьшения её индуктивного сопротивления – это **продольная компенсация**.

Если, батареи конденсаторов включаются параллельно нагрузке, для уменьшения её индуктивного сопротивления – это **поперечная компенсация**.

В обоих случаях подключение батареи конденсаторов приводит к увеличению напряжения на нагрузке. Типовая задача, которую необходимо решить формулируется так: ЛЭП имеет активное сопротивление R и реактивное X . Известны активная и реактивная мощности нагрузки сосредоточенной в конце линии. Напряжение на нагрузке до компенсации U_2 . Найти напряжение в начале линии U_1 . Рассчитать необходимую мощность батареи конденсаторов для продольной/поперечной компенсации, чтобы напряжение в конце линии после компенсации было равно $U_{2к}$, при том же напряжении U_1 .

Известные решения данной задачи, дают приближенный ответ [1, 2]. Это обусловлено тем, что при решении, напряжение U_2 в конце линии (на нагрузке) принимается вещественным, равным показанию вольтметра, в то время, как напряжение U_2 в конце линии величина комплексная.

Предлагаем точный расчет необходимой мощности батареи конденсаторов для продольной/поперечной компенсации. Порядок и алгоритм расчета показаны ниже на примерах.

Продольная компенсация реактивной мощности

Продольная компенсация обеспечивается последовательным включением в рассечку ЛЭП емкостного сопротивления. При этом уменьшается общее реактивное сопротивление ЛЭП, что приводит к уменьшению падения напряжения на линии и к увеличению напряжения на нагрузке.

Схема включения устройства продольной компенсации (УПК) показана на рисунке 1.

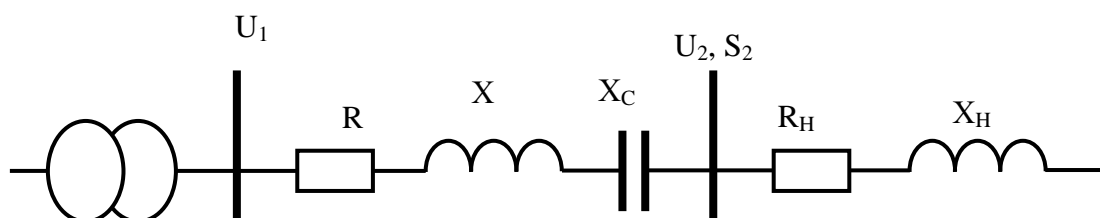


Рисунок 1 – Схема регулирования напряжения путем продольной компенсации

По условию, нам известны параметры режима работы линии, на её конце:
 S_2 - номинальная мощность нагрузки;
 U_2 - напряжение на нагрузке (в конце линии).

При изменении напряжения на нагрузке, изменяется её потребляемая мощность. Это еще сильнее усложнит решение, поэтому нагрузку представим эквивалентным сопротивлением:

$$Z_H = \frac{U_{2НОМ}^2}{\bar{S}_2} = R_H + jX_H$$

где \bar{S}_2 - комплексно-сопряженное значение номинальной мощности нагрузки;

$U_{2НОМ}$ - номинальное напряжение нагрузки.

Ток нагрузки до компенсации, он же и входной ток:

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_H} = \frac{U_2}{R_H + jX_H}$$

Сопротивление линии равно:

$$Z = R + jX$$

Напряжение на входе линии U_1 равно:

$$U_1 = \frac{U_2(Z + Z_H)}{Z_H} = \text{Re}U_1 + j \cdot \text{Im}U_1$$

Составим, уравнение для цепи до компенсации:

$$(R + jX) \cdot I_2 + U_2 = U_1$$

$$\frac{R + jX}{R_H + jX_H} \cdot U_2 + U_2 = U_1$$

$$\left(\frac{R + jX}{R_H + jX_H} + 1 \right) U_2 = U_1$$

Аналогичный результат получим при подключении УПК:

$$\left(\frac{R + jX - jX_C}{R_H + jX_H} + 1 \right) U_{2K} = U_1$$

где U_{2K} - напряжение на нагрузке после компенсации.
Преобразуем последнее выражение:

$$\left(\frac{R + jX}{R_H + jX_H} + 1 - \frac{jX_C}{R_H + jX_H} \right) \frac{U_2}{U_2} U_{2K} = U_1$$

$$\left(\frac{R + jX}{R_H + jX_H} + 1 - \frac{jX_C}{R_H + jX_H} \right) \frac{U_2}{U_2} = \frac{U_1}{U_{2K}}$$

$$\frac{U_1}{U_2} - \frac{jX_C}{R_H + jX_H} = \frac{U_1}{U_{2K}}$$

Считаем, что начальная фаза U_2 равна нулю. Напряжения U_{2K} и U_1 будут комплексными. Последнее уравнение представим в виде двух равенств: действительной и мнимой частей:

$$\frac{\operatorname{Re}U_1}{U_2} + \frac{j \cdot \operatorname{Im}U_1}{U_2} - \frac{jX_C}{R_H + jX_H} \cdot \frac{R_H - jX_H}{R_H - jX_H} = \frac{\operatorname{Re}U_1 + j \cdot \operatorname{Im}U_1}{\operatorname{Re}U_{2K} + j \cdot \operatorname{Im}U_{2K}} \cdot \frac{\operatorname{Re}U_{2K} - j \cdot \operatorname{Im}U_{2K}}{\operatorname{Re}U_{2K} - j \cdot \operatorname{Im}U_{2K}}$$

$$\frac{\operatorname{Re}U_1}{U_2} + j \frac{\operatorname{Im}U_1}{U_2} - \frac{jX_C (R_H - jX_H)}{R_H^2 + X_H^2} = \frac{(\operatorname{Re}U_1 + j \cdot \operatorname{Im}U_1) \cdot (\operatorname{Re}U_{2K} - j \cdot \operatorname{Im}U_{2K})}{(\operatorname{Re}U_{2K})^2 + (\operatorname{Im}U_{2K})^2}$$

Учтем, что:

$$|U_{2K}| = \sqrt{(\operatorname{Re}U_{2K})^2 + (\operatorname{Im}U_{2K})^2}$$

$$\operatorname{Re}U_{2K} = \sqrt{(|U_{2K}|)^2 - (\operatorname{Im}U_{2K})^2}$$

$$(|U_{2K}|)^2 = (\operatorname{Re}U_{2K})^2 + (\operatorname{Im}U_{2K})^2$$

Тогда

$$\frac{\operatorname{Re}U_1}{U_2} - \frac{X_C \cdot X_H}{R_H^2 + X_H^2} + j \left(\frac{\operatorname{Im}U_1}{U_2} - \frac{X_C \cdot R_H}{R_H^2 + X_H^2} \right) =$$

$$= \frac{\operatorname{Re}U_1 \cdot \operatorname{Re}U_{2K} + \operatorname{Im}U_1 \cdot \operatorname{Im}U_{2K}}{(|U_{2K}|)^2} + j \frac{\operatorname{Im}U_1 \cdot \operatorname{Re}U_{2K} - \operatorname{Re}U_1 \cdot \operatorname{Im}U_{2K}}{(|U_{2K}|)^2}$$

Или

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\operatorname{Re}U_1}{U_2} - \frac{X_C \cdot X_H}{R_H^2 + X_H^2} = \frac{\operatorname{Re}U_1 \cdot \sqrt{(|U_{2K}|)^2 - (\operatorname{Im}U_{2K})^2} + \operatorname{Im}U_1 \cdot \operatorname{Im}U_{2K}}{(|U_{2K}|)^2} \\ \frac{\operatorname{Im}U_1}{U_2} - \frac{X_C \cdot R_H}{R_H^2 + X_H^2} = \frac{\operatorname{Im}U_1 \cdot \sqrt{(|U_{2K}|)^2 - (\operatorname{Im}U_{2K})^2} - \operatorname{Re}U_1 \cdot \operatorname{Im}U_{2K}}{(|U_{2K}|)^2} \end{array} \right.$$

В этой системе уравнений два неизвестных параметра: X_C и $\operatorname{Im}U_{2K}$. Полученную систему уравнений легче решать численными методами.

Пример

Воздушная линия имеет активное сопротивление $R=100$ Ом, а реактивное $X=66$ Ом. Номинальная активная мощность нагрузки равна $P=20$ Вт, номинальная реактивная мощность $Q=42,9$ ВАр. Нагрузка сосредоточена в конце линии, её номинальное напряжение равно 220 В. Напряжение в конце линии до компенсации $U_2 = 217$ В. Найти напряжение в начале линии U_1 . Рассчитать мощность батареи конденсаторов для продольной компенсации, чтобы напряжение в конце линии после компенсации было равно $U_{2K} = 220$ В.

Решение

Полная номинальная мощность нагрузки равна:

$$S_2 = P_2 + jQ_2 = 20 + j42,9 \text{ ВА}$$

Полное сопротивление воздушной линии:

$$Z = R + jX = 100 + j66 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление нагрузки:

$$Z_H = \frac{U_{2НОМ}^2}{\overline{S_2}} = \frac{220^2}{20 - j42,9} = 432 + j927 \text{ Ом}$$

Напряжение на входе линии U_1 равно:

$$U_1 = \frac{U_2(Z + Z_H)}{Z_H} = \frac{217(100 + j66 + 432 + j927)}{432 + j927} = 238,656 - j13,318 \text{ В}$$

Показание вольтметра (модуль U_1):

$$|U_1| = 239 \text{ В}$$

Подставляем значения в систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{238,656}{217} - \frac{X_C \cdot 927}{432^2 + 927^2} = \frac{238,656 \cdot \sqrt{220^2 - (JmU_{2K})^2} - 13,318 \cdot JmU_{2K}}{220^2} \\ \frac{-13,318}{220} - \frac{X_C \cdot 432}{432^2 + 927^2} = \frac{-13,318 \cdot \sqrt{220^2 - (JmU_{2K})^2} - 238,656 \cdot (-13,318)}{220^2} \end{array} \right.$$

Решаем систему и получаем:

$$JmU_{2K} = 1,633 \text{ В}; X_C = 17,461 \text{ Ом}$$

$$\text{Re}U_{2K} = \sqrt{(|U_{2K}|)^2 - (JmU_{2K})^2} = \sqrt{220^2 - 1,633^2} = 219,994 \text{ В}$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = \frac{1}{314 \cdot 17,461} = 182,3 \text{ мкФ}$$

Для проверки выполним прямой расчет.

Входной ток

$$I_1 = \frac{U_1}{Z - jX_C + Z_H} = \frac{238,656 - j13,318}{100 + j66 - j17,461 + 432 + j927} = 0,092 - j0,194 \text{ А}$$

Напряжение на нагрузке после компенсации

$$U_{2K} = I_1 \cdot Z_H = (0,092 - j0,194) \cdot (432 + j927) = 219,994 + j1,633 \text{ В}$$

Показание вольтметра (модуль U_{2K}):

$$|U_{2K}| = 220 \text{ В}$$

Векторные диаграммы приведены на рисунке 2.

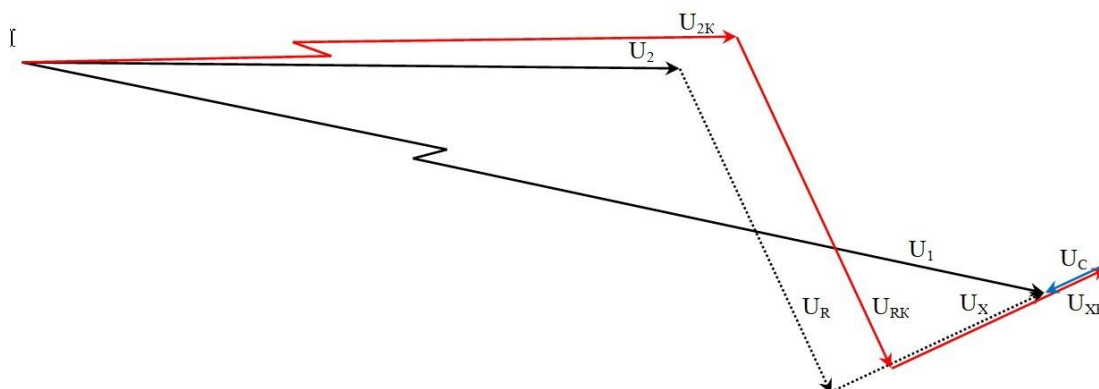


Рисунок 2 - Векторная диаграмма напряжений при использовании УПК

Поперечная компенсация реактивной мощности

Поперечная компенсация обеспечивается включением батареи конденсаторов параллельно нагрузке. При этом увеличивается общее реактивное сопротивление нагрузки, что приводит к уменьшению тока линии. Как следствие уменьшается падение напряжения на линии и увеличивается напряжение на нагрузке.

Схема включения устройства поперечной компенсации показана на рисунке 3.

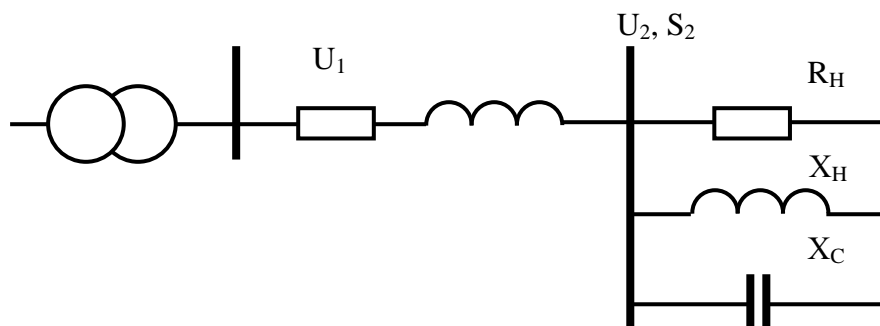


Рисунок 3 – Схема сети с устройством поперечной компенсации

По условию, нам известны параметры режима работы линии, на её конце:

S_2 - номинальная мощность нагрузки;

U_2 - напряжение на нагрузке (в конце линии).

Для упрощения расчетов представим нагрузку параллельно включенными эквивалентными сопротивлениями: R_H , X_H , X_C . Значения R_H , X_H найдем из заданной мощности нагрузки, сопротивление X_C - это искомое сопротивление компенсирующей установки.

$$R_H = \frac{U_{2НОМ}^2}{P_2}; \quad X_H = \frac{U_{2НОМ}^2}{Q_2}; \quad Z_H = \frac{R_H \cdot jX_H}{R_H + jX_H}$$

где $U_{2НОМ}$ - номинальное напряжение нагрузки.

Ток нагрузки до компенсации, он же входной ток:

$$I_2 = \frac{\overline{S}_2}{U_{2НОМ}}$$

где \overline{S}_2 - комплексно-сопряженное значение номинальной мощности нагрузки.

Сопротивление линии равно:

$$Z = R + jX$$

Напряжение на входе линии U_1 равно:

$$U_1 = \frac{U_2(Z + Z_H)}{Z_H} = \operatorname{Re}U_1 + j \cdot \operatorname{Im}U_1$$

Составим, уравнение для цепи при подключении компенсирующей установки:

$$Z \cdot I_{2К} + U_{2К} = U_1$$

$$Z \cdot \frac{U_{2К}}{Z_{HK}} + U_{2К} = U_1$$

$$\frac{Z}{Z_{HK}} + 1 = \frac{U_1}{U_{2К}}$$

где $U_{2К}$ - напряжение на нагрузке после компенсации;

$I_{2К}$ - ток через нагрузку после компенсации;

Z_{HK} - сопротивление нагрузки после компенсации.

Сопротивление нагрузки после компенсации - это три сопротивления R , X_L , X_C включенные параллельно. Их эквивалентное сопротивление равно:

$$Z_{HK} = \frac{1}{\frac{1}{R_H} + \frac{1}{jX_H} + \frac{1}{-jX_C}}$$

Подставим это выражение в предыдущее уравнение:

$$\frac{Z}{Z_{HK}} + 1 = \frac{U_1}{U_{2K}}$$

$$(R + jX) \left(\frac{1}{R_H} + \frac{1}{jX_H} + \frac{1}{-jX_C} \right) + 1 = \frac{U_1}{U_{2K}}$$

$$(R + jX) \left(\frac{1}{R_H} + \frac{1}{jX_H} \right) + (R + jX) \frac{1}{-jX_C} + 1 = \frac{U_1}{U_{2K}}$$

$$\frac{(R + jX)(R_H + jX_H)}{R_H jX_H} + j \frac{R + jX}{X_C} + 1 = \frac{U_1}{U_{2K}}$$

$$1 - \frac{X}{X_C} + \frac{R \cdot X_H + R_H \cdot X}{R_H X_H} + j \left(\frac{R}{X_C} + \frac{X \cdot X_H - R_H \cdot R}{R_H X_H} \right) = \frac{U_1}{U_{2K}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{X}{X_C} + \frac{R \cdot X_H + R_H \cdot X}{R_H X_H} = \frac{\operatorname{Re} U_1 \cdot \sqrt{(|U_{2K}|)^2 - (Jm U_{2K})^2} + Jm U_1 \cdot Jm U_{2K}}{(|U_{2K}|)^2} \\ \frac{R}{X_C} + \frac{X \cdot X_H - R_H \cdot R}{R_H X_H} = \frac{Jm U_1 \cdot \sqrt{(|U_{2K}|)^2 - (Jm U_{2K})^2} - \operatorname{Re} U_1 \cdot Jm U_{2K}}{(|U_{2K}|)^2} \end{array} \right.$$

В этой системе уравнений два неизвестных параметра: X_C и $Jm U_{2K}$. Полученную систему уравнений легче решать численными методами.

Пример

Воздушная линия имеет активное сопротивление $R=100$ Ом, а реактивное $X=66$ Ом. Номинальная активная мощность нагрузки равна $P=20$ Вт, номинальная реактивная мощность $Q=42,9$ ВАр. Нагрузка сосредоточена в конце линии, её номинальное напряжение равно 220 В. Напряжение в конце линии до компенсации $U_2 = 217$ В. Найти напряжение в начале линии U_1 . Рассчитать мощность батареи конденсаторов для продольной компенсации, чтобы напряжение в конце линии после компенсации было равно $U_{2K} = 220$ В.

Решение

Найдем значения R_H , X_H из заданной мощности нагрузки:

$$R_H = \frac{U_{2НОМ}^2}{P_2} = \frac{220^2}{20} = 2420 \text{ Ом}; \quad X_H = \frac{220^2}{42,9} = 1128 \text{ Ом};$$

Подставляем значения в систему:

$$\begin{cases} 1 - \frac{66}{X_C} + \frac{100 \cdot 1128 + 2420 \cdot 66}{2420 \cdot 1128} = \frac{238,656 \cdot \sqrt{220^2 - (JmU_{2K})^2} - 13,318 \cdot JmU_{2K}}{220^2} \\ \frac{100}{X_C} + \frac{66 \cdot 1128 - 2420 \cdot 100}{2420 \cdot 1128} = \frac{-13,318 \cdot \sqrt{220^2 - (JmU_{2K})^2} - 238,656 \cdot (-13,318)}{220^2} \end{cases}$$

Решаем систему и получаем:

$$JmU_{2K} = -4,154 \text{ В}; X_C = 4690 \text{ Ом}$$

$$\text{Re}U_{2K} = \sqrt{(|U_{2K}|)^2 - (JmU_{2K})^2} = \sqrt{220^2 - 4,154^2} = 219,96 \text{ В}$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = \frac{1}{314 \cdot 4690} = 0,6787 \text{ мкФ}$$

Для проверки выполним прямой расчет.

Сопrotивление нагрузки с учетом КУ:

$$Z_{HK} = \frac{1}{\frac{1}{R_H} + \frac{1}{jX_H} + \frac{1}{-jX_C}} = \frac{1}{\frac{1}{2420} + \frac{1}{j1128} + \frac{1}{-j4690}} = 662,348 + j1079 \text{ Ом}$$

Входной ток

$$I_1 = \frac{U_1}{Z + Z_{HK}} = \frac{238,656 - j13,318}{100 + j66 + 662,348 + j1079} = 0,088 - j0,15 \text{ А}$$

Напряжение на нагрузке после компенсации

$$U_{2K} = I_1 \cdot Z_{HK} = (0,088 - j0,15) \cdot (662,348 + j1079) = 219,961 - j4,154 \text{ В}$$

Показание вольтметра (модуль U_{2K}):

$$|U_{2K}| = 220 \text{ В}$$

Векторные диаграммы приведены на рисунке 4.

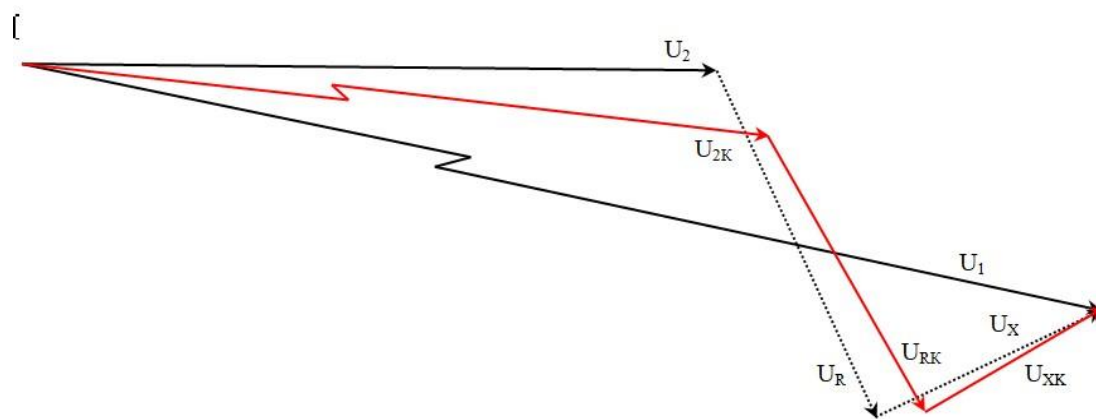


Рисунок 4 - Векторная диаграмма напряжений при поперечной компенсации

Выводы:

Предложена методика точного определения мощности батареи конденсаторов для продольной/поперечной компенсации.

Список литературы

1. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие / А.В. Кабышев: Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. - 234 с.
2. Манин А.В., Москалева О.А. Электрические сети Учебное пособие Рыбинск 2011

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКИ

Андросов В.И., доцент, Полякова Л.Ю., канд. техн. наук, доцент
Кумертауский филиал ОГУ

При выполнении лабораторных работ по дисциплинам направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника «Электроснабжение промышленных предприятий», «Автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии», «Эксплуатационный контроль и техническая диагностика электрооборудования», «Электрические станции и подстанции» и др., широко применяется блок индуктивной нагрузки (рисунок 1).

Блок индуктивной нагрузки предназначен для моделирования однофазных и трехфазных потребителей реактивной мощности с регулировкой шага 25%. Допустимая величина максимальной нагрузки 120 ВАр, при номинальном напряжении – 220 В.

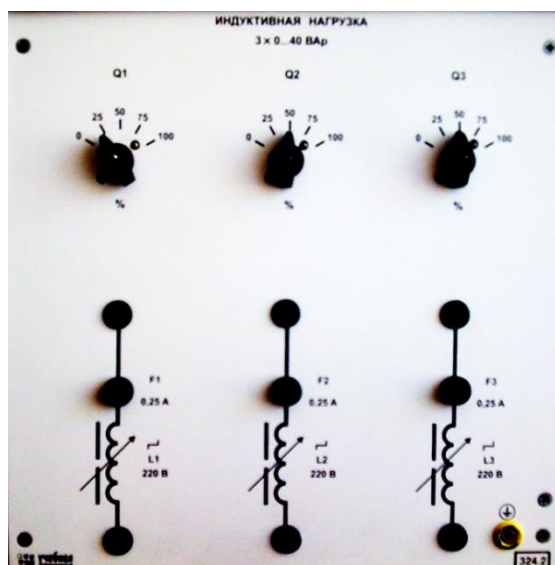


Рисунок 1 – Блок индуктивной нагрузки

Блок индуктивной нагрузки представляет собой три дросселя с отводами, для изменения их индуктивности. Как любой дроссель, индуктивная нагрузка имеет активную составляющую.

Значения измеренных параметров индуктивной нагрузки цифровым измерителем иммитанса E7-22 приведены в таблице 1. При измерении использовалась последовательная схема замещения. Частота измерения выбрана 120 Гц.

Таблица 1 - Параметры индуктивной нагрузки

Положение переключателя	Активное сопротивление R , Ом	Индуктивность L , Гн
25%	978,0	12,474

50%	475,5	6,064
75%	323,8	4,102
100%	244,6	3,015

По полученным экспериментальным значениям, рассчитаем:

- модуль полного сопротивления индуктивной нагрузки:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot L)^2} \quad (1)$$

- ток нагрузки, при номинальном напряжении 220 В:

$$|I| = \frac{220}{|Z|} \quad (2)$$

- активную и реактивную составляющие мощности нагрузки:

$$P = |I|^2 \cdot R \quad (3)$$

$$Q = |I|^2 \cdot X$$

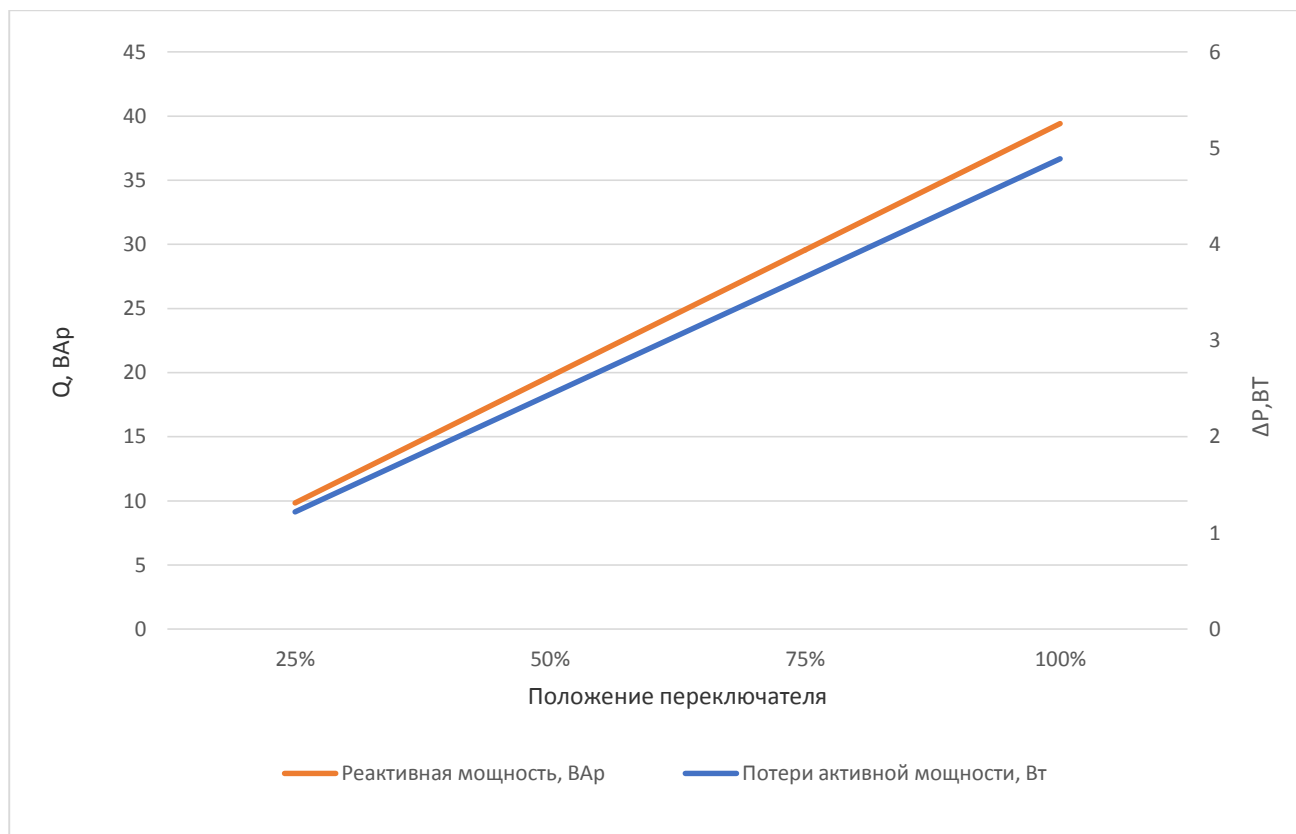
Результаты расчетов сведем в таблицу 2.

Таблица 2 - Расчетные параметры индуктивной нагрузки

Положение переключателя	Полное сопротивление, Ом	Ток, мА	Потери активной мощности, Вт	Реактивная мощность, ВАр
25%	4039	54,5	2,90	11,63
50%	1964	112,0	5,97	23,92
75%	1329	165,6	8,88	35,33
100%	978	224,9	12,37	47,90

При рассмотрении эквивалентной схемы замещения дросселя с отводами можно сказать, что дроссель содержит активное сопротивление обмотки, поэтому идет потребление активной мощности, которая может выделяться в виде тепла, то есть дроссель нагревается. Потери мощности при этом состоят из двух частей: потери мощности при протекании тока через активное сопротивление обмоток дросселя и потери на вихревые токи и перемагничивание сердечника.

При использовании индуктивной нагрузки в электрических цепях потери активной мощности возникают из-за избыточной реактивной мощности, которая нагружает сеть. Как элемент электрической цепи, индуктивная нагрузка, создавая магнитное поле, препятствует изменению тока, при этом ток отстаёт по фазе от напряжения.



Анализируя полученные экспериментальные данные, можно отметить, что индуктивная нагрузка потребляет значительную активную мощность, которой нельзя пренебрегать. Таким образом, при использовании в лабораторных работах блока индуктивной нагрузки, необходимо учитывать собственную активную мощность потерь в дросселях, особенно при задании больших значений индуктивной нагрузки.

Список литературы

1. Карпеш М.А., Сенигов П.Н. Производство электрической энергии. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ПЭЭ.001 РБЭ (933). - Челябинск: Инженерно-производственный центр «Учебная техника», 2021. – 94 с.
2. Устройства электропитания радиоэлектронных средств: учебное пособие: / С. С. Гарматюк, А. И. Панычев, А. А. Ваганова, К. В. Марков; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Южный федеральный университет, 2021. – 385 с.

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО ОШИБОЧНОМУ ПОДКЛЮЧЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЧЕТЧИКА

Андросов В.И., доцент, Шарипова С.Г., канд. хим. наук, доцент
Кумертауский филиал ОГУ

В рамках изучения дисциплины «Автоматизированные системы коммерческого учета электрической энергии» важное место занимает формирование практических навыков работы с приборами учета электрической энергии. Освоение принципов функционирования и схем включения счетчиков является необходимым условием для подготовки квалифицированных специалистов в области электроэнергетики и эксплуатации систем учета.

При выполнении лабораторных работ по дисциплине «Автоматизированные системы коммерческого учета электрической энергии» используются стенды с товарным знаком ГалСен ООО «ИПЦ «Учебная техника». Лабораторные работы выполняются согласно, руководства по выполнению базовых экспериментов ИЭЭ.001 РБЭ (916.3), которое поставляется совместно со стендом [1].

В ходе выполнения лабораторных работ собираются и исследуются наиболее распространённые на практике схемы правильного включения счетчиков электрической энергии. Вместе с тем опыт эксплуатации систем учета электрической энергии показывает, что обслуживающий персонал должен не только знать нормативные схемы подключения, но и понимать последствия, а также характер работы счетчиков при их неправильном подключении, поскольку подобные ошибки могут приводить к искажению показаний, снижению точности учета и возникновению коммерческих потерь.

Предлагаем имеющееся руководство [1] дополнить лабораторной работой измерения активной электрической энергии в трехфазной четырехпроводной сети переменного тока напряжением 230/380 В при прямом подключении счетчика, но с типовыми ошибками в подключении цепей тока и напряжения:

- включение в противофазе токовой обмотки фазы А;
- подключение цепи напряжения фазы А на фазу В и цепи напряжения фазы В на фазу А (взаимно переставлены);
- одновременное включение в противофазе токовой обмотки фазы А и не правильное подключение цепей напряжения фазы А и фазы В (взаимно переставлены).

Анализ работы счетчика, при каждом из перечисленных случаев неверного подключения, выполнять с обязательным построением векторной диаграммы и расчетом суммарной активной мощности, учитываемой счетчиком по формуле:

$$P=U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C \quad (1)$$

где U_A, U_B, U_C - фазные напряжения;

I_A, I_B, I_C - фазные токи;

$\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ - сдвиг между напряжением и током по каждой фазе.

Учитываемые счетчиком мощности: полную, активную, реактивную, фазные токи и напряжения, коэффициент мощности $\cos \varphi$ считывать с дисплея счетчика.

Эксперимент с неверным подключением счетчика, выполнить вначале для чисто активной нагрузки, затем тоже самое для комплексной нагрузки.

Выводы:

При выполнении лабораторных работ по дисциплине «Автоматизированные системы коммерческого учета электрической энергии» выполнять лабораторную работу измерения активной электрической энергии в трехфазной четырехпроводной сети переменного тока напряжением 230/380 В при прямом подключении счетчика, но с типовыми ошибками в подключении цепей тока и напряжения:

- включение в противофазе токовой обмотки фазы А;
- подключение цепи напряжения фазы А на фазу В и цепи напряжения фазы В на фазу А;
- одновременное включение в противофазе токовой обмотки фазы А и не правильное подключение цепей напряжения фазы А и фазы В.

Список литературы

1. Сенигов П.Н. Измерение электрической энергии. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ИЭЭ.001 РБЭ (916.3) – Челябинск: ИПЦ «Учебная техника», 2011. – 33 с.

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ПОДВЕСНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ МЕТОДОМ ТЕПЛОВОЙ СИММЕТРИИ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗОРА

Балтентеков М.Е., Валиуллин К.Р. кан. тех. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Актуальность темы исследования обусловлена Федеральным законом от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» [1]. Этот закон гласит, что мониторинг состояния электрооборудования проводится в целях формирования и реализации государственной политики в области обеспечения надежности и безопасности в сфере электроэнергетики, своевременного выявления, оценки и прогнозирования рисков.

По данным ПАО «Россети Волга» за 2024 г [2] одной из основных причин недопуска энергии является ремонт линий 35 кВ и выше, связанных с заменой устаревшего или дефектного оборудования. Данные приведены на рисунке 1

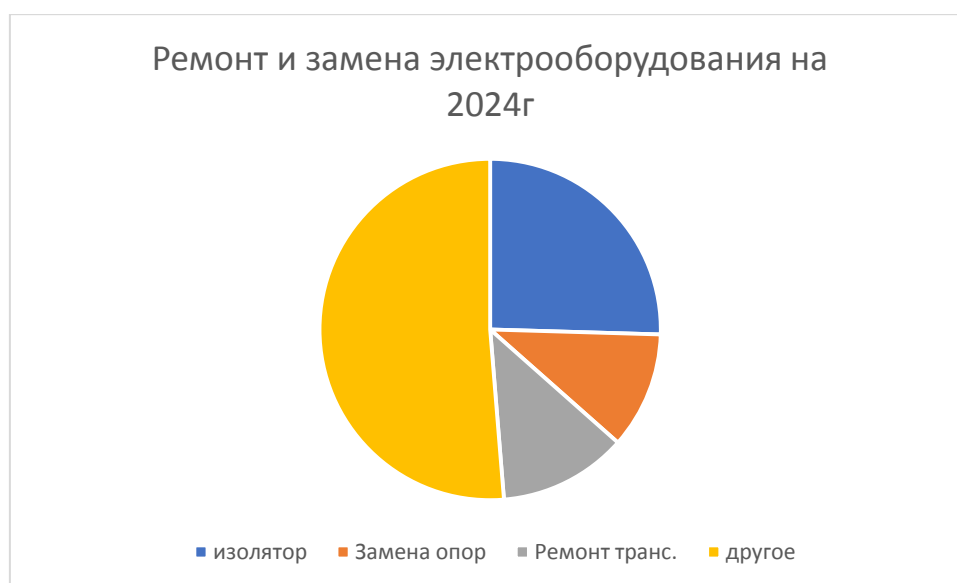
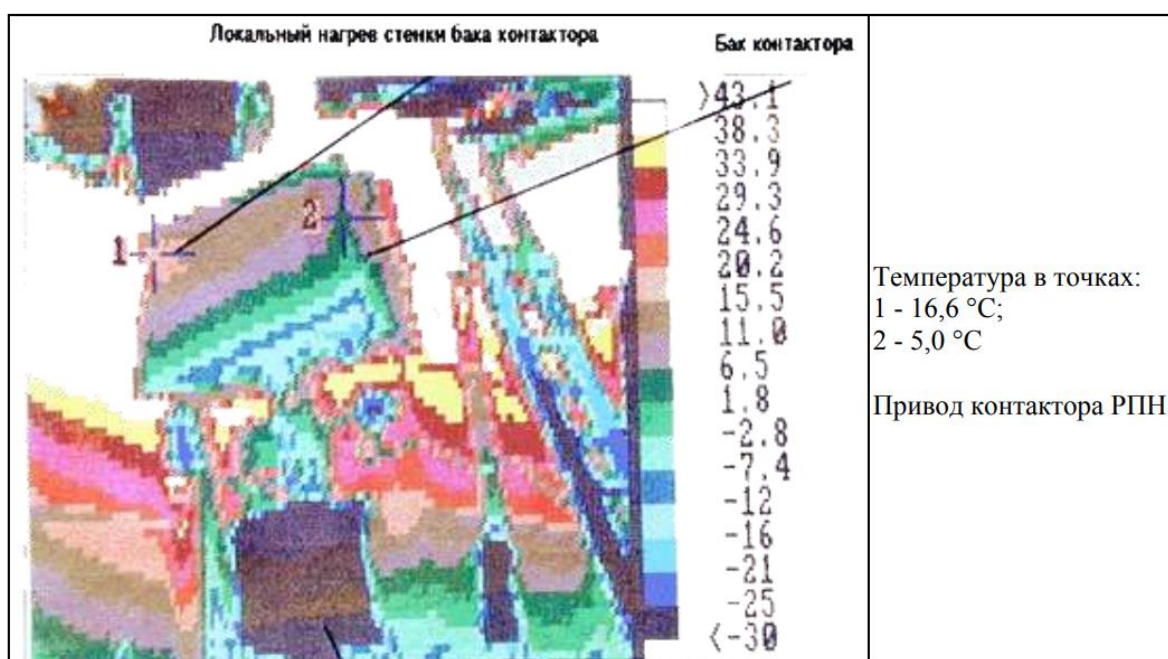


Рисунок 1 – Ремонт и замена электрооборудования за 2024г.

Для обеспечения надлежащего уровня надежности и безопасности в сфере энергетики требуется улучшение методов диагностики и прогнозирования дефектов на ранней стадии. Основным документом, регламентирующим основные положения методики диагностики электрооборудования и ВЛ, является РД 34.45-51.300-97 [3]. Методика предписывает обязательные условия проведения измерений для выявления скрытых дефектов контактных соединений и изоляции на ранней стадии. Так

как методику разработали в 1997-ом году она не позволяет в полной мере использовать возможности современных приборов. В настоящее время инженеры улучшили качество изображения тепловизора с 320×240 пикселей до 1280×1024 пикселей, что позволяет более детально взглянуть на объект и увидеть дефект на ранней стадии развития. Более наглядно разницу можно заметить на рисунке 2,3. На втором рисунке представлена фотография из РД 153-34.0-20.363-99[5]. На третьем рисунке представлен снимок с тепловизора Testo 890-2 качество которого при помощи технологии SuperResolution доходит до 1280x960 пикселей. Помимо улучшения качества изображения так же увеличилась и разрешающая способность, что в совокупности с улучшенным качеством изображения позволяет применять современные методы диагностики электрооборудования.



Термограмма бака контактора РПН с нагревом контакта одной из фаз

Рисунок 2 – Термограмма бака старого тепловизора.

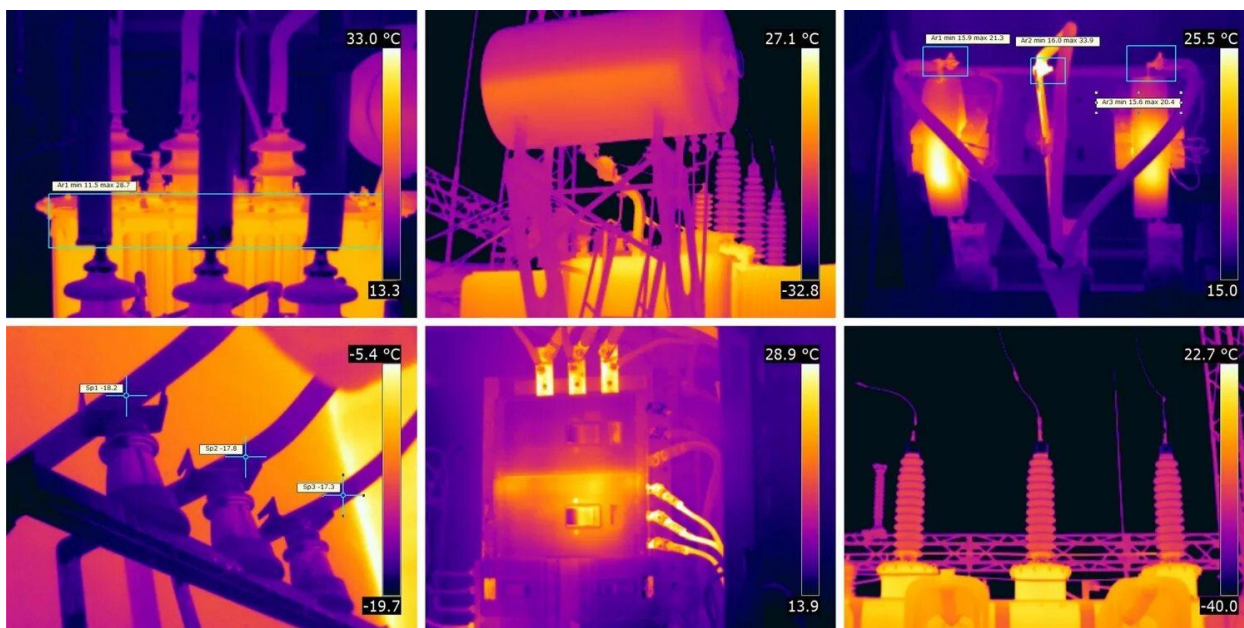


Рисунок 3 – Теловой снимок на новую модель тепловизора.

В связи с этим особое внимание уделяется разработке новых подходов к диагностике состояния изоляторов, позволяющих проводить мониторинг без отключения линии и с минимальными трудозатратами.

Анализ наутно-технической литературы позволил выделить 4 основных методов контроля состояния изоляторов. Кратко методы изложены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1 – ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ К ДИАГНОСТИКЕ ИЗОЛЯТОРОВ.

Метод контроля изоляторов	Принцип действия	Достоинства	Недостатки	Автор
1. Визуальный осмотр	Выявление дефектов по внешним признакам (трещины, сколы, загрязнения)	Простота выполнения. Низкая стоимость не требует специального оборудования	Невозможность выявления скрытых дефектов. Субъективность оценки состояния	–
2. Ультразвуковая диагностика	Контроль текущего состояния электрооборудования на месте его установки под рабочим напряжением в процессе нормальной эксплуатации, является метод контроля состояния высоковольтной изоляции оборудования по характеристикам частичных разрядов (ЧР).	Самый точный метод диагностики из всех представленных. Объект тестируется в процессе эксплуатации. Подключаются к работающему оборудованию в тех условиях, в которых оно находится постоянно, под напряжением и под полной нагрузкой.	Испытание повышенным напряжением само по себе является стрессом для оборудования. Кроме всего прочего, неуспешное испытание оборудования влечет за собой экономические потери в виде простоя.	Поляков Дмитрий Андреевич Никитин Константин Иванович Терещенко Надежда Андреевна Новосёлов Антон Сергеевич Билевич Ян Павлович
3. Традиционный метод ИК диагностики	Дистанционная регистрация инфракрасного излучения от поверхности для выявления локальных температурных аномалий, возникающих из-за дефектов, вызывающих увеличение тока утечки, перегрузки.	Не требует отключения ВЛ.	Невозможность оценить тепловую карту в полной мере.	–
4. Метод тепловой симметрии с	Анализ асимметрии температурного поля изолятора.	Высокая точность, возможность неразрушающего контроля.	Требуются дополнительные	М. А. Холмов, Н. А. Терещенко,

применением ДУ			устройства для диагностики	К. И. Никитин, В. П. Марковский
5. Измерение сопротивления изоляции	Определение уровня увлажнения и загрязнения изолятора через измерение сопротивления	Объективность результатов Возможность проведения в любое время года	Невозможность выявления локальных дефектов Требует отключения ВЛЭП	–

1. Визуальный осмотр.

Визуальный контроль представляет собой метод неразрушающего мониторинга, основанный на регистрации и анализе оптических признаков поверхности и геометрии изоляционных элементов гирлянды. Будучи исторически первым методом диагностики, в современной практике он эволюционировал от субъективной экспертной оценки к формализованной процедуре с применением средств машинного зрения и автоматизированного анализа данных. Его ключевая задача – идентификация макроскопических дефектов, проявляющихся в видимом диапазоне видимого спектра (380-780 НМ).

2 Ультразвуковая диагностика.

Ультразвуковая диагностика [4] представляет собой метод неразрушающего дистанционного контроля, основанный на регистрации акустических эмиссий в ультразвуковом диапазоне частот (обычно 20–100 кГц), генерируемых процессами частичных разрядов (ЧР) и коронных разрядов в изоляционных конструкциях, находящихся под рабочим напряжением. Физической основой метода является преобразование энергии электрических разрядов в акустические колебания, распространяющиеся в воздушной среде и регистрируемые направленными пьезоэлектрическими или конденсаторными микрофонами.

Метод позволяет косвенно, по уровню и характеру акустической эмиссии, оценивать интенсивность процессов ионизации и деградации диэлектрика. Ключевыми диагностическими параметрами являются:

- Спектральный состав акустического сигнала.
- Амплитуда ультразвуковых импульсов.
- Частота следования импульсов.
- Уровень фонового акустического давления в полосе УЗ.

Сопоставление этих параметров с эмпирически установленными пороговыми значениями позволяет выявлять:

- Начальные стадии дефектов изоляции (трещины, расслоения).
- Загрязнение и увлажнение изоляторов, приводящие к поверхностным перекрытиям.
- Дефекты контактных соединений и элементов арматуры, сопровождающиеся коронными разрядами.
- Локализацию источника разрядов за счёт использования параболических антенн или метода триангуляции.

Главным технологическим преимуществом метода является возможность его применения без отключения рабочего напряжения оборудования, что обеспечивает непрерывность энергоснабжения и позволяет проводить мониторинг в режиме реального времени.

3 Традиционный метод инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. Данный метод основан на анализе теплового снимка гирлянды подвесных изоляторов [5].

При возникновении дефекта в виде пробоя одного или нескольких изоляторов в гирлянде происходит перераспределение электрического потенциала. Рабочее напряжение, ранее равномерно распределенное между элементами гирлянды, концентрируется на исправных изоляторах. Это приводит к увеличению тока утечки через их диэлектрик и, как следствие, к повышенному нагреву. Соответственно, распределение температур по гирлянде начинает коррелировать с распределением электрического напряжения. Максимальный нагрев наблюдается на исправных изоляторах, непосредственно примыкающих к фазному проводу ВЛ, в то время как пробитые изоляторы, утратившие сопротивление, имеют температуру, практически равную температуре окружающей среды. Однако возникающий температурный контраст между дефектным и соседними исправными элементами является незначительным и обычно не превышает 0,3–0,5°C. Данный факт предъявляет высокие требования к тепловизору с разрешающей способностью не хуже 0,1°C

Методические требования к проведению инфракрасного контроля полученные в ходе лабораторных и натурных испытаний, позволили сформулировать комплекс обязательных условий для успешной диагностики:

1. Требования к оборудованию: для регистрации малых перепадов температур необходим тепловизор с высокой температурной разрешающей способностью (не ниже 0,1 °C), работающий в спектральном диапазоне 8–12 мкм, который оптимален для измерения температур, характерных для данных объектов.

2. Контроль должен осуществляться в статических условиях. Динамические измерения, например, с борта летательного аппарата, являются неэффективными из-за невозможности обеспечения необходимой стабилизации изображения и времени накопления сигнала. Также критически важно минимизировать влияние внешних климатических факторов: прямого солнечного излучения, ветра и осадков, которые могут существенно исказить тепловую картину.

3. Для обеспечения пространственного разрешения, позволяющего определить тепловое состояние каждого отдельного изолятора, необходимо вести съемку с расстояния, при котором это визуальное различие возможно, используя длиннофокусную оптику (телеобъектив).

Полученное ИК-изображение подлежит последующему анализу. Распределение температур вдоль гирлянды должно визуальным образом соответствовать модели электрического потенциального поля. Для количественной оценки рекомендуется строить температурный профиль (термопрофиль) по центральной оси гирлянды. На графике отчетливо должны фиксироваться точки минимальной температуры, соответствующие пробитым изоляторам, и область максимального нагрева в зоне крепления к фазному проводу. Таким образом, инфракрасная термография при строгом соблюдении методических требований представляет собой эффективный инструмент для дистанционного выявления дефектных изоляторов в гирляндах ВЛ.

4 Испытание состояния изоляторов ВЛЭП на основе анализа температурной симметрии.

Физический принцип метода диагностики на основе температурной симметрии [6].

Исправное состояние: В идеальном (бездефектном) изоляторе, находящемся под рабочим напряжением, ток утечки распределяется по его поверхности и объёму относительно равномерно. Согласно закону Джоуля–Ленца ($Q = I^2 \cdot R \cdot t$). При равномерном распределении параметров возникает постоянное во времени симметричное тепловое поле, отражающее однородность диэлектрических свойств и геометрии объекта.

Дефектное состояние: Наличие любого дефекта (внутреннего: микротрещины, расслоения; или внешнего: локального загрязнения, поверхностной эрозии) приводит к нарушению однородности удельного сопротивления в поражённой области. Это вызывает концентрацию линий тока утечки и, как следствие, локальное увеличение плотности тока в зоне дефекта. Поскольку тепловыделение носит квадратичную зависимость от тока, даже незначительная локальная аномалия тока утечки приводит к непропорционально большому локальному росту температуры.

Таким образом, нарушение симметрии установившегося температурного поля изолятора является прямым индикатором наличия дефекта, изменяющего его электрическую неоднородность. Количественной мерой данного нарушения служит разность температур между симметрично расположенными точками на противоположных сторонах или участках изолятора. Контроль данного параметра позволяет перейти от качественной тепловизионной оценки к выявлению дефекта на ранней стадии.

Разработанный метод термической диагностики состояния изоляторов ВЛЭП на основе анализа температурной симметрии был реализован с использованием специального диагностического устройства (ДУ), оснащённого контактными датчиками температуры, автономным питанием от литиевых батарей и возможностью передачи данных по каналу Bluetooth.

5 Измерение сопротивление изоляции.

Методика основана на прямом измерении эквивалентного сопротивления изоляции каждого отдельного изолятора в гирлянде в условиях эксплуатационного напряжения. Применяется для диагностики скрытых дефектов (трещин, загрязнений, ухудшения диэлектрических свойств) без демонтажа.

Метод измерения сопротивления изоляции ($R_{из}$) представляет собой прямой количественный способ оценки объемных и поверхностных диэлектрических свойств изолятора путём определения его активного сопротивления постоянному (реже переменному) току при приложении нормированного испытательного напряжения.

Физический принцип заключается в контроле величины тока утечки ($I_{ут}$), протекающего через тело и по поверхности изолятора под воздействием

постоянного напряжения ($U_{исп}$), и последующем расчёте сопротивления по закону Ома ($R_{из} = U_{исп}/I_{ут}$).

Измеренное значение $R_{из}$ является интегральным показателем, отражающим совокупное состояние изоляции:

- Степень увлажнённости диэлектрического материала (фарфора, стекла, полимера).
- Уровень поверхностного и объёмного загрязнения, особенно проводящими отложениями (соли, сажа, металлическая пыль).
- Наличие сквозных трещин или каналов, создающих проводящие мостики.
- Качество контакта диэлектрика с металлической арматурой (отсутствие рассучки).

Подводя итог, традиционные методы диагностики подвесных изоляторов имеют как явные достоинства, так и недостатки. Среди них особо выделяется тепловизионная диагностика своей простотой и эффективностью без больших финансовых вложений её модернизация, с использованием метода тепловой симметрии, позволит обеспечить безопасность и повышенную надежность ВЛ, что в свою очередь уменьшит экономические потери от недостачи энергии.

Список литературы

1. Федеральный закон от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике».
2. ПАО Россети Волга. информация об отключениях электроэнергии. <https://www.rossetivolga.ru/ru/klientam/goryachaya/grafikipla/>
3. РД 34.45-51.300-97. «Объем и нормы испытаний электрооборудования».
4. Повышение надежности электроснабжения посредством применения методики ультразвукового обследования изоляторов воздушных линий. Саримов Н.Ф. Грахов А.Ю.
5. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. РД 153-34.0-20.363-99.
6. Опытное испытание состояния изоляторов ВЛЭП 10 кВ на основе анализа температурной симметрии. М. А. Холмов, Н. А. Терещенко, К. И. Никитин, В. П.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Булыгин Б.А., Влацкая Л.А., канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

В приказе Министерства энергетики РФ от 12 августа 2022 г. № 811 «Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии» отмечено, что при эксплуатации электроустановок должны обеспечиваться [1]:

- содержание электроустановок в исправном состоянии и их безопасная эксплуатация;
- проведение регулярного технического обслуживания и ремонта электроустановок в целях поддержания их исправного состояния и безопасной эксплуатации;
- соответствие технических характеристик и параметров технологического режима работы электроустановок требованиям, обеспечивающим нахождение параметров электроэнергетического режима работы электроэнергетической системы (ЭЭС) в пределах допустимых значений.

Указанные требования распространяются и на силовые трансформаторы, которые являются одним из важнейших и наиболее дорогостоящим видом электрооборудования ЭЭС. Нормированный срок службы трансформаторов 6-10 кВ составляет около 25-30 лет. Однако, согласно статистическим данным значительное количество трансформаторов данного класса напряжения эксплуатируются за пределами своего ресурса – 74,1% от общего числа [2]. Ввиду этого необходимо осуществлять периодическую диагностику силовых трансформаторов и оценку их работоспособности с целью выявления неисправностей на ранних стадиях и предотвращения серьезных последствий.

Анализ работ [3, 4] показал, что существующие методы оценки технического состояния силовых трансформаторов не в полной мере позволяют выявлять неисправности оборудования в процессе эксплуатации. Поэтому разработка алгоритма оценки работоспособности силовых трансформаторов остается актуальной задачей.

В данной работе представлены результаты проведенного сравнения методов интеллектуального анализа, которые могут быть использованы для решения поставленной задачи. Анализ научно-технической литературы [5-9] позволил выделить четыре группы методов. Рассмотрим кратко каждую из них:

1) *Нечеткая логика и нечеткий вывод.*

Суть нечеткой логики заключается в формализации и моделировании рассуждений человека, оперирующих не точными числами, а качественными

понятиями, которые представлены в виде нечетких множеств [5, 7]. Этот подход базируется на математической теории, позволяющей градуировать принадлежность объекта к тому или иному классу, используя значения от 0 до 1. Таким образом, он преодолевает ограничения классической булевой логики, где истинность может быть только абсолютной. Основой для принятия решений служит система нечетких правил, сформулированных на естественном языке, что делает процесс интуитивно понятным.

Основное достоинство этого подхода – способность работать с неоднозначностью и неточными входными данными, что делает его близким к человеческому мышлению. Кроме того, создание понятных для экспертов правил обеспечивает относительную простоту разработки соответствующих систем.

Следует отметить и ряд существенных недостатков: для формирования корректной базы правил требуется привлечение экспертов, сам процесс создания и отладки таких систем часто трудоёмок, а тонкая настройка функций принадлежности и правил может быть сложной. При этом, несмотря на работу с неточностями, системы нечеткого вывода иногда демонстрируют недостаточную устойчивость к случайным помехам в данных, что требует дополнительных мер по повышению их надежности.

2) Искусственные нейронные сети.

Искусственная нейронная сеть (ИНС) представляет собой сложную вычислительную систему, состоящую из множества искусственно созданных элементов – нейронов, организованных в слои. Каждый нейрон обрабатывает входящие сигналы, вычисляет их взвешенную сумму, применяет нелинейную функцию активации и передает результат следующим нейронам [5, 8].

Основные достоинства нейронных сетей – это способность автоматически обучаться на сложных, многомерных данных, выявляя в них скрытые закономерности, что часто приводит к высокой точности прогнозов и адаптивности моделей. Это позволяет существенно улучшать качество принимаемых решений в таких областях, как распознавание образов и прогнозирование.

Однако указанные преимущества достигаются ценой серьёзных недостатков: для эффективного обучения, как правило, требуются огромные объемы размеченных данных, а сам процесс обучения обладает высокой вычислительной сложностью, требуя значительных ресурсов. Кроме того, внутренняя структура ИНС часто представляет собой «чёрный ящик», что делает интерпретацию их решений крайне трудоёмкой. Качество работы сети также сильно зависит от качества и характера обучающих данных и, без должных мер регуляризации, модели подвержены уязвимости к переобучению, когда они запоминают шум вместо общих закономерностей.

3) Кластерный анализ.

Суть кластерного анализа (КА) заключается в автоматической группировке объектов (данных) в однородные классы – кластеры – таким образом, чтобы элементы внутри одного кластера были максимально похожи, а

элементы разных кластеров – максимально различны [5, 6]. Разделение основывается на формальной мере сходства или расстояния между объектами, такой как евклидово расстояние или косинусная близость. Для этого используются различные алгоритмы, например, иерархические, которые строят древовидную структуру сходства, или центроидные, такие как k-means, итеративно минимизирующие разброс внутри групп. Конечная цель – сегментировать данные для упрощения их анализа, выявления аномалий или подготовки для других методов машинного обучения.

К достоинствам кластерного анализа относятся: способность выявлять скрытые структуры и закономерности в данных без заранее известных ответов, а также их эффективное упорядочивание для дальнейшего изучения. КА отличается гибкостью, так как может работать с данными разной природы, и создает динамичные системы классификации, адаптирующиеся к конкретной выборке.

Однако, кластеризация сопряжена с существенными недостатками: на этапе подготовки часто возникает трудность объективного определения оптимального количества кластеров, что требует дополнительных методов валидации. Интерпретация полученных групп и смысла найденных различий также может быть сложной задачей, требующей экспертных знаний в предметной области. Кроме того, результаты многих алгоритмов могут демонстрировать чувствительность к начальным условиям, что приводит к нестабильности и требует многократного запуска для получения надежного итога.

4) *Экспертные системы.*

Процесс получения результата в экспертных системах (ЭС) обычно включает несколько этапов: отбор экспертов; разработку методики сбора мнений (анкеты, интервью); проведение опросов и математико-статистическую обработку полученных данных для формирования согласованной позиции [5, 9]. Для повышения объективности часто применяются методы, минимизирующие прямое влияние участников друг на друга, такие как метод Дельфи или индивидуальные анонимные опросы. Итоговая оценка может быть представлена как в качественном, так и в количественном виде, например, в форме балльных шкал, ранжирования или прогнозных значений. ЭС незаменимы на начальных этапах исследования, при прогнозировании уникальных событий или оценке параметров, где отсутствуют статистические данные.

Достоинствами экспертных систем являются: гибкость и уникальность, позволяющие адаптировать процесс под любую специфическую проблему, а также универсальность применения в самых разных областях знания. ЭС отличаются относительной простотой использования, так как не требуют сложного математического аппарата на начальном этапе.

Однако, следует отметить и ряд существенных недостатков, главным из которых является субъективность выводов, проистекающая из личного опыта и взглядов экспертов. Результаты напрямую зависят от выбранных специалистов,

их компетентности и авторитета, при этом сами эксперты могут проявлять излишний оптимизм или пессимизм в своих суждениях. При групповой работе сильное влияние может оказывать эффект «группового мышления», подавляющий альтернативные мнения. Наконец, организацию процесса часто осложняют практические сложности с поиском и привлечением подходящих независимых экспертов, что может снижать достоверность итоговой оценки.

Изложенные выше достоинства и недостатки рассмотренных методов интеллектуального анализа сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнительная оценка методов интеллектуального анализа

Наименование методов	Достоинства	Недостатки
Нечеткая логика и нечеткий вывод	<ol style="list-style-type: none"> 1) Работа с неоднозначностью. 2) Работа с неточными данными. 3) Простота создания программ. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Необходимость привлечения экспертов. 2) Трудоёмкость алгоритмов. 3) Сложность настройки. 4) Устойчивость к помехам.
Искусственные нейронные сети	<ol style="list-style-type: none"> 1) Способность обучаться на сложных данных. 2) Высокая точность и адаптивность. 3) Решение нейтральных задач. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Необходимость больших объемов данных для обучения. 2) Высокая вычислительная сложность. 3) Трудоёмкость интерпретации или объяснения. 4) Зависимость от качества данных. 5) Уязвимость к переобучению.
Кластерный анализ	<ol style="list-style-type: none"> 1) Выявление скрытых структур и закономерностей. 2) Упорядочивание данных. 3) Гибкость данных. 4) Динамичность системы. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Трудность определения количества кластеров. 2) Сложность интерпретации. 3) Чувствительность к начальным условиям.
Экспертные системы	<ol style="list-style-type: none"> 1) Гибкость и уникальность. 2) Универсальность. 3) Простота использования. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Субъективность. 2) Излишний оптимизм или пессимизм в оценке. 3) Влияние «группового мышления». 4) Сложности с поиском подходящих экспертов.

Таким образом, кластерный анализ представляется наилучшим инструментом для оценки технического состояния силовых трансформаторов. Это подтверждается его способностью объективно выявлять группы аппаратов со схожим состоянием изоляции, нагрузочными характеристиками или дефектами на основе данных эксплуатационного мониторинга. Сформированные кластеры позволяют не только диагностировать текущее

состояние, но и прогнозировать остаточный ресурс оборудования, относящегося к определенной группе риска. КА эффективно работает с многопараметрическими данными, например, одновременно анализируя результаты хроматографии газов, виброакустических измерений и тепловизионного контроля. Автоматическое распределение трансформаторов по кластерам создает строгую основу для планирования ремонтов и оптимизации парка оборудования, минимизируя затраты и предотвращая внезапные отказы.

Список литературы

1 Приказ Министерства энергетики РФ от 12 августа 2022 г. № 811 «Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии». – Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=433499&ysclid=mkk46furuk230949319>. – дата обращения: 31.11.2025.

2 АО «Техническая инспекция ЕЭС» – Режим доступа: <https://www.ti-ees.ru/functioning/analytics/time/>. – дата обращения: 01.12.2025.

3 Хальясмаа А.И. Машинное обучение как инструмент повышения эффективности управления жизненным циклом высоковольтного электрооборудования / А.И. Хальясмаа. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/mashinnoe-obuchenie-kak-instrument-povysheniya-effektivnosti-upravleniya-zhiznennym-tsiklom-vysokovoltного-elektrooborudovaniya/viewer>. – дата обращения: 31.11.2025.

4 Петров А. М. интеллектуальная тепловая модель силового трансформатора на основе машинного обучения и анализа данных для мониторинга состояния / А. М. Петров. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnaya-teplovaya-model-silovogo-transformatora-na-osnove-mashinnogo-obucheniya-i-analiza-dannyh-dlya-monitoringa?ysclid=mkk5jo96q0790109137>. – дата обращения: 15.11.2025.

5 Семенова, Н. Г. Искусственный интеллект в задачах электроэнергетики: монография / Н. Г. Семенова, Л. А. Влацкая. – Оренбург: ОГУ, 2025. – 234 с.

6 Кетова, К. В. Применение кластерного анализа для решения задачи оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов / К. В. Кетова. – Режим доступа: <https://izdat.istu.ru/index.php/ISM/article/view/1348/161>. – дата обращения: 31.11.2025.

7 Бирюлин, В. И. Применение системы нечеткого вывода для оценки состояния изоляции кабельных линий / В. И. Бирюлин. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-sistemy-nechetkogo-vyvoda-dlya-otsenki-sostoyaniya-izolyatsii-kabelnyh-linij-1/viewer>. – дата обращения: 20.11.2025.

8 Хацевский, К. В. Применение нейронных сетей для решения задач электроэнергетики / Хацевский, К. В. – Режим доступа: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/97903/1/sueb_2021_046.pdf. – дата обращения: 20.10.2025.

9 Исламова, А. И. Применение экспертного метода для оценки рисков проектов, внедряемых в области электроэнергетики / А. И. Исламова. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-ekspertnogo-metoda-dlya-otsenki-riskov-proektov-vnedryaemyh-v-oblasti-elektroenergetiki/viewer>. – дата обращения: 20.11.2025.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Быковская Л.В., канд. техн. наук, доцент,

Быковский В.В., канд. техн. наук, доцент

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

Лабораторный практикум по электротехнике является неотъемлемой и важнейшей частью образовательного процесса для студентов технических специальностей. Он служит связующим звеном между теоретическими знаниями, полученными на лекциях, и их практическим применением. Грамотно организованный практикум способствует качественному освоению профессиональных компетенций и решает следующие задачи:

1) углубленное понимание теории через наглядную демонстрацию физических явлений и законов;

2) формирование практических навыков: работа с реальным оборудованием и измерительными приборами, сборка электрических схем, анализ результатов, поиск неисправностей;

3) развитие инженерного мышления: планирование эксперимента, интерпретация данных, формулировка выводов, осознание погрешностей.

Цель данной статьи: Осветить ключевые принципы, методы и современные тенденции в организации эффективного лабораторного практикума по электротехнике, направленного на формирование профессиональных компетенций будущих инженеров.

Организация практикума начинается с разработки его структуры, которая должна логично соотноситься с теоретическим курсом.

Количество лабораторных работ определяется рабочей программой дисциплины. Оборудование в лабораториях электротехники ИЭЭС (института энергетики, электроники и связи) Оренбургского государственного университета позволяет осуществлять эксперименты по всем разделам курса.

Каждое лабораторное занятие должно иметь четкую структуру:

1. Теоретическая подготовка: повторение лекционного материала, изучение теоретических основ исследуемых явлений.

2. Инструктаж по технике безопасности: обязательный и первоочередной элемент каждого занятия.

3. Сборка и исследование схемы: выполнение по методическим указаниям или собственному плану (для проектно-ориентированных работ).

4. Обработка результатов: выполнение расчетов, построение графиков, анализ погрешностей.

5. Формулировка выводов: связь полученных результатов с теорией, объяснение возможных расхождений.

Первая задача преподавателя при формировании структуры курса ТОЭ (теоретических основ электротехники) или общей электротехники – составление перечня лабораторных работ, исходя из количества академических часов, отведенных на лабораторный практикум. На этом этапе необходимо распределить лабораторные работы по всем темам курса и согласовать их с лекционным курсом. При решении этих задач возможно либо синхронизировать лекции и лабораторные работы по темам; либо при дефиците лекционных часов часть лабораторных работ выбрать по темам, не освещенным в лекциях. Во втором случае увеличивается количество вопросов, которые будут рассмотрены обучающимися в контакте с преподавателем.

На втором этапе преподаватель разрабатывает рабочую тетрадь для практикума. В неё включаются шаблоны протоколов для каждой лабораторной работы. Протокол содержит:

- 1) тему работы;
- 2) цель работы;
- 3) ход работы: шаблоны таблиц, графиков, место для векторных диаграмм, а также (по усмотрению преподавателя) расчеты, формулы, рекомендации по выбору масштабов при построениях, алгоритмы построений;
- 4) выводы;
- 5) контрольные вопросы для защиты лабораторной работы.

При составлении рабочей тетради преподаватель может корректировать ход экспериментов, добавлять или исключать опыты.

На третьем этапе требуется организовать выполнение экспериментов. Материально-техническое обеспечение - это основа практикума. Оно должно быть современным, безопасным и разнообразным. В лабораториях электротехники ИЭЭС ОГУ используются унифицированные лабораторные стенды, позволяющие выполнять эксперименты по электротехнике и электронике. Их преимущества – наглядность и отлаженность методик; модульный принцип: наборы источников питания, измерительных приборов, нагрузок (R , L , C), которые студенты комбинируют для сборки различных схем.

Обязательный элемент практикума - инструктаж по технике безопасности в лабораториях электротехники. На первом занятии проводится полный инструктаж, включающий:

- 1) возможные пути протекания тока через тело человека;
- 2) величины опасного и смертельного электрического тока для человека;
- 3) правила первой помощи при поражении электрическим током.

На последующих занятиях перед началом работ кратко повторяются основные правила безопасности.

Унифицированные стенды позволяют проводить лабораторные работы фронтальным методом (вся группа выполняет одну работу). Группа делится на бригады по два – четыре человека. Таким образом в малочисленных группах эксперименты выполняются одновременно всей группой. При численности группы более 20 человек для успешного освоения всех требуемых компетенции и освоения навыков работы с измерительным оборудованием рекомендуется

разделить группу на подгруппы. При таком подходе первая подгруппа защищает предыдущую работу в то время, когда вторая подгруппа выполняет эксперименты. По мере выполнения второй подгруппой опытов и освобождения рабочих стендов подгруппы меняются. Преподаватель должен следить за регламентом, время выполнения работы одной подгруппой не должно превышать одного академического часа. Для соблюдения регламента важным является способ формирования бригады. Если бригада состоит из четырех студентов, то в их числе должны быть и успешно обучающиеся, имеющие практические навыки по сборке электрических схем, например, выпускники колледжей; и студенты, слабоуспевающие по дисциплине.

При необходимости дистанционного обучения рекомендуется разработать комплект виртуальных лабораторных работ с использованием систем компьютерного моделирования. Желательно использовать программные продукты, позволяющие обучающимся использовать их бесплатно и онлайн, например, EasyEda.

Система оценивания выполненных обучающимися лабораторных работ должна иметь прозрачные критерии и включать оценку подготовки, понимания процесса работы, качества полученных результатов, грамотности и глубины выводов, оформления отчета.

Способ защиты лабораторной работы зависит от численности группы: в малочисленных группах возможно проведение устного индивидуального собеседования по контрольным вопросам к каждой лабораторной работе. Одновременно преподаватель и студент совместно анализируют представленные в отчете результаты. В группах с большим количеством обучающихся можно чередовать устное собеседование с письменным решением тестов и задач по индивидуальным заданиям.

Организация лабораторного практикума по электротехнике – это динамичный процесс, требующий постоянного обновления содержания, методов и технической базы в соответствии с современными образовательными стандартами.

Современный практикум сегодня – это синтез классических hands-on экспериментов с современными цифровыми технологиями, формирующий не просто исполнителя, а мыслящего и инициативного инженера, способного проектировать, исследовать и анализировать. Ключ к успеху – в системном подходе, где четкие учебные цели, современная материальная база, качественные методические материалы и квалифицированный преподавательский состав работают как единый механизм подготовки высококлассных специалистов.

Список литературы

1 Горбенко Ю. М., Шеин А. Н. Новые учебные планы и вопросы преподавания курса электротехники // Вологодские чтения. 2006. №61. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-uchebnye-plany-i-voprosy-prepodavaniya-kursa-elektrotehniki> (дата обращения: 09.01.2026).

2 Ушакова, Н. Ю. Трансформация дисциплины "Теоретические основы электротехники" [Электронный ресурс] / Н. Ю. Ушакова, Л. В. Быковская // 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. 1098-1101. . - 4 с.

3 Ушакова, Н. Ю. Исследование электрических цепей в облачном приложении EasyEDA [Электронный ресурс] : практикум для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки и специальностям, входящим в образовательную область "Инженерное дело, технологии и технические науки" / Н. Ю. Ушакова, Л. В. Быковская; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбург. гос. ун-т". - Оренбург : ОГУ, 2025. - ISBN 978-5-7410-3367-8. - 106 с

РАЗРАБОТКА МАССОВЫХ ОТКРЫТЫХ ОНЛАЙН КУРСОВ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Быковская Л.В., канд. техн. наук, доцент,

Ушакова Н.Ю., канд. техн. наук, доцент

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Оренбургский государственный университет»

Массовые открытые онлайн курсы (МООК) изначально разрабатывались как основной инструмент для полностью самостоятельного изучения обучающимися, как отдельных дисциплин, так и образовательных программ в целом. Они получили широкое распространение в дистанционном образовании, при получении второго образования, при профессиональной переподготовке, повышении квалификации, освоении новых компетенций [1].

Наиболее активно разработка МООК началась в период пандемии, когда образовательные организации массово переходили на дистант. Однако и после возврата к очному обучению формат МООК оказался востребованным и сегодня органично встраивается в формат обучения, дополняя традиционные формы занятий и предоставляя дополнительные возможности, как преподавателям, так и студентам.

По дисциплине «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) на кафедре автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники разработаны и зарегистрированы два курса МООК: «Теоретические основы электротехники (для неэлектротехнических направлений и специальностей)» (2024 г.) и «Теоретические основы электротехники (практикум по курсовой работе)» (2025 г.). Оба курса реализуются на базе системы Moodle. Курс ТОЭ_НЭ размещен и на портале Moored. Кроме того, для ведения занятий на ПО «Стрела» был сделан клон курса ТОЭ_НЭ_Стрела, учитывающий особенности образовательного процесса для студентов-производственников.

Поскольку курсы востребованы и активно используются студентами в учебном процессе, сегодня можно проанализировать их эффективность, оценить применение отдельных элементов, дать рекомендации по проектированию элементов курса.

Необходимость разработки курса «Теоретические основы электротехники (для неэлектротехнических направлений и специальностей)» (ТОЭ_НЭ) была вызвана в первую очередь малым количеством часов по фундаментальной дисциплине ТОЭ у ряда специальностей. Как правило, это 9 лекций и 8-9 лабораторных работ, практические занятия в учебном плане планируют очень редко. Поэтому главной целью этого курса было – дать базу для развития практических навыков расчета электрических и магнитных цепей в различных режимах работы, которые могут пригодиться в профессиональной деятельности.

Структура курса ТОЭ_НЭ традиционная. Материал разбит на четыре модуля и шесть недель обучения: Цепи постоянного тока (недели 1-2), Цепи синусоидального тока (недели 3-4), Трехфазные цепи (неделя 5), Нелинейные и магнитные цепи (неделя 6). На каждой неделе предусмотрены теоретическая лекция, видеоурок, контрольные мероприятия. Видеоуроки записаны как скринкасты, без видимости на экране лектора. Каждый модуль завершается тестом. По окончании курса предусмотрен итоговый тест.

На сегодняшний день курс ТОЭ_НЭ частично или полностью прошли 133 студента, курс ТОЭ_НЭ_Стрела – 52 студента.

Курс использовался:

- как осваиваемый полностью самостоятельно курс студентами, которые перевелись из других вузов или с других направлений и специальностей, для погашения академической разницы;

- как осваиваемый полностью самостоятельно курс студентами, не имеющими возможности посещать занятия (работа, маленький ребенок и т.п.);

- как краткий, удобный и справочный материал студентами всех форм обучения;

- для отработки пропущенных занятий студентами очной формы обучения;

- для контроля пройденного материала по темам и по курсу в целом.

Статистика использования некоторых элементов курса ТОЭ_НЭ показана на рисунке 1.






 Лекция 1 "Электрическая цепь и ее элементы"	Просмотрено 2919 раз(а) 64 пользователем(ями)
 Видеолекция 1 "Применение законов Ома и Кирхгофа для расчета простых электрических цепей"	Просмотрено 99 раз(а) 75 пользователем(ями)
 Лекция 2 "Методы расчета электрических цепей "	Просмотрено 1832 раз(а) 54 пользователем(ями)
 Видеолекция 2 "Расчет сложной электрической цепи по законам Кирхгофа"	Просмотрено 73 раз(а) 53 пользователем(ями)
 Тест по модулю 1 "Электрические цепи постоянного тока"	Просмотрено 993 раз(а) 120 пользователем(ями)

Рисунок 1 – Статистика использования элементов курса ТОЭ_НЭ

Следует отметить, что данная статистика не отражает реальное использование элементов, так при использовании курса в качестве справочных материалов студенты часто не проходят элемент до конца, поэтому выполнение элемента не фиксируется в системе.

Практика применения курса ТОЭ_НЭ показала, что для многоцелевого использования материалов курса:

– теоретическая лекция не должна быть объемной, материал в ней лучше располагать небольшими порциями;

– контрольные вопросы в лекции целесообразно располагать в конце, это удобнее для студентов при многократном обращении к материалу лекции;

– длительность видеоуроков 10-12 минут является слишком большой, внимание студентов начинает ослабевать после 5-6 минут видеопросмотра.

– слайды, используемые в видеоуроках должны быть динамичными, то есть текст диктора за кадром должен сопровождаться какими-либо действиями на экране, иначе внимание студента начинает рассеиваться.

Все эти выводы были учтены при разработке следующего курса MOOK - «Теоретические основы электротехники (практикум по курсовой работе)» (ТОЭ_КР).

Цель данного курса – систематизировать теоретические знания и помочь студенту успешно выполнить и защитить курсовую работу. В соответствии с целью была пересмотрена структура курса и основной упор был сделан на видеоуроки. Курс (ТОЭ_КР) содержит 5 лекций и 17 видеоуроков.

Лекции содержат базовый материал, необходимый для выполнения задач курсовой работы по четырем темам: магнитные цепи, трехфазные цепи, метод симметричных составляющих, переходные процессы. Материал лекций представлен в очень краткой и доступной для понимания форме: основные определения, основные формулы, алгоритмы расчета.

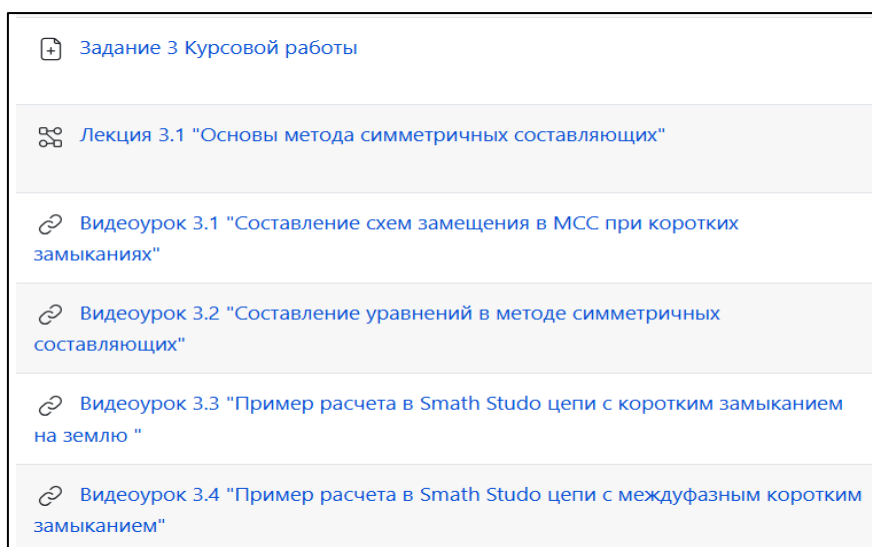


Рисунок 2 – Структура раздела по задаче курсовой работы в курсе ТОЭ_КР

В видеоуроках пошагово рассматривается ход выполнения каждой задачи. Длительность видеороликов варьируется от 4 до 7 минут. Голос преподавателя за кадром максимально дополняется визуальными действиями на слайдах, что делает показываемые в видеоуроке действия максимально понятными. Пример структуры раздела по одной из задач Курсовой работы показан на рисунке 2.

Поскольку выполнение курсовой работы ориентировано на использование в расчетах российской системы компьютерной математики Smath Studio [2], ряд видеороликов посвящен рассмотрению реализации расчета в Smath Studio. На реальных примерах рассматриваются особенности и наиболее проблемные моменты расчетов.

По каждой теме предусмотрены промежуточные тесты, курс завершается итоговым тестированием по всем разделам Курсовой работы.

В этом семестре курс ТОЭ_КР полностью или частично прошли 28 студентов группы 24ЭЭ(б)-2. Наиболее активно видеуроки использовались в сложных для понимания темах: метод симметричных составляющих, расчет переходного процесса классическим и операторным методом. Кроме того, курс помог студентам хорошо подготовиться к защите курсовой работы. Результатом использования курса ТОЭ_КР явилось то, что большая часть студентов успешно выполнила и защитила курсовую работу в срок.

Подводя итог, отметим, что массовые открытые онлайн курсы следует разрабатывать, так как они хорошо используются студентами. Но это должны быть многофункциональные курсы, помогающие в учебе студентам всех форм обучения и преподавателям, их применение не должно ограничиваться дистанционным обучением.

Список литературы

1 Быковская, Л. В. Опыт использования системы электронного обучения Moodle в преподавании электротехники в вузе / Л. В. Быковская, В. В. Быковский, Н. Ю. Ушакова // Известия Тульского государственного университета. Педагогика. – 2024. – № 1. – С. 8-13. – EDN CSVWPP.

2 Ушакова, Н. Ю. Расчет электрических цепей в SMath Studio [Электронный ресурс] : практикум для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям и специальностям подготовки, входящим в образовательную область "Инженерное дело, технологии и технические науки" / Н. Ю. Ушакова, Л. В. Быковская; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбург. гос. ун-т". - Оренбург : ОГУ, 2024. - ISBN 978-5-7410-3269-5. - 110 с- Загл. с тит. экрана.

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ ПРИМЕНИМОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

**Валиуллин К.Р., канд. техн. наук, доцент, Шостак И.В.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года (Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р) [1] обозначены перспективные направления в сфере энергетики, среди которых ключевое место занимает повышение надежности и эффективности электроэнергетического комплекса, а также внедрение цифровых технологий. В рамках достижения этих стратегических целей особое значение приобретает развитие методов технического диагностирования, позволяющих предотвращать аварии и оптимизировать эксплуатационные расходы.

Тепловизионный контроль занимает важное место в системе мониторинга состояния электрооборудования как эффективный метод неразрушающего контроля, позволяющий выявлять дефекты, связанные с аномальным нагревом элементов электроэнергетических систем. Однако его эффективность существенно зависит от множества факторов: метеорологических условий (температура, влажность, скорость ветра, солнечная радиация), режима работы оборудования и его конструктивных особенностей. Неучет этих факторов может привести к получению недостоверных результатов и, как следствие, к принятию некорректных решений по обслуживанию оборудования.

Требования к условиям проведения тепловизионного контроля регламентируются совокупностью нормативных документов различного уровня, включая государственные стандарты, отраслевые руководящие документы и методические рекомендации. Анализ практики их применения показывает, что данные требования представлены в разрозненном виде, имеют текстовую форму и зачастую не содержат формализованных критериев, что затрудняет их однозначную интерпретацию и использование в автоматизированных системах диагностики.

В связи с этим задача разработки нормативно-ориентированного подхода к автоматизации определения условий применимости тепловизионного контроля электрооборудования является актуальной.

Целью настоящей статьи является анализ научно-технической литературы в области автоматизации определения условий применимости тепловизионного контроля электрооборудования и обоснование целесообразности использования анализа нормативной документации и синтеза системы ограничений в качестве основного метода решения данной задачи.

К основным нормативным документам относятся Правила устройства электроустановок (ПУЭ), Правила технической эксплуатации электроустановок

потребителей (ПТЭЭП), ГОСТ Р 54852–2011, РД 34.45-51.300-97, а также отраслевые методические указания [3, 6, 7].

Анализ научно-технической литературы в области автоматизации определения условий применимости тепловизионного контроля электрооборудования позволил условно выделить четыре группы методов, которые могут быть использованы для решения указанной задачи:

- Экспертная система на основе базы правил.
- Машинное обучение (классификация на основе архивных данных).
- Анализ нормативной документации и синтез системы ограничений.
- Онлайн-платформа с интеграцией данных в реальном времени.

Рассмотрим кратко каждый из них.

Экспертная система на основе базы правил.

Метод экспертных систем (ЭС) на основе базы правил относится к направлениям искусственного интеллекта, а именно к системам, основанным на знаниях. Основан на аккумуляции и структуризации эмпирических знаний экспертов в области тепловизионного контроля, а также на анализе нормативно-технической документации.

Метод позволяет формализовать знания нормативной документации – требования стандартов, методических указаний и правил диагностики могут быть представлены в виде логических правил («если условие А и условие В выполнены — то метод применим/не применим»). Это позволяет устранить человеческую неопределённость и интерпретационные ошибки, свойственные текстовым документам.

Прямых публикаций, посвящённых экспертным системам для условий применимости ТВК, в открытых источниках немного, но в смежных областях диагностики электрооборудования и неразрушающего контроля экспертные подходы активно изучаются.

В ряде российских работ по интеллектуальным системам диагностики показано, как база правил связывает признаки технического состояния с выводами о категории состояния объекта, что аналогично задаче оценки условий применимости ТВК. Такие исследования выполняют Г. Г. Кашеварова и Ю. П. Тонков и др. (по экспертным системам диагностики технических объектов) [2].

К преимуществам метода можно отнести стабильность при необходимости принять решение в стандартных ситуациях и возможность дополнять базу правил по мере появления новых нормативных документов.

К недостаткам метода относятся сложности в принятии решения в нестандартных или противоречивых случаях, трудоёмкость составления базы знаний.

Машинное обучение (классификация на основе архивных данных).

Метод машинного обучения представляет собой алгоритмический подход к выявлению скрытых статистических закономерностей и построению предсказательных моделей на основе исторических данных. В основе данного подхода лежит построение математической модели, которая на основе

накопленных исторических данных способна автоматически относить текущую ситуацию к одному из заранее определённых классов, характеризующих допустимость или недопустимость применения конкретного метода диагностики, в том числе тепловизионного контроля.

Использование машинного обучения для автоматизации определения условий применимости тепловизионного контроля позволяет существенно сократить время принятия решений, повысить устойчивость результатов при обработке больших массивов данных и снизить влияние человеческого фактора. Такой подход особенно эффективен при наличии значительного объёма достоверных архивных данных, полученных в процессе длительной эксплуатации электроэнергетических объектов.

В трудах А. Г. Дьяконова [8] рассматриваются фундаментальные аспекты построения и интерпретации классификационных моделей для инженерных задач. Исследования Васильева И. С. [4], Попова Г. В., Игнатьева Е. Б. [5] посвящены интеллектуальной обработке диагностических данных и автоматизации оценки состояния электроэнергетического оборудования.

Методы машинного обучения обладают рядом ограничений при решении задачи определения условий применимости тепловизионного контроля. Ключевым недостатком является зависимость качества классификации от полноты и репрезентативности обучающей выборки. Кроме того, большинство моделей функционируют по принципу «чёрного ящика», что затрудняет интерпретацию причин принятия того или иного решения и не обеспечивает прямого соответствия действующим нормативным требованиям.

Онлайн-платформа с интеграцией данных в реальном времени.

Данный метод представляет собой системно-архитектурное решение и конечную практическую реализацию гибридной интеллектуальной системы. Основывается на том, что система в реальном времени собирает данные со всех доступных источников, автоматически оценивает условия и сама рекомендует оптимальные моменты для проведения обследования. Платформа предоставляет готовый инструмент для принятия решений «здесь и сейчас», сокращая время на согласования, поиск информации в разных источниках и рутинные расчеты.

Применение онлайн-платформ с интеграцией данных в реальном времени в задаче автоматизации условий применимости ТВК позволяет обеспечить непрерывный мониторинг условий, влияющих на результаты тепловизионного контроля, снизить зависимость от субъективной оценки оператора, повысить оперативность принятия решений — в том числе за счёт автоматических оповещений о нарушении условий, объединить нормативную базу и фактические данные в едином цифровом пространстве [8].

К ограничениям данного метода относятся высокая сложность и трудоемкость разработки и внедрения, зависимость от надежности и доступности внешних сервисов, а также высокие требования персоналу, которому будет необходимо познавать мир цифровизации и прислушиваться к решениям виртуального помощника.

Анализ нормативной документации и синтез системы ограничений.

Данный метод представляет собой фундаментальный содержательно-аналитический этап работы, предшествующий и формирующий основу для всех последующих алгоритмических и программных решений. В основе метода лежат принципы системного анализа и формализации предметной области. Он не является алгоритмом в чистом виде, а представляет собой методологию перевода текстовых, часто расплывчатых требований нормативных актов в строгую систему правил и ограничений. Это процесс извлечения и структурирования знаний, обязательных для исполнения. Метод основывается на сравнительном анализе для построения иерархической системы ограничений, используя данные различных документов, таких как ГОСТы, руководящие документы (РД), где требования более высокого уровня, такие как безопасность, имеют приоритет над требованиями более низкого (например, методические рекомендации). К преимуществам метода можно отнести систематизацию разрозненных требований, что позволяет создать единый, непротиворечивый свод правил; фундаментальность и обоснованность, где все выводы и синтезированные правила будут строго основываться на официальных документах; прямая применимость результата.

К ограничениям относятся трудоемкость, возможность запаздывания обновления нормативной базы при появлении новых технологий, а также риск создания излишне жесткой системы, или наоборот, риск поверхностного анализа.

Таким образом, этот метод совмещает в себе фундаментальность, четкость и систематизацию различных требований. Это позволяет рассматривать данный подход как наиболее перспективный с точки зрения автоматизации определения условий применимости тепловизионного контроля электрооборудования.

Изложенное выше нами сведено в таблицу 1.

Таблица 1 – Достоинства и недостатки различных методов автоматизации условий применимости тепловизионного контроля

Существующие методы тепловизионного контроля	Достоинства	Недостатки	ФИО ученых, использовавших метод для решения похожих задач
Экспертная система на основе базы правил	- Простота реализации и интерпретации результатов. - Высокая прозрачность и предсказуемость решений. - Быстрое выполнение для стандартных ситуаций.	- Низкая гибкость, неспособность к обучению. - Требуется трудоемкого предварительного описания всех возможных условий и правил. - Не справляется с нестандартными или	Кашеварова Г. В. Тонков Ю. П.

		противоречивыми случаями.	
Машинное обучение (классификация на основе архивных данных)	<ul style="list-style-type: none"> - Способность выявлять сложные, неочевидные зависимости между параметрами. - Высокая адаптивность и возможность улучшения по мере накопления данных. - Автоматизированная обработка большого объема факторов. 	<ul style="list-style-type: none"> - Требуется большого размеченного набора данных для обучения. - "Черный ящик": сложно интерпретировать, почему было принято то или иное решение. - Риск переобучения и некорректной работы на данных, не представленных в обучающей выборке. 	Смирнов К.Л. Васильев И.С.
Анализ нормативной документации и синтез системы ограничений	<ul style="list-style-type: none"> - Высокая научная и практическая новизна - Систематизация разрозненных требований. - Фундаментальность и обоснованность. - Прямая применимость результата. - Возможность выявления пробелов и противоречий. 	<ul style="list-style-type: none"> - Трудоемкость и объем. - Динамичность нормативной базы. - Риск поверхностного анализа. 	Власов В.Ф. Кошарный В.А.
Онлайн-платформа с интеграцией данных в реальном времени	<ul style="list-style-type: none"> - Принятие решений на основе актуальных данных (нагрузка, погода). - Возможность автоматического планирования и назначения времени контроля. - Интеграция в существующие системы управления активами. 	<ul style="list-style-type: none"> - Зависимость от надежности источников данных и каналов связи. - Высокие требования к кибербезопасности. - Сложность и стоимость внедрения. 	Сидоров Д.М. Короткова А. Н.

Таким образом, для решения поставленной задачи наиболее целесообразным является анализ нормативной документации и синтез системы ограничений. Данный методологический выбор обусловлен тем, что корректное применение тепловизионного контроля жестко регламентировано комплексом межгосударственных, национальных и отраслевых стандартов, правил и методических указаний. Систематизация и формализация этих разрозненных

требований в единую логическую модель является первостепенной задачей для последующей алгоритмизации процесса принятия решения.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 09 июня 2020 г. № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2020. — № 24. — Ст. 3834.
2. Кашеварова Г. В., Тонков Ю. П. Экспертная система для практической диагностики строительных конструкций // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. — 2016. — № 4. — С. 72–78.
3. ГОСТ 26629-85. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. — Введ. 1986-07-01. — М.: Издательство стандартов, 1985.
4. Васильев И. С. Применение методов машинного обучения для оценки технического состояния электроэнергетического оборудования // Электротехнические комплексы и системы управления. — 2020. — № 3. — С. 63–69.
5. Попов Г. В., Игнатъев Е. Б. Интеллектуальные системы диагностики электрооборудования энергетических объектов // Электрические станции. — 2011. — № 5. — С. 41–47.
6. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. 6-е изд., с изм. и доп. по состоянию на 01.03.2001. — М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2004. — 256 с. — ISBN 5-93196-101-1.
7. ПУЭ. Правила устройства электроустановок. Издание 7 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.elec.ru/library/direction/pue/razdel-1-8_7.html (дата обращения 20.10.2025).
8. Дьяконов А. Г. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / А. Г. Дьяконов. — Москва : ДМК Пресс, 2021. — 717 с. — ISBN 978-5-97060-894-5.
9. Короткова А. Н. Цифровые системы мониторинга технического состояния энергетических объектов // Вестник энергетики. — 2020. — № 2. — С. 54–60.

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ВЫБОРА УСТАВОК РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

**Валиуллин К.Р., канд. техн. наук, доцент, Козлов С.А.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Релейная защита электроэнергетических систем является одним из ключевых элементов обеспечения надёжности и безопасности электроснабжения. В соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ), а также требованиями, установленными приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 10.07.2020 № 546 «Об утверждении требований к релейной защите и автоматике различных видов и ее функционированию в составе энергосистемы», устройства релейной защиты должны обеспечивать селективное, чувствительное, быстродействующее и надёжное отключение повреждённых элементов энергосистемы при всех допустимых режимах её работы [1].

Указанные требования носят фундаментальный характер и лежат в основе всех методик расчёта и выбора уставок релейной защиты. Вместе с тем практическая реализация данных требований связана с объективными трудностями, поскольку показатели чувствительности, селективности и быстродействия защит зачастую вступают в противоречие друг с другом. Обеспечение надёжной отстройки от рабочих и переходных режимов, как правило, приводит к снижению чувствительности защит, тогда как достижение селективности требует либо введения выдержек времени, что снижает быстродействие защиты либо ограничения зоны действия, что отрицательно влияет на ее чувствительность.

В условиях указанных противоречий на практике приоритет, как правило, отдаётся быстродействию релейной защиты, что обусловлено необходимостью быстрого ограничения развития аварийных процессов в электроэнергетической системе [2]. При этом при возникновении противоречия между требованиями селективности и быстродействия в сетях высокого и сверхвысокого напряжения 110–750 кВ преимущество, как правило, отдаётся быстродействию защит, тогда как в сетях напряжением 6–10 кВ в ряде случаев допустимо приоритетное обеспечение селективного отключения повреждённых элементов.

В результате уставки релейных защит формируются на основе компромиссных инженерных решений, значительная часть которых опирается на практический опыт специалистов и устоявшиеся отраслевые рекомендации. При этом противоречия между требованиями обеспечения чувствительности защиты и её надёжной отстройки от неаварийных режимов в значительной степени закреплены в применяемых коэффициентах чувствительности, которые во многих случаях носят формализованный характер и требуют пересмотра,

поскольку не всегда имеют достаточную обоснованность применительно к конкретным условиям работы электроэнергетической системы.

Также стоит отметить, что большинство традиционных методик выбора уставок релейной защиты не учитывают вероятностный характер аварийных и эксплуатационных режимов работы электроэнергетических систем. Изменчивость нагрузок, режимов питания и параметров сети приводит к неопределённости исходных данных, которая не может быть адекватно описана фиксированными расчётными значениями.

Указанные обстоятельства обуславливают необходимость развития и применения методов выбора уставок релейной защиты, учитывающих неопределённость и вероятностную природу режимов работы электроэнергетических систем.

Поэтому, автоматизация выбора уставок релейной защиты с использованием вероятностного подхода является актуальной и значимой задачей.

Анализ научно-технической литературы в области «автоматизации выбора уставок релейной защиты с использованием вероятностного подхода» позволил условно выделить четыре группы методов исследования:

- Экспертно-руководящий метод (ЭРМ).
- Статический байесовский метод проверки гипотез.
- Стохастические алгоритмы релейной защиты.
- Метод селекции границ интервалов исходных и выходных данных (СГИД).

Рассмотрим кратко каждый из них.

Экспертно-руководящий метод (ЭРМ)

Экспертно-руководящий метод (ЭРМ) является наиболее распространённым традиционным способом выбора уставок релейной защиты. Он основан на применении расчётных токов короткого замыкания, нормативных коэффициентов чувствительности, а также инженерного опыта специалистов и типовых проектных решений [3, 4].

В рамках ЭРМ выбор уставок выполняется по наилучшим возможным режимам работы сети, что обеспечивает высокую надёжность защиты и устойчивость к переходным процессам. Однако данный метод не позволяет учитывать вероятностного характера аварийных и эксплуатационных режимов работы электроэнергетических систем, количественно оценить техническую эффективность защиты и, как правило, приводит к избыточному завышению уставок, что снижает чувствительность защит, особенно при удалённых повреждениях.

Статический байесовский метод проверки гипотез

Статический байесовский метод проверки гипотез при выборе уставок релейной защиты основан на статистической теории принятия решений и вероятностной проверке гипотез [5]. В рамках данного подхода функционирование защиты рассматривается как процесс выбора между

альтернативными гипотезами о состоянии объекта, например о наличии или отсутствии короткого замыкания.

Измеряемые электрические величины интерпретируются как случайные величины с различными распределениями вероятностей при нормальных и аварийных режимах. Уставка защиты задаёт границу области принятия решений, а её выбор осуществляется на основе минимизации среднего риска, учитывающего вероятности ложного срабатывания и отказа защиты, а также возможные последствия этих ошибок.

Байесовский подход позволяет строго формализовать компромисс между чувствительностью и надёжностью релейной защиты и учитывать информацию о вероятности возникновения аварийных режимов, а также автоматическая адаптация уставок к динамически изменяющимся параметрам системы. Однако практическая реализация данного метода связана с рядом трудностей. Основными из них являются необходимость получения достоверных статистических данных, сложность определения априорных распределений и высокая вычислительная сложность алгоритмов принятия решений.

Стохастические алгоритмы релейной защиты.

Стохастические алгоритмы релейной защиты являются развитием вероятностных методов и ориентированы на анализ измерительных сигналов как случайных процессов во времени [6]. В этих алгоритмах решение о срабатывании принимается на основе статистической обработки выборок токов и напряжений, а также анализа их корреляций и иных вероятностных характеристик.

Стохастические модели способствует повышению устойчивости релейных защит к переходным процессам и внешним помехам и допускает ограниченный, статистически обоснованный уровень ошибочных срабатываний по сравнению с детерминированными подходами. Одновременно обеспечивается рост чувствительности релейной защиты без ухудшения показателей селективности и быстродействия [7], что приводит к увеличению средней эффективности её функционирования в современных электроэнергетических системах.

Основным преимуществом стохастических алгоритмов является их высокая адаптивность и возможность интеллектуального анализа режимов. Вместе с тем данные методы требуют значительных вычислительных ресурсов и наличия достоверной статистической базы, что ограничивает их применение в традиционных системах релейной защиты.

Метод селекции границ интервалов исходных и выходных данных (СГИД)

Метод селекции границ интервалов исходных и выходных данных (СГИД) представляет собой формализованный подход к выбору уставок релейной защиты, основанный на вероятностной трактовке неопределённости параметров электроэнергетической системы. В отличие от экспертно-руководящего метода, в СГИД исходные параметры рассматриваются не как

фиксированные величины, а как значения, изменяющиеся в заданных интервалах [4].

В качестве интервальных параметров могут выступать токи короткого замыкания, сопротивления линий, режимы питания, нагрузки, а также погрешности измерительных каналов. Для каждого параметра задаются верхние и нижние границы, отражающие возможные условия эксплуатации. Уставки защиты выбираются таким образом, чтобы интервалы входных данных, соответствующие аварийным и неаварийным режимам, были максимально разделены по выходным признакам защиты.

Ключевым понятием метода СГИД является селекция границ интервалов, при которой обеспечивается корректная работа защиты при всех допустимых сочетаниях параметров. Это позволяет численно оценивать вероятность правильного срабатывания, отказа и ложного действия защиты. В рамках метода вводятся показатели технического эффекта и технической эффективности релейной защиты, что делает возможным количественное сравнение различных вариантов уставок [8, 9].

Преимуществом СГИД является его относительная простота по сравнению с классическими стохастическими методами и отсутствие необходимости в обширной статистической информации. Метод хорошо приспособлен для автоматизации и может быть реализован в современных микропроцессорных устройствах релейной защиты. Вместе с тем СГИД требует корректного задания интервалов параметров, что предполагает предварительный анализ режимов работы сети.

Краткая характеристика проанализированных методов представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Достоинства и недостатки различных методов автоматизации выбора уставок релейной защиты с использованием вероятностного подхода

Существующие методы тепловизионного контроля	Достоинства	Недостатки	ФИО Авторы
Экспертно-руководящий метод (ЭРМ)	- Простота разработки алгоритма расчета уставок - Большая распространенность	- Отсутствие объективного количественного критерия ограничений значений коэффициентов отстройки - не позволяет учитывать вероятностного характера аварийных и эксплуатационных режимов работы электроэнергетических систем	Федосеев А.М. Рубинчик В.А. и др.
Статический байесовский метод	- Высокая адаптивность и	- высокая вычислительная	Шарыгин М.В. Куликов А.Л.

проверки гипотез	возможность улучшения по мере накопления данных. - Автоматизированная обработка большого объема факторов.	сложность алгоритмов принятия решений. - необходимость получения большого объема достоверных статистических данных	
Стохастические алгоритмы релейных защит	- высокая адаптивность и возможность интеллектуального анализа режимов - невысокий риск ошибок	- требуют значительных вычислительных ресурсов и наличия достоверной статистической базы - Исход выходных данных невозможно заранее предсказать с абсолютной точностью - Риск поверхностного анализа.	Куликов А.Л. Клюкин А.Н.
Метод селекции границ интервалов исходных и выходных данных (СГИД)	- отсутствие необходимости в обширной статистической информации. - возможность сравнения диапазонов различных вариантов уставок и выбора более оптимального значения уставки	- требует корректного задания интервалов параметров, что предполагает предварительный анализ режимов работы сети.	Шмойлов А.В. Кривова Л.В.

Наиболее перспективным методов выбора уставок релейной защиты является СГИД, Данный методологический выбор обусловлен тем, что позволяет численно оценить эффективность работы релейной защиты и в тоже время не предъявляет чрезмерных требований к объему статистических данных и вычислительных ресурсов. Метод СГИД представляет собой компромисс между классическими и сложными стохастическими подходами.

Однако данный метод может быть улучшен за счет учета не только технического, но и экономического эффекта. Окончательный выбор уставки релейной защиты осуществляется на основе сопоставления технического эффекта и экономической целесообразности, что позволяет определить оптимальное значение уставки с учётом условий эксплуатации электроэнергетической системы.

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 2025.
2. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 10 июля 2020 г. № 546 «Об утверждении требований к релейной защите и

автоматике различных видов и её функционированию в составе энергосистемы». — Зарегистрирован в Минюсте РФ 23.10.2020, № 60537.

3. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем: Релейная защита в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1992.– 528 с.

4. Шмойлов А. В. Выбор и настройка ступеней токовых релейных защит. — Томск: Изд-во ТПУ, 2005. — 156 с.

5. Шарыгин М. В., Куликов А. Л. Определение уставок релейной защиты и автоматики, основанное на статистическом байесовском методе проверки гипотез // *Электричество*. — 2017. — № 7. — С. 20–29. — DOI: 10.24160/0013-5380-2017-7-20-29.

6. Куликов А. Л., Ключкин А. Н. Стохастические алгоритмы релейных защит электроэнергетических систем // *Электричество*. — 2010. — № 6. — С. 12–20.

7. Куликов А. Л., Ключкин А. Н. Повышение эффективности релейной защиты в сетях 110–750 кВ статистическими методами // *Вестник Чувашского университета*. — 2013. — № 3. — С. 197–204.

8. Шмойлов А. В. Технические характеристики и принципы настройки релейных защит электрических сетей. — Томск: Томский политехнический университет, 2008. — 112 с.

9. Кривова Л.В., Шмойлов А. В. Выбор и обоснование оборудования, токоведущих частей и коммутационных аппаратов с применением вероятностных технологий: Монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. –69 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОБИЛЬНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

**Величко В.А., Косенко А.Д., канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Высоковольтные электрические подстанции являются ключевыми узлами энергосистемы – они принимают участие в передаче и распределении электроэнергии и мощности. На территории распределительных устройств компактно сгруппировано большое количество электрооборудования, требующее регулярного осмотра и контроля для обеспечения безопасной и надежной работы. Одним из направлений неразрушающего контроля в электроустановках является тепловизионная диагностика, которая позволяет обнаруживать дефекты на ранних стадиях развития без вывода электрооборудования из работы, что позволяет проводить ремонты по техническому состоянию.

Приложение № 7 к Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года (далее – Стратегия) включает перечень технологий, оборудования, материалов и специализированного программного обеспечения, востребованного организациями топливно-энергетического комплекса Российской Федерации, создание или локализация производства которых необходимы на территории Российской Федерации до 2050 года. В разделе II указанного выше перечня в пункте 47 приведено следующее: «технологии самодиагностики первичного и вторичного оборудования подстанций, приборов учета электроэнергии с развитием средств предиктивной аналитики на основе технологий искусственного интеллекта и больших данных с разработкой сценариев возможных действий персонала» [1].

Исходя из вышеуказанного пункта Стратегии, применительно к тепловизионной диагностике электроустановок, актуальной является задача создания автоматизированного комплекса для сбора и обработки инфракрасных снимков электрооборудования подстанций. Подобная система позволит повысить надежность электрических сетей путем раннего выявления перегревов контактных соединений и других дефектов.

В рамках данной работы создание стационарного комплекса тепловизионной диагностики электроустановок не рассматривается, поскольку установка нескольких тепловизоров для съемки с разных ракурсов требует значительных капиталовложений.

Одним из первых шагов для проектирования мобильной системы автоматизированной тепловизионной диагностики (далее – МСАТД) является выбор роботизированной платформы. Перемещения измерительного оборудования по территории открытого распределительного устройства (далее

– ОРУ) сопряжено с рядом проблем. В их число входят сложные условия эксплуатации, такие как:

1. неровности поверхности, включающие: щебень, грязь, снег и лед, металлические части заземления, бетонные конструкции и т.д.;
2. электромагнитные поля высокой напряженности (далее – ЭМП);
3. сложные погодные условия: снег, дождь, порывы ветра.

В связи с вышеперечисленным для проектирования МСАТД требуется проанализировать существующие типы платформ и выбрать оптимальное решение для интеграции с тепловизором и нейросетевым анализатором.

Прежде чем приступать к классификации и анализу типов платформ требуется выделить ключевые параметры, необходимые для работы в условиях электрических подстанций:

1. проходимость по различным типам поверхностей;
2. уровень вибраций при перемещении, который может приводить к размытию изображений при съемке;
3. устойчивость к воздействию сильных электромагнитных полей;
4. время автономной работы;
5. стоимость платформы.

Одной из платформ, подходящих для реализации МСАТД, является колесная платформа. Она позволяет перемещать оборудование с достаточно высокой скоростью, обеспечивая при этом сравнительно низкое энергопотребление. Колесная платформа имеет относительно простое управление электроприводами [2]. В то же время в некоторых случаях проходимость её может быть недостаточна, так как небольшие колеса могут увязнуть в гравийной засыпке ОРУ. Кроме того, малый клиренс некоторых бюджетных моделей платформ может не позволять преодолевать препятствия выше определенного уровня, например, ступени.

Гусеничная платформа сочетает в себе высокую проходимость по щебню, грязи и глубокому снегу, а также оказывает меньшее давление на грунт по сравнению с колесными платформами, однако создает высокий уровень вибраций при движении [3]. В некоторых случаях траки гусениц могут разрушать покрытие при движении и поворотах. В связи с высоким уровнем вибраций тепловизионная съемка при помощи камеры, установленной на гусеничной платформе, будет наиболее эффективной из неподвижного состояния.

Четвероногие роботы так же могут быть использованы в качестве платформы для переноса тепловизионной камеры. Они имеют высокую адаптацию к рельефу местности – могут подниматься по ступеням, перешагивать или перепрыгивать через препятствия, идти по гравию [4]. Более того, четвероногие роботы способны изменять высоту «головы», что позволяет расширить число возможных ракурсов съемки. Тем не менее, такие роботы отличаются высокой сложностью алгоритмов управления приводами, а также очень высокой стоимостью платформы в целом [2].

Беспилотные летательные аппараты (далее – БПЛА) отличаются очень высокой скоростью перемещения, что позволяет проводить осмотры быстро. Для таких платформ преграды на земле не имеют большого значения, также им открыт доступ к высоко расположенным узлам линий электропередачи (далее – ЛЭП) и порталам ОРУ. Количество ракурсов съемки в теории ограничивается допустимыми расстояниями до токоведущих частей, а также окружающими аппарат конструкциями. Однако, за подобные преимущества приходится расплачиваться критическим риском падения на токоведущие части под напряжением, что может произойти при резком порыве ветра или отказе навигационных систем из-за электромагнитных помех [5]. К недостаткам БПЛА также можно отнести малое время полета по сравнению с наземными платформами.

Рельсовые системы, а также системы, перемещающиеся по проводам – позволяют обеспечивать высокую электробезопасность при проведении работ, так как двигаются по фиксированной траектории. Они могут получать постоянное питание от ЛЭП и не зависеть от аккумуляторов [6]. Однако, установка подобных систем на подстанциях сопряжена со значительными капиталовложениями, а также сложностью монтажа на действующих объектах электроэнергетики.

Результаты классификации различных типов мобильных роботизированных платформ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация мобильных роботизированных платформ для создания МСАТД

№	Тип платформы	Преимущества	Недостатки	Применимость в связке ИИ и тепловизор
1	Колесная (привод на четыре колеса большого диаметра)	<ul style="list-style-type: none"> - высокая плавность хода - относительно простое управление - высокая грузоподъемность - длительное время автономной работы - сравнительно низкая стоимость 	<ul style="list-style-type: none"> - ограниченное преодоление высоких препятствий (например, бордюров) - требует ровных дорожек или колес большого диаметра 	<ul style="list-style-type: none"> - лучший выбор: минимальные вибрации обеспечивают четкость термограмм для обработки нейросетью
2	Гусеничная	<ul style="list-style-type: none"> - высокая проходимость по грязи, снегу и гравию ОРУ 	<ul style="list-style-type: none"> - высокий уровень микровибраций, - может разрушать покрытие дорожек, - сложность в точном позиционировании (рывки при развороте) 	<ul style="list-style-type: none"> - средне: требует мощных программных или физических стабилизаторов изображения, подходит для съемки термограмм из неподвижного

				состояния
3	Четвероногий робот (шагающая)	- превосходная проходимость: - способность перепрыгивать препятствия, - подниматься по ступеням - возможность перемещать камеру вертикально для лучшего обзора	- очень высокая стоимость - сложность обслуживания - шумность - быстрый разряд аккумулятора	- хорошо, но экономически неоправданно для большинства исследовательских работ
4	БПЛА	- доступ к высоко расположенным объектам (порталы ОРУ, ЛЭП) - очень высокая скорость перемещения	- малое время работы от аккумуляторов - влияние ЭМП на навигацию - низкая электробезопасность из-за риска падения на токоведущие части	- ограниченно: сложно обеспечить частый или длительный мониторинг одного и того же узла
5	Рельсовая	- высокая точность перемещения - постоянное питание - высокая электробезопасность - низкий уровень вибраций	- стационарность (перемещение ограничено) - высокая стоимость монтажа	- хорошо подходит для закрытых распределительных устройств (далее – ЗРУ): благоприятные условия для обучения нейросетей на стабильных данных

Исходя из задачи перемещения МСАТД (включающей тепловизор, компьютер, мощные аккумуляторы и другое оборудование) по территории энергообъекта, наиболее подходящей мобильной роботизированной платформой признается колесная, с приводом на все четыре колеса. Подобный выбор позволяет выдвинуть следующие гипотезы:

1. качество данных: пневматические шины большого диаметра (например, 10 дюймов) работают как естественный демпфер. Они снижают «размытие» теплового пятна на тепловизионном снимке, что потенциально позволяет нейросети лучше обнаруживать дефекты;

2. энерговооруженность: возможность установить более емкий аккумулятор позволяет проводить циклы мониторинга по несколько часов, что затруднительно для БПЛА или шагающих роботов;

3. электромагнитная совместимость и устойчивость к воздействию ЭМП: колесное шасси позволяет легко экранировать отсек с оборудованием металлическим кожухом, что затруднительно для летающих платформ;

4. управляемость: при использовании векторного управления (от англ. Field-oriented control – FOC) достигается высокая точность движения, что позволяет нейросети сравнивать снимки одного и того же контактного соединения, сделанные в разные дни и приблизительно в одной и той же точке пространства.

Развитие темы представляет интерес для будущей практической реализации МСАТД – мобильной системы автоматизированной тепловизионной диагностики.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12.04.2025 № 908-р // Министерство энергетики Российской Федерации — URL: <https://minenergo.gov.ru/ministry/energy-strategy> (дата обращения: 10.01.2026).

2. Fan Y. et al. A review of quadruped robots: Structure, control, and autonomous motion //Advanced Intelligent Systems. – 2024. – Т. 6. – №. 6. – С. 2300783.

3. Wang H. et al. Vibration and image texture data fusion-based terrain classification using WKNN for tracked robots //World Electric Vehicle Journal. – 2023. – Т. 14. – №. 8. – С. 214.

4. Park H. W., Wensing P. M., Kim S. Jumping over obstacles with MIT Cheetah 2 //Robotics and Autonomous Systems. – 2021. – Т. 136. – С. 103703.

5. Li D. et al. A method for UAV inspection path planning based on safety distance in substation //Scientific Reports. – 2025.

6. Caxias J., Silva F. A., Sequeira J. Transmission line inspection robots: Design of the power supply system //2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. – IEEE, 2010. – С. 1-6.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫБОРА ПРИОРИТЕТНОГО НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РАЙОНА ГОРОДА

Влацкая Л.А., канд. техн. наук, доцент, Гусева Д.С.

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Оренбургский государственный университет»

Надежное и качественное электроснабжение потребителей является основой экономической стабильности и социального благополучия городских территорий. В соответствии с Федеральным законом № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» [1], одним из ключевых принципов организации отрасли выступает обеспечение единства технологического управления и надежного функционирования энергосистемы. Однако существующие распределительные сети городских районов зачастую работают в условиях, близких к предельным, что создает риски нарушения этого принципа. Федеральный закон № 35-ФЗ создает рамки, но внутри этих рамок доминирует краткосрочная экономическая логика, которая подавляет долгосрочное стратегическое планирование. Ограниченность ресурсов делает невозможным одновременную реализацию всех проектов развития, порождая необходимость выбора приоритетов. Несмотря на очевидную потребность в инструментах поддержки принятия таких решений, разработка автоматизированной системы выбора приоритетного направления развития систем электроснабжения (СЭС) района города часто сопровождается рядом системных изъянов и недостатков, которые снижают их практическую ценность и препятствуют их внедрению. Это связано со спецификой выбора приоритетного направления развития электроэнергетики в целом и систем электроснабжения в частности, которая заключается в:

- долгосрочном горизонте – проекты реализуются 3-7 лет, эффект проявляется 15-25 лет;
- комплексном подходе – требуются знания техники, экономики, экологии, социологии;
- высокой стоимости ошибки – инвестиции в электроснабжение измеряются миллиардами рублей;
- регуляторных ограничениях – жесткие требования технических регламентов.

Все вышесказанное требует всестороннего рассмотрения задачи выбора приоритетных направлений развития систем электроснабжения (СЭС) района города с учетом множества критериев и ограничений, среди которых:

- экономические, например, оценка стоимости реализации проекта; окупаемость инвестиций; потенциальная экономия энергоресурсов; повышение надежности электроснабжения;
- социальные – влияние проектируемых изменений на качество жизни населения, включая доступность электроэнергии, снижение аварийности и сокращение перебоев в электроснабжении;

– экологические, например, учет воздействия модернизации СЭС на окружающую среду; возможное снижение выбросов загрязняющих веществ; энергоэффективность применяемых технологий;

– регуляторные ограничения – соответствие электрических сетей техническим регламентам и стандартам; соблюдение требований законодательства в области энергетики и охраны окружающей среды;

– технические ограничения, например, наличие «узких мест» в состоянии существующих СЭС, таких как недостаточная пропускная способность линий или наличие оборудования с высокой степенью износа.

Актуальность данной работы обусловлена потребностью в преодолении типичных проблем в разработке алгоритма выбора приоритетного направления развития СЭС района города, основанного на методах многокритериального анализа. Программная реализация такого алгоритма позволит автоматизировать процесс принятия решения с учетом множества критериев и неопределенности, обеспечивая объективность и прозрачность выбора.

В данной статье представлены результаты сравнительного анализа методов, которые могут быть использованы для решения указанной задачи. В процессе анализа научно-технической литературы [2-6] все рассмотренные методы были условно распределены на три группы. Приведем краткую характеристику каждой из них.

К первой группе отнесены методы *экспертного оценивания (ЭО)*, под которыми принято понимать ряд предпринятых математически-логических процедур, направленных на получение данных, необходимых для принятия единственного правильного и взвешенного решения [2]. Согласно [3], методы ЭО представляют собой «организованную процедуру сбора, анализа и синтеза суждений специалистов, направленную на получение обоснованных выводов в условиях неполной информации». К этой группе отнесены: метод непосредственного оценивания, метод парных сравнений, метод обобщенных ранжировок, метод анализа иерархий и другие.

Основные достоинства методов экспертного оценивания:

– работа со сложными и не формализуемыми проблемами – позволяют оценивать факторы, которые невозможно измерить инструментально, например, политические риски, эстетичность дизайна, уровень инновации;

– относительная простота и гибкость – методологически менее сложны, чем многие математические модели;

– ускорение процесса легитимации решения, когда оно получает одобрение от признанных авторитетов в соответствующей области;

– задание формальных моделей, правил и методов, такие как теория вероятностей, математическая логика, теория оптимизации, которые превращают неформальную задачу выбора в четко определенную вычислительную проблему, решаемую алгоритмами системы.

Недостатки методов экспертного оценивания являются:

– субъективность – оценки зависят от личного опыта, симпатий, компетентности и даже текущего настроения эксперта;

– трудоемкость организации качественного процесса – для минимизации недостатков нужна тщательная подготовка: отбор экспертов, разработка сценария, многотуровые процедуры, что требует времени и ресурсов;

– сложность верификации и проверки – трудно объективно доказать, что итоговое решение – истинно лучшее, так как нет эталона для сравнения.

Таким образом, методы экспертного оценивания – мощный инструмент для работы со сложными, слабоструктурированными проблемами, где важны опыт и интуиция. Однако результаты методов этой группы сильно зависят от качества организации процесса и подбора экспертов. Их стоит рассматривать не как примитивный опрос, а как сложную процедуру, требующую профессионального подхода.

Во вторую группу отнесены *методы, сводящие задачу к однокритериальной*. Сущность таких методов заключается либо в замене исходной многокритериальной (многоцелевой) задачи принятия решения на задачу с единственным целевым показателем (метод аддитивной свертки, метод мультипликативной свертки, метод полезности), либо в сведении к решению одной или последовательности однокритериальных задач (метод выделения главного критерия, метод последовательных уступок). Первое достигается посредством объединения всех частных (локальных) критериев в один обобщенный (глобальный) критерий, который затем максимизируется или минимизируется [4].

Подиновский В.В. в работе [5] предложил аксиоматический подход к определению количественной важности локальных критериев и методы, основанные на этой теории.

Достоинства методов, сводящих задачу к однокритериальной:

– простота и понятность – при заданных весах можно легко проследить, почему одно решение (альтернатива) оказалось лучше другого;

– вычислительная эффективность – после построения обобщенного критерия задача решается одним прогоном стандартных алгоритмов оптимизации;

– универсальность и гибкость – можно использовать не только линейную, но и мультипликативную, минимаксную (Чебышева) и другие формы свертки под разные типы задач.

Недостатки методов этой группы, когда они не применимы или требуют предельной осторожности:

– ценности принципиально несравнимы или некомпенсируемы (этика, безопасность жизни);

– предпочтения размыты или формируются в процессе;

– нужно понять природу компромиссов, а не просто выбрать вариант;

– от решения зависит очень много, и нельзя полагаться на субъективный выбор весов.

Таким образом, методы свертки – это мощный, но опасный инструмент. Их сила – в простоте и эффективности, слабость – в создании математической

иллюзии там, где на самом деле происходит сложный ценностный выбор. Методы этой группы целесообразно применять в комбинации с другими подходами.

В третью группу выделены *методы кластерного анализа (КА)*, используемые для распределения объектов или событий в относительно однородные группы, которые называются кластерами [6]. Методы КА открывают внутреннюю структуру данных, позволяя исследователю сделать осмысленные выводы о наличии схожих групп в изучаемой совокупности объектов. В кластерном анализе нет заранее известных меток или ответов.

Методы кластеризации делятся на иерархические и неиерархические (итерационные). Иерархические методы кластеризации применяются при маленьком количестве наблюдений. Наиболее распространённым среди неиерархических методов является алгоритм k -средних. Главным его отличием от иерархических методов является то, что для использования необходимо иметь гипотезу о наиболее вероятном количестве кластеров, при этом они должны быть различны настолько, насколько это возможно [6]. Применяется алгоритм k -средних при большом количестве наблюдений, но благодаря современным программным решениям позволяет быстро и эффективно осуществить кластеризацию.

Основными достоинствами кластерного анализа являются:

- отсутствие требования к наличию математических моделей критериев принятия решений;
- применение формальных алгоритмов делает процесс кластеризации независимым от субъективных суждений;
- снижение шума данных и вычислительной сложности;
- выявление закономерностей и взаимосвязи в данных, например, выделение группы абонентов со схожими суточными графиками нагрузки для разработки дифференцированных тарифов и программ;
- возможность повышения точности краткосрочного прогнозирования, осуществляемого не по каждому объекту, а по кластерам типовых объектов (например, при прогнозировании электрической нагрузки).

Основными недостатками недостатком кластерного анализа являются:

- различная интерпретация результатов за счет чувствительности к выбору начальных условий, таких как количество кластеров, и мера расстояния;
- масштабируемость данных – кластеризация больших массивов данных может быть трудоемкой и дорогостоящей, требующей специализированного аппаратного или программного обеспечения.

Указанные недостатки приводят к тому, что КА редко используется как самостоятельный инструмент принятия решений. Он служит, в первую очередь, интеллектуальным средством разведочного анализа для выявления гипотез и паттернов, которые затем должны быть верифицированы и осмыслены.

В таблице 1 представлен краткий сравнительный анализ рассмотренных групп методов принятия решений.

Таким образом, проведенный сравнительный анализ позволил сделать вывод, что разработку алгоритма выбора приоритетного направления развития систем электроснабжения района города целесообразно осуществлять при комплексном применении кластерного анализа и методов экспертной оценки.

Таблица 1 – Анализ методов принятия решений

<i>Методы</i>	<i>Достоинства</i>	<i>Недостатки</i>
<i>Методы экспертного оценивания</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Работа с качественными и разнородными критериями, которые сложно формализовать иными методами. 2. Универсальность применения на разных этапах принятия решений. 3. Простота и наглядность. Легкое понимание и применение. Позволяют напрямую получать количественные оценки. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Субъективность и влияние психологических факторов. 2. Трудоемкость и высокая стоимость организации процесса получения информации.
<i>Методы, сводящие задачу к однокритериальной</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Минимизация вычислительной сложности. 2. Легкость интерпретации результата. 3. Наглядная видимость вклада каждого критерия в итоговую оценку. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Результат работы напрямую зависит от качества данных. 2. Высокий риск принятия неоптимального решения. 3. Высокие значения по одним критериям могут полностью компенсировать низкие значения по другим.
<i>Кластерный анализ</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отсутствие математических моделей критериев принятия решений. 2. Независимость процесса кластеризации от субъективных суждений. 3. Выявление закономерностей и взаимосвязи в данных. 4. Возможность одновременного учета разнородных факторов. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Различная интерпретация результатов. 2. Масштабируемость данных.

Список литературы

1 Федеральный закон «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 № 35-ФЗ. – Режим доступа : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/. – дата обращения 05.01.26.

2 Козлова, К.А. Экспертные методы принятия решений: основные методы экспертных оценок / К.А. Козлова, О.И. Герасимец // Вестник магистратуры. – 2018. – № 2-1(77) – С. 25-26.

3 Орлов, А.И. Теория принятия решений. Учебное пособие / А.И. Орлов. – М. : Издательство «Экзамен», 2005. – 656 с.

4 Семенова, Н.Г. Исследование и моделирование электроэнергетических объектов: учебное пособие / Н.Г. Семенова, Л.А. Влацкая. – Оренбург: ОГУ, 2022. – 125 с.

5 Подиновский, В.В. Аксиоматическое решение проблемы оценки важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений // Современное состояние теории исследования операций / Под ред. Н.Н. Моисеева. – М. : Наука, 1979. – С. 117-145.

6 Будникова, И.К. Кластерный анализ в сегментировании рынка электрической энергии и мощности / И.К. Будникова, Е.В. Приймак, О.И. Илларионова. // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №7. – С. 275-278.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПО ВЫБОРУ АЛГОРИТМА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДСТАНЦИЕЙ

Влацкая Л.А., канд. техн. наук, доцент, Абсалямов А.А.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

В соответствии с распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года» [1], одним из приоритетов государственной политики является гарантированное обеспечение энергетической безопасности, разработка и внедрение интеллектуальных систем как в стране, так и в отдельных регионах.

Согласно отраслевой статистике [2], до 16% аварийных ситуаций на электрических подстанциях возникает по причине ошибочных действий и решений оперативно-диспетчерского персонала. Анализ научной технической литературы показал, что системы поддержки принятия решения (СППР) по выбору алгоритма оперативного управления подстанцией, активно разрабатываются и частично применяются. Основной проблемой, ограничивающей всеобщее внедрение СППР в энергетический комплекс России, является недостаточное количество наработок в данной области.

В связи с этим, создание и внедрение интеллектуальных систем поддержки принятия решений является крайне актуальной и практически значимой задачей, направленной на повышение надежности и устойчивости энергосистемы.

В данной работе представлены результаты выполненного системного анализа методов принятия решений, которые могут быть использованы при выборе алгоритма оперативного управления подстанциями (ОУП).

Задача выбора алгоритма ОУП является многофакторной и часто требует решения в условиях: неполноты данных (частичный отказ систем телеметрии); неопределённости (погрешности измерений, прогнозная генерация/нагрузка); жёстких временных ограничений (необходимость принятия решения за секунды/минуты). Ввиду указанных особенностей рассмотрены методы таких групп как: экспертное оценивание; эволюционные вычисления; нечеткая логика и нечеткий вывод. Приведем краткую характеристику методов каждой из представленных групп.

Методы экспертного оценивания. Эти методы позволяют принимать решения в ситуациях, когда статистические данные отсутствуют, либо недостаточны для полноценного анализа проблемы [3, 4]. Суть методов заключается в получении оценки возможных действий оперативно-диспетчерского персонала на основе мнения специалистов-энергетиков, опирающиеся на опыт и интуицию, с целью последующего принятия решения.

Достоинствами методов экспертного оценивания (ЭО) являются:

– Прямое использование опыта экспертов – позволяют учесть на практике нюансы работы подстанции, которые не отражены в моделях.

– Простота и прозрачность – результаты легко интерпретировать (рейтинги, баллы).

– Не требует сложных вычислений.

– Универсальность – применимы на любом уровне данных, даже при полном отсутствии исторической статистики.

– Гибкость – критерии принятия решения и их важность могут оперативно корректироваться под конкретную ситуацию (например, «аварийный режим»/«нормальная работа»).

Недостатки следует считать:

– Субъективность – результат сильно зависит от состава и квалификации экспертов.

– Низкая адаптивность – система не «обучается» на новых данных автоматически. Для обновления знаний требуется повторная работа с экспертами.

– Проблемы масштабирования – при большом количестве критериев и алгоритмов процедура оценивания становится громоздкой.

– Консерватизм – система поддержки принятия решения, построенная на методах ЭО, может быть не готова к принципиально новым, нестандартным ситуациям, не описанным экспертами.

Методы данной группы (непосредственное оценивание, парные сравнения, обобщенные ранжировки, «Дельфи», «мозговой штурм», анализ иерархий и др.) следует рассматривать как базовые или вспомогательные для формирования начальных правил или ограничений в других системах (например, для нечёткой логики).

Эволюционные вычисления (генетические алгоритмы, эволюционные стратегии, эволюционное программирование, генетическое программирование, роевой интеллект). Эти алгоритмы используются для решения задач оптимизации [3, 5]. Они позволяют находить оптимальное (или близкое к оптимальному) решение в многокритериальных, слабоструктурированных или неструктурированных задачах.

Достоинства методов этой группы:

– Глобальный поиск – способны избегать «застревания» в оптимальных решениях, что важно для сложной многомерной задачи.

– Работа со сложными целевыми функциями, поскольку не требуют её дифференцируемости. Можно учесть множество разнородных критериев в одной функции.

– Гибкость в кодировании – целевая функция (критерий) может быть сколь угодно сложной, нелогичной и состоящей из десятков параметров. Алгоритм будет просто пытаться найти самое оптимальное решение.

Недостатками эволюционных вычислений являются:

– Вычислительная сложность, поскольку требуется множество оценок целевой функции, что может быть неприемлемо для оперативного управления в реальном времени.

– Сложность настройки в виду требующегося тонкого подбора параметров (режима работы объекта, условия окружающей среды, время года и т.д.), которые критичны для эффективности работы алгоритма.

– Непредсказуемость – каждый запуск может дать разный результат. Невозможно гарантировать точное время нахождения решения.

– Сложность интерпретации – найденное оптимальное решение (набор параметров) может быть неочевидным для человека-оператора.

Эволюционные вычисления часто используют для оффлайн-оптимизации – настройки параметров других алгоритмов (например, нечёткого регулятора) или для планирования режимов на более длительную перспективу.

Нечёткая логика и нечеткий вывод. В отличие от классической логики, где истинное значение переменных может быть только 1 или 0, в нечёткой логике оно может принимать любое вещественное число между 0 и 1. Методы этой группы позволяют моделировать приближенные рассуждения человека на основе лингвистических переменных и нечётких множеств [3, 6, 7]. Знания эксперта формализуются в виде базы правил «ЕСЛИ-ТО».

К достоинствам следует отнести:

– Учет неопределённости – идеально подходят для работы с неточными измерениями и качественными оценками («высокое напряжение», «низкая нагрузка»).

– Интуитивно понятное проектирование систем – база правил, сформулированных на естественном языке, легко создаётся при участии экспертов и также легко интерпретируется оператором. Это ключевое преимущество для разработки систем поддержки принятия решений (СППР).

– Высокая скорость работы – процесс принятия решения выполняется крайне быстро, что является очень важным критерием для оперативного управления.

– Устойчивость – система устойчива к незначительным изменениям входных данных и может давать осмысленные выходные данные даже при частичном отказе датчиков.

– Гибкость и адаптивность – лингвистическую базу правил можно корректировать и дополнять. Методы хорошо сочетаются с другими (нейросетями, генетическими алгоритмами), создавая адаптивные нечёткие системы.

– Относительная простота реализации – нечёткая логика позволяет моделировать неопределённость и неточные данные, а также использовать лингвистические переменные.

Недостатками являются:

– Сложность формализации знаний – качество разрабатываемой СППР напрямую зависит от полноты и непротиворечивости базы правил. Процесс их извлечения у экспертов может быть долгим.

– Отсутствие самообучения – классическая нечёткая система не имеет механизмов автоматического построения или тонкой настройки правил по данным (требует гибридизации).

– Субъективность выбора функций принадлежности, поскольку форма и параметры термов часто выбираются эмпирически.

Нечеткая логика представляется доминирующим подходом для решения задач оперативного управления в энергетике. Это связано с его естественностью для моделирования рассуждений диспетчера.

Краткие результаты сравнительного анализа рассмотренных методов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Достоинства и недостатки методов принятия решений по выбору алгоритма оперативного управления подстанцией

Методы принятий решений	Достоинства	Недостатки
Методы экспертного оценивания	1) Прямое использование опыта. 2) Простота и прозрачность. 3) Универсальность.	1) Субъективность. 2) Низкая адаптивность. 3) Проблемы масштабирования. 4) Консерватизм.
Эволюционные вычисления	1) Глобальный поиск. 2) Работа со сложными целевыми функциями. 3) Гибкость в кодировании.	1. Высокая вычислительная сложность. 2. Сложность настройки. 3. Непредсказуемость. 4. Сложность интерпретации.
Нечеткая логика и нечеткий вывод	1) Учет неопределённости. 2) Интуитивно понятное проектирование систем. 3) Высокая скорость работы. 4) Устойчивость. 5) Гибкость и адаптивность. 6) Относительная простота реализации.	1. Сложность формализации знаний. 2. Отсутствие самообучения. 3. Субъективность выбора функций принадлежности.

Таким образом, для выбора алгоритма оперативного управления подстанцией наиболее целесообразным представляется использование нечеткой логики и нечеткого вывода, ввиду их адекватного отражения когнитивного процесса человека-оператора и удовлетворения требований к скорости принятия решения. Однако для создания эффективной и адаптивной СППР её необходимо обогатить методами экспертного оценивания (на этапе создания) и эволюционной оптимизации (на этапе настройки). Это позволит преодолеть ключевые недостатки нечёткого подхода – субъективность и статичность, превращая СППР в мощный, понятный и самонастраивающийся инструмент поддержки диспетчера.

Список литературы

1 Российской Федерации. Распоряжение Правительства от 09.06.2020 г. № 1523-р «Об. Энергетической стратегии России на период до 2035 года». –

Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/571033660> (дата обращения 10.11.2025).

2 Алекин, Д. Ю. Анализ причин ошибочных действий оперативного персонала при переключении в процессе эксплуатации электроустановок / Д. Ю. Алекин, Г. Н. Яговкин // Безопасность и охрана труда. – 2017. – № 2(71). – С. 76-79.

3 Семенова, Н. Г. Искусственный интеллект в задачах электроэнергетики : монография / Н. Г. Семенова, Л. А. Влацкая. – Оренбург : ОГУ, 2025. – 234 с.

4 Применение экспертного метода для оценки рисков проектов, внедряемых в области электроэнергетики / А. И. Исламова [и др.] // Вестник магистратуры. – 2019. – № 6-2(93). – С. 50-51.

5 Порубай, О. В. Эволюционные алгоритмы в задачах оптимизации режимов работы региональных энергосистем / О. В. Порубай // Электронный научный журнал «Потомки Аль-Фаргани» Ферганского филиала ГАТУ имени Мухаммада аль-Хоразми. – 2024. – Выпуск 4. – Том: 1. – С. 73-77.

6 Влацкая, Л. А. Разработка алгоритма нечеткого вывода для получения оценки технического состояния масляных выключателей 6-10 кВ / Л. А. Влацкая, М. Ю. Зеленцов // Цифровые технологии и платформенные решения для управления развитием электроэнергетики. – Севастополь : СевГУ, 2023. – С. 17-24.

7 Ансабекова, Г. Н. Возможности применения элементов нечеткой логики в устройствах защиты и автоматики электроэнергетических сетей / Г. Н. Ансабекова // The scientific heritage. – 2021. – № 80. – С. 8-12.

К ВОПРОСУ ИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ-ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКОВ

**Влацкая Л.А., канд. техн. наук, доцент, Сташкевич А.С.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Российская электроэнергетика сегодня проходит этап интенсивной модернизации, связанной с усложнением энергетических инфраструктур, расширением использования возобновляемой энергии, возрастающими требованиями к уровню надёжности и эффективности управления, а также активной цифровой трансформацией всей отрасли. В указанных условиях традиционные подходы к анализу и управлению энергетическими системами, базирующиеся на классических детерминированных расчетах и статичных моделях, все чаще демонстрируют недостаточную эффективность при решении современных задач, отличающихся высокой степенью неопределенности, нелинейностью и динамическим характером протекающих процессов. Именно в этих обстоятельствах технологии искусственного интеллекта (ИИ) выступают эффективным средством, позволяющим выйти на качественно новый уровень принятия решений, прогнозирования и оптимизации в электроэнергетике [1].

Ввиду вышесказанного, интеграция ИИ в образовательные программы инженеров-энергетиков является не факультативным дополнением, а объективной необходимостью для подготовки высококвалифицированных специалистов, готовых не только обслуживать передовые технологические комплексы, но и активно участвовать в проектировании и развитии интеллектуальных систем управления энергосистемами.

В соответствии с этим, для эффективной интеграции технологий ИИ в образовательный процесс студентов электроэнергетиков важнейшей задачей является подготовка/переподготовка преподавательского состава, ведущего специализированные дисциплины. Преподавателям необходимо сочетать глубокие знания своей профессиональной сферы с уверенным владением информационно-коммуникационными технологиями и искусственным интеллектом, обладая способностью адаптировать и совершенствовать методы ИИ при решении практических задач, возникающих в профессии инженера-энергетика.

Таким образом, современный квалифицированный преподаватель в области электроэнергетики должен, во-первых, иметь глубокие знания в предметной области, а именно: понимать принципы устройства энергосистем, особенности эксплуатации оборудования, процессы управления электрической сетью и базовые физические законы, определяющие функционирование энергетических объектов. Во-вторых, владеть современными технологиями ИИ – иметь знания в области машинного обучения, экспертных систем, нечеткой

логики, нейронных сетей, эволюционных вычислений. В-третьих, уметь пользоваться специализированным программным обеспечением (MathCad, MatLAB, AutoCad, Компас и др.), библиотеками программ (MatLAB, Python, C++ и др.), разрабатывать простейшие программы на таких языках программирования, как Python, C++, Delfi.

Анализ научно-технической литературы и авторский опыт проведения исследований в электроэнергетике позволил выделить следующие основные задачи этой научной области знания: *кластеризация, оптимизация, прогнозирование, диагностика, управление*. В эпоху цифровой трансформации для решения выделенных задач электроэнергетики авторы предлагают использовать следующие технологии ИИ: нечеткие множества и нечеткую логику; методы экспертного оценивания; искусственные нейронные сети; эволюционные вычисления; машинное обучение. Основываясь на двадцатилетнем опыте использования и применения методов искусственного интеллекта в электроэнергетике, рассмотрим возможности сформулированных технологий ИИ для решения основных вышеперечисленных задач электроэнергетики.

Нечеткие множества и нечеткая логика. Эти технологии особенно эффективны в условиях неполной или неточной информации, характерной для многих энергетических объектов и процессов [1]. Они позволяют одновременно измерять, анализировать и снижать потребление электрической энергии, осуществлять диагностику состояния электрооборудования, обеспечивать гибкость управления энергообъектами и принятия решений в условиях неопределенности входных данных.

Авторами адаптирован алгоритм нечеткого вывода Мамдани в условиях неопределенности части исходных данных для:

- управления: ветро-дизельным комплексом [2]; фотоэлектрической панелью в системе солнечной электростанции [3];
- диагностики: электротехнического оборудования (масляных и вакуумных выключателей, силовых трансформаторов, трансформаторов напряжения и тока) [1, 4].

С применением теории нечетких множеств решены задачи оптимизации, а именно выбора оптимального варианта развития электрической сети [5].

Методы экспертного оценивания в электроэнергетике используются для диагностики (оценки) технического состояния электрооборудования и выбора наилучшей альтернативы развития электроэнергетической системы в процессе управления в условиях неопределенности части исходной информации. Основными достоинствами методов экспертного оценивания (ЭО) является: быстрота и простота их программной реализации, а также возможность разрабатывать универсальные (единые) алгоритмы для решения задач диагностики и управления электроэнергетическими объектами/системами.

В этом направлении для решения задач управления электроэнергетическими объектами/системами авторами были адаптированы такие методы экспертного оценивания (ЭО) как: непосредственное оценивание,

парные сравнения, обобщенное ранжирование [1]. Например, алгоритм обобщенных ранжировок был использован для принятия решения по развитию систем электроснабжения коммунально-сетевых предприятий [6]; все три вышеуказанных метода ЭО были программно реализованы для решения задач диагностики электрооборудования [7] и выбора наилучшей альтернативы развития электрической сети [8].

Искусственные нейронные сети (ИНС). ИНС имеют широкий спектр применения в электроэнергетике: от краткосрочного и долгосрочного прогнозирования нагрузки до обнаружения аномалий в работе оборудования. Основными задачами, решаемыми ИНС в электроэнергетике, являются: прогнозирование; кластеризация; управления; оптимизация, диагностика [1].

Одним из примеров применения ИНС в задаче оптимизации является реализация различных архитектур нейронных сетей для выбора мест установки и мощности компенсирующих устройств в узлах электрической сети [9].

Эволюционные вычисления. Одним из основных методов данной технологии является генетический алгоритм (ГА). К основным задачам электроэнергетики, которые возможно решать с помощью генетических алгоритмов, относятся: оптимизация и управление. Основными достоинствами ГА, используемого в решении задач электроэнергетики, являются: высокая точность и достоверность результата, высокая скорость сходимости к точке экстремума; работа не только с непрерывными, но и дискретными данными [1].

Авторами адаптирован ГА для решения таких задач как: оптимизация размещения компенсирующих устройств в электрических сетях [10]; оперативно-технологическое управление электрическими сетями в послеаварийных режимах [11].

Машинное обучение. Одним из методов машинного обучения является кластерный анализ (КА), относящийся к необучаемым алгоритмам. КА может быть использован для: мониторинга нагрузки; диагностики состояния электрооборудования; управления (планирования) развитием электрических сетей; оптимизации диспетчерского управления [1].

Авторами программно реализованы алгоритмы четкой (*k*-means) и нечеткой (*c*-means) кластеризации для задачи оценки состояния кабельных линий [12, 13]; адаптирован алгоритм кластерного анализа для идентификации технического развития и эксплуатации систем электроснабжения [14]; выполнена кластеризация энергетических объектов в условиях неопределенности [1].

В заключении отметим, что в процессе обучения не следует нарушать баланс между использованием ИИ и развитием собственных аналитических навыков студентов. ИИ должен выступать в роли инструмента, усиливающего, а не заменяющего человеческое мышление. В связи с этим необходимо разрабатывать методы, методики, технологии обучения, которые поощряют активное участие студентов в процессе обучения и развивают их способность к самостоятельному решению проблем.

Список литературы

- 1 Семенова, Н.Г. Искусственный интеллект в задачах электроэнергетики : монография / Н.Г. Семенова, Л.А. Влацкая. – Оренбург : ОГУ, 2025. – 234 с.
- 2 Семенова, Н.Г. Семенов А.М., Влацкая Л.А. Нечеткое управление режимами функционирования ветро-дизельного комплекса / Н.Г. Семенова, А.М. Семенов, Л.А. Влацкая // Научно-технический вестник Поволжья, – 2022. – № 4. – С. 164-168.
- 3 Семенова, Н.Г. Энергоэффективная система нечеткого управления солнечной панелью / Н.Г. Семенова, Л.А. Влацкая // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: сб. материалов IX междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово: КузГТУ, 2025. – С. 237-243.
- 4 Влацкая, Л.А. Разработка алгоритма нечеткого вывода для получения оценки технического состояния масляных выключателей 6-10 кВ / Л.А. Влацкая, М.Ю. Зеленцов // Цифровые технологии и платформенные решения для управления развитием электроэнергетики : сборник научных трудов I Всерос. науч.-практ. конф. – Севастополь: СевГУ, 2023. – С. 17-24.
- 5 Семенова, Л.А. Разработка методики принятия решения по развитию систем электроснабжения с применением техноценологического подхода и теории нечетких множеств: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02 / Л.А. Семенова. – Екатеринбург, 2010. – 187 с.
- 6 Семенова, Н.Г. Автоматизация процесса принятия решения по развитию систем электроснабжения коммунально-сетевых предприятий / Н.Г. Семенова, Л.А. Влацкая, А.М. Семенов // Научно-технический вестник Поволжья, 2022. – № 10. – С. 74-78.
- 7 Св-во о регистрации прикладной программы «Экспертные методы принятия решений» / Л.А. Семенова; УФЭР. – № 1478; опублик. 07.12.2017.
- 8 Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ «Экспертные системы многокритериальной оценки систем» / А.М. Семенов, Л.А. Семенова. – № 2009616955; опублик. 15.12.2009.
- 9 Влацкая, Л.А. К вопросу применения искусственных нейронных сетей для оптимизации размещения устройств компенсации реактивной мощности в распределительных сетях / Л.А. Влацкая, Т.А. Денисов // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы : материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф. – Оренбург : ОГУ, 2023. – С. 223-226.
- 10 Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для выбора оптимальной мощности компенсирующих устройств» / Л.А. Влацкая, Т.А. Денисов. – № 2022684182; опублик. 12.12.2022.
- 11 Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для реализации алгоритма по выбору наилучшей послеаварийной схемы» / Н.Г. Семенова, Л.А. Влацкая. – № 2025685439; опублик. 23.09.2025.
- 12 Св-во о регистрации прикладной программы «Оценка состояния кабельных линий 6-10 кВ на базе алгоритма с-means» / Л.А. Влацкая, О.И. Дубинин; УФЭР. – № 4416; опублик. 31.05.24.

13 Св-во о регистрации прикладной программы «Оценка состояния кабельных линий 6-10 кВ на базе алгоритма c-means» / Л.А. Влацкая, О.И. Дубинин; УФЭР. – № 4418; опубл. 03.06.24.

14 Св-во о регистрации прикладной программы «Кластеризация систем электроснабжения по критерию годового электропотребления» / Л.А. Влацкая, Н.Г. Семенова; УФЭР. – № 2824; опубл. 13.10.21.

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Глошкин П.А., Косенко А.Д., канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

В соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», а также Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», устанавливающими обязательные требования к безопасности, надежности и точности технических измерений, особое внимание уделяется вопросам контроля технического состояния энергетического оборудования. Надежная эксплуатация силовых трансформаторов является важнейшим фактором обеспечения устойчивости и безопасности электроэнергетических систем.

В условиях цифровизации электроэнергетической отрасли и внедрения интеллектуальных систем управления возрастает необходимость автоматизации процессов мониторинга и диагностики состояния силовых трансформаторов. Данные объекты являются ключевыми элементами систем электроснабжения, обеспечивающими преобразование и распределение электрической энергии. От их технического состояния напрямую зависят надежность энергосистем, бесперебойность электроснабжения потребителей и уровень техногенной безопасности, поэтому целью работы является разработка автоматизированной системы принятия решений по диагностике силовых трансформаторов.

В данной работе был проведен анализ научно-технической литературы в области существующих методов и средств диагностики силовых трансформаторов. Условно методы распределены на 4 группы.

К первой группе отнесен метод вибраций. Вибрационная диагностика основана на анализе механических колебаний, возникающих в силовом трансформаторе в процессе его работы. Любые изменения технического состояния (ослабление креплений, деформация обмоток, дефекты магнитопровода) приводят к изменению амплитуды, спектра и характера вибраций, что и используется для диагностики. Основными источниками вибраций являются магнитострикционные деформации сердечника, вызываемые переменным магнитным полем, электродинамические силы в обмотке, пропорциональные квадрату тока нагрузки и механические резонансы конструкции. Частота сил и основной гармоники вибрации составляет 100 Гц. Для базового контроля используются виброметры, измеряющие общий уровень виброскорости, ускорения или перемещения.[5] Основные достоинства данного метода, следующие:

- обнаруживает механические дефекты;

- не требует вскрытия трансформатора;

К недостаткам следует отнести:

- сложность разделения нормальной вибрации от аварийной;

- зависимость от внешнего механического шума;

- вибрации не всегда позволяют точно определить вид дефекта.

Ко второй группе отнесен метод, который включает в себя диагностику по результатам хроматографической диагностики газов. Это ключевой метод раннего выявления неисправностей в силовых трансформаторах, основанный на анализе газов, растворенных в трансформаторном масле. При нормальной работе и особенно при различных дефектах внутри трансформатора (перегревы, электрические разряды, дуги) изоляционные материалы (масло и твердая изоляция — бумага, картон) разлагаются, выделяя характерные газы. Эти газы растворяются в масле. Задача ХДГ — "выловить", идентифицировать и количественно определить эти газы, чтобы по их составу и концентрации судить о состоянии оборудования.

Анализ проводится в определенном порядке: отбор пробы масла, строго по стандарту, часто вакуумным пробоотборником, чтобы избежать контакта с воздухом; экстракция (выделение) газов: газы извлекаются из масла в лаборатории (методом вакуумной дегазации, мембранным методом; хроматографический анализ: извлеченная газовая смесь подается в газовый хроматограф, в колонке хроматографа газы разделяются на компоненты, которые затем детектируются (обычно пламенно-ионизационным детектором для углеводородов и термокондуктометрическим для водорода и оксидов углерода); количественный расчёт: по калибровке хроматографа определяется концентрация каждого газа.[9]

К достоинствам данного метода оценки диагностики можно отнести:

- чувствительность и ранняя диагностика;

- позволяет не только констатировать проблему, но и с высокой вероятностью определить ее природу и тяжесть.

К недостаткам метода можно отнести следующие факторы:

- не указывает точное место дефекта;

- требуется высокой квалификации диагноста;

- возможны ложные тревоги из-за остаточных газов после ремонта.

К третьей группе относится метод акустической диагностики трансформаторов. Акустическая диагностика основана на регистрации и анализе акустических колебаний (звуковых и ультразвуковых волн), возникающих в силовом трансформаторе в процессе его работы. Основными источниками акустических сигналов являются:

- Частичные разряды в масляно-бумажной изоляции;

- электродинамические усилия в обмотках;

- магнитострикционные колебания в обмотках;

- локальные дефекты изоляции и конструктивных элементов.

Акустические волны распространяются через масло и металлические элементы бака и фиксируются датчиками, установленными на поверхности

трансформатора. В целом, акустический метод особенно ценен для поиска и локализации дефектов изоляции. Его часто используют в комбинации с другими методами для подтверждения результатов. Наибольшую диагностическую ценность представляют ультразвуковые сигналы ЧР, так как они слабо подвержены влиянию промышленных шумов.

Для акустической диагностики применяются: пьезоэлектрические акустические датчики; ультразвуковые преобразователи; многоканальные системы регистрации; усилители и полосовые фильтры; системы синхронизации сигналов.[12]

Итак, к достоинствам данного метода можно отнести:

- метод позволяет точно локализовать место частичных разрядов внутри бака;
- безопасность метода.

К недостаткам данного метода можно отнести следующее:

- требование многоканального оборудования и фильтрации шумов;
- сложность интерпретации в больших трансформаторах;
- ошибки монтажа снижают точность диагностики;
- ограниченная чувствительность.

К четвертой группе относятся методы диагностики силовых трансформаторов на основе паспортных и эксплуатационных данных. Паспортные данные – исходный эталон, полученный при заводских испытаниях трансформаторов. Он включает электрические параметры, такие как сопротивления обмоток постоянному току, коэффициент трансформации, потери холостого хода и другие. Метод диагностики на основе паспортных и эксплуатационных данных основан на анализе исходных технических характеристик трансформатора и параметров его реальной эксплуатации с целью оценки текущего технического состояния, степени износа и остаточного ресурса оборудования

В отличие от физических методов данный подход является информационно-аналитическим и служит базой для построения математических моделей, прогнозирования и автоматизированного принятия решений. По разнице между текущими и эталонными данными можно выявить несколько типов проблем:

- Сопротивление обмоток постоянному току. Изменение не более $\pm 10\%$ от паспортного значения;
- Коэффициент трансформации;
- Ток и потери холостого хода. Ожидается стабильность и симметрия по фазам;

Метод паспортных и эксплуатационных данных может быть расширен до анализа жизненного цикла силового трансформатора. Учитываемые этапы: ввод в эксплуатацию; период приработки; нормальная эксплуатация; период ускоренного старения; предаварийное состояние.

В автоматизированной системе на основе паспортных и эксплуатационных данных создается цифровой профиль трансформатора,

включающий: уникальный идентификатор; заводские параметры; историю нагрузок; температурные профили; результаты всех видов диагностики; ремонты и модернизации. Такой профиль является основой для цифрового двойника, прогнозирования отказов, поддержки управленческих решений.[13]

Достоинства данного метода:

- Без паспортных данных невозможно корректно применять термографию, анализа других методов так как параметры сравниваются именно с паспортными нормами и испытаниями завод-изготовителя;
- даёт первичную оценку состояния оборудования без проведения испытаний;
- не требует специального оборудования;
- метод практически не требует финансовых затрат
- хорошо подходит для прогнозирования ресурса.

Недостатки метода:

- Не даёт физической информации о текущем дефекте - только косвенная или историческая оценка;
- паспортные данные могут быть неполными или устаревшими.

Для наглядности результаты проведенного сравнительного анализа методов диагностики силовых трансформаторов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты сравнительного анализа методов и средств диагностики силовых трансформаторов

	Метод оценки	Ф.И.О. ученых	Достоинства	Недостатки
1	Диагностика вибраций	С.А. Лебедев, А.В. Паршин	- Обнаруживает механические дефекты - не требует вскрытия трансформатора	- Сложность разделения нормальной вибрации от аварийной - зависимость от внешнего механического шума - вибрации не всегда позволяют точно определить вид дефекта
2	Хроматографическая диагностика газов	А.Л. Либов, Р.К. Борисов	- Чувствительность и ранняя диагностика - позволяет не только констатировать проблему, но и с высокой вероятностью определить ее природу и тяжесть	- не указывает точное место дефекта - требуется химический анализ в лаборатории - требуется высокой квалификации диагноста
3	Акустическая диагностика трансформаторов	В.А. Степанов, И.Ю. Малышев	- Позволяет точно локализовать место частичных разрядов внутри бака - безопасный метод	- Требование многоканального оборудования и фильтрации шумов - сложность интерпретации в больших трансформаторах - Ограниченная чувствительность - ошибки монтажа снижают точность диагностики

Продолжение таблицы 1.

4	Диагностика силовых трансформаторов на основе паспортных и эксплуатационных данных	А.П. Анисимов, В.С. Попов	<ul style="list-style-type: none"> - Без паспортных данных невозможно корректно применять термографию, анализа других методов так как параметры сравниваются именно с паспортными нормами и испытаниями завод-изготовителя - даёт первичную оценку состояния оборудования без проведения испытаний - не требует специального оборудования - метод практически не требует финансовых затрат - хорошо подходит для прогнозирования ресурса 	<ul style="list-style-type: none"> - Не даёт физической информации о текущем дефекте - только косвенная или историческая оценка - паспортные данные могут быть неполными или устаревшими
---	--	------------------------------	---	--

Анализ современной научно-технической литературы показывает, что несмотря на наличие значительного числа методов диагностики силовых трансформаторов, вопросы комплексной автоматизации процессов оценки технического состояния и формализованного принятия решений на основе разнородных диагностических данных остаются недостаточно проработанными. В большинстве существующих подходов отсутствует единый алгоритмический механизм, обеспечивающий интеграцию паспортных, эксплуатационных и диагностических данных в рамках автоматизированной системы.

Подводя итог, можно сделать вывод, что тема «Разработка автоматизированной системы принятия решений по диагностике силовых трансформаторов» является актуальной и значимой с точки зрения повышения надёжности электросетевого комплекса, снижения аварийности и оптимизации эксплуатационных затрат, что обуславливает целесообразность и практическую значимость проводимого исследования.

Список литературы

1. Кузьмин Ю. Н. Диагностика силовых трансформаторов и автотрансформаторов. — Москва: Энергоатомиздат, 2009. — 312 с.
2. Вдовико В. П. Методы и средства диагностики электроэнергетического оборудования: учебное пособие. — Москва: Изд-во МЭИ, 2012. — 280 с.
3. Бобров В. А. Эксплуатация и диагностика силовых трансформаторов. — Москва: Энергия, 2010. — 256 с.
4. Савельев А. И. Диагностика состояния изоляции силовых трансформаторов. — Москва: Изд-во МЭИ, 2008. — 198 с.

5. Костин А. Н., Крюков С. В. Методы акустической и вибрационной диагностики электрооборудования. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. — 224 с.
6. РД 34.45-51.300-97. Методические указания по диагностике силовых трансформаторов. — Москва: Минэнерго РФ, 1997. — 96 с.
7. ГОСТ 14209–2017. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. — Москва: Стандартинформ, 2018. — 63 с.
8. Методические указания ПАО «Россети» по оценке технического состояния силовых трансформаторов. — Москва, 2020.
9. Либов А. Л., Борисов Р. К., Горин А. В. Диагностика высоковольтного оборудования по газам, растворённым в масле (метод ДГА): теория и практика. — Москва: Инфра-Инженерия, 2019. — 270 с.
10. Лебедев С. А., Паршин А. В. Вибрационная диагностика силовых трансформаторов в процессе эксплуатации // Электрические станции. — 2006. — № 6. — С. 45–50.
11. Бустенко П. Ю. Диагностика состояния бумажно-масляной изоляции силовых трансформаторов по продуктам старения целлюлозы // Электротехника. — 2011. — № 9. — С. 32–37.
12. Степанов В. А. Акустические методы диагностики частичных разрядов в силовых трансформаторах. — Москва: Изд-во МЭИ, 2009. — 156 с.
13. Анисимов А. П. Анализ паспортных и эксплуатационных данных при диагностике силовых трансформаторов // Электрические сети и системы. — 2010. — № 3. — С. 41–46.

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

**Грачев Д.А., Соколов В.Ю., канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Перспективы развития отрасли использования бесперебойных источников энергии для удаленных потребителей связаны с дальнейшим совершенствованием нормативно-правовой базы, стимулированием инвестиций в цифровые технологии и развитием кадрового потенциала.

Повышение энергоэффективности и снижение негативного воздействия на окружающую среду также являются важными направлениями цифровой трансформации. Использование умных технологий для управления уличным освещением, оптимизации работы котельных и очистных сооружений позволит снизить потребление энергии и выбросы вредных веществ.

Для успешной реализации намеченных целей необходимо разработать и внедрить единую цифровую платформу, объединяющую все элементы коммунальной инфраструктуры. Эта платформа должна обеспечивать сбор, обработку и анализ данных в режиме реального времени, а также предоставлять инструменты для принятия обоснованных управленческих решений. Важным аспектом является обеспечение информационной безопасности платформы и защита данных от несанкционированного доступа.

Развитие цифровых компетенций у специалистов коммунального хозяйства является ключевым фактором успеха цифровой трансформации. Необходимо организовать систему обучения и повышения квалификации, ориентированную на освоение новых технологий и методов работы.

Ключевые направления и эволюция подходов.

Обзор литературы позволяет выделить несколько этапов и направлений в развитии АСУ КЖУ:

Эволюция терминологии и концепции: Изначальные работы (2000-е гг.) фокусировались на «Автономных энергокомплексах» или «Системах гарантированного энергоснабжения». Акцент делался на надежности источников энергии (дизель-генераторы, ВИЭ). Современная литература (после 2015 г.) использует термин «Комплекс жизнеобеспечения» (КЖ), который включает не только энергогенерацию, но и водоочистку, управление теплом, связь, утилизацию отходов, что требует интеграционного подхода к управлению.

Переход от локальной автоматике к системам управления:

1-й уровень: Локальные контроллеры (ПЛК) для управления отдельными агрегатами (запуск/остановка генератора, слежение за солнцем).

2-й уровень: Системы диспетчеризации (SCADA) для сбора данных и визуализации.

3-й уровень (современный тренд): Интеллектуальные АСУ ТП с элементами искусственного интеллекта (ИИ) и прогнозного анализа. Они не только реагируют, но и прогнозируют (спрос, выработку ВИЭ) и оптимизируют работу всей системы в реальном времени.

Фундаментальные монографии и учебники:

По теории автоматического управления и SCADA-системам (например, работы А.С. Алексеева, В.П. Дьяконова).

Современные тренды и пробелы в исследованиях (на основе анализа свежей литературы)

Тренды:

Конвергенция IT и OT: Слияние информационных и операционных технологий. Управление КЖУ через единую платформу с использованием облачных сервисов.

Предиктивная аналитика: Использование данных с датчиков вибрации, температуры для прогноза остаточного ресурса оборудования (генераторов, насосов) и планирования ТО.

Автономность (не только энергетическая): Развитие алгоритмов, способных долго работать без вмешательства человека, самостоятельно перестраиваясь при изменении условий.

Экологичность: Акцент на «зеленые» решения, минимизацию углеродного следа удаленных поселков и объектов.

Пробелы / Перспективные направления для исследований:

Универсальные адаптивные алгоритмы: Большинство решений «заточено» под конкретный объект. Недостаточно работ по созданию гибких алгоритмов, легко настраиваемых под разные типы КЖУ (поселок, буровая, метеостанция).

Экономика и оценка эффективности: Сложность количественной оценки полного экономического эффекта от внедрения интеллектуальной АСУ (CAPEX vs OPEX, стоимость простоя).

Интеграция с системами «умного» поселения: Управление КЖУ как часть более широкой концепции «умного города/поселка», включая системы безопасности, логистики, телемедицины.

Литература демонстрирует четкий переход от рассмотрения АСУ КЖУ как набора разрозненных систем автоматики к концепции единого киберфизического комплекса, управляемого интеллектуальными алгоритмами с высокой степенью автономности. Фокус сместился с простого обеспечения надежности на оптимизацию, экономическую эффективность и экологичность при безусловном выполнении главной задачи — гарантированного жизнеобеспечения.

Наиболее перспективными и недостаточно изученными остаются вопросы кросс-платформенной адаптивности алгоритмов, оценки полного

жизненного цикла таких систем и их глубокой интеграции в социально-техническую среду удаленных сообществ.

Литература позволяет выделить несколько этапов и направлений в развитии АСУ КЖУ:

Эволюция терминологии и концепции: Изначальные работы (2000-е гг.) фокусировались на «Автономных энергокомплексах» или «Системах гарантированного энергоснабжения». Акцент делался на надежности источников энергии (дизель-генераторы, ВИЭ). Современная литература (после 2015 г.) использует термин «Комплекс жизнеобеспечения» (КЖ), который включает не только энергогенерацию, но и водоочистку, управление теплом, связь, утилизацию отходов, что требует интеграционного подхода к управлению.

Переход от локальной автоматики к системам управления:

1-й уровень: Локальные контроллеры (ПЛК) для управления отдельными агрегатами (запуск/остановка генератора, слежение за солнцем).

2-й уровень: Системы диспетчеризации (SCADA) для сбора данных и визуализации.

3-й уровень (современный тренд): Интеллектуальные АСУ ТП с элементами искусственного интеллекта (ИИ) и прогнозного анализа. Они не только реагируют, но и прогнозируют (спрос, выработку ВИЭ) и оптимизируют работу всей системы в реальном времени.

Анализ методологий различных авторов

1. Подход на основе детерминированных (упрощенных) технико-экономических моделей. Используются упрощенные формулы для расчета баланса мощности в системе на основе среднесуточных или часовых профилей нагрузки и генерации. Оптимизация сводится к подбору мощности ДГУ, ФЭС и емкости накопителей для минимизации LCOE при заданном LPSP.

Типичные представители: Ранние работы HOMER (до версии Pro), многие инженерные расчеты в отраслевой литературе.

Достоинства: Простота и наглядность. Позволяет быстро получить «первое приближение» конфигурации системы. Низкие требования к входным данным. Достаточно усредненных метеоданных и профиля нагрузки.

Недостатки: Не учитывает динамику. Игнорирует переходные процессы в ДГУ, инерционность систем, точное время реакции. Неточная оценка износа оборудования. Упрощенно оценивает число пусков/остановов ДГУ и циклы накопителей, что критично для их срока службы. Чувствительность к исходным данным. Результаты могут сильно меняться при изменении средних значений.

2. Подход на основе динамического моделирования и оптимального управления (Optimal Dispatch Strategy). Создается детальная математическая модель системы, включающая кривые удельного расхода топлива ДГУ, КПД инверторов, нелинейные характеристики аккумуляторов. Применяются алгоритмы оптимального управления в реальном времени (часовом или получасовом шаге) для минимизации затрат.

Типичные алгоритмы: Правило приоритета нулевого уровня заряда (Zero-Load), Стратегия постоянной работы ДГУ (Diesel-Only), Стратегия выравнивания нагрузки (Load Following) и, главное, Оптимальная стратегия (Optimal Dispatch), основанная на динамическом программировании (DP) или смешанно-целевом линейном программировании (MILP).

Представители: Работы, ссылающиеся на методы DP (T. Markvart, J. Kellogg и др.) и MILP (D. Connolly, B. Ó Gallachóir, множество современных статей в Applied Energy).

Достоинства: Высокая точность. Дает реалистичную оценку расхода топлива и износа оборудования. Учет динамики и ограничений. Позволяет смоделировать минимальное время работы ДГУ, время выхода на режим, ограничения по току заряда/разряда АКБ.

Находит глобально оптимальное управление для заданной конфигурации.

Недостатки: Вычислительная сложность. Особенно для DP при длительных периодах моделирования (год и более). Требуется точных и детальных входных данных (минутные/часовые ряды нагрузки и солнца, техкарты оборудования). «Заточенность» под конкретную конфигурацию. Для поиска оптимальной конфигурации (мощностей) требуется множественный перебор (оптимизация системы + оптимизация управления).

3. Подход на основе интеллектуальных методов оптимизации (Metaheuristics)

Представители: Многочисленные современные исследования в журналах типа Renewable and Sustainable Energy Reviews, Energy. Авторы часто комбинируют, например, PSO для поиска размеров и нечеткую логику (Fuzzy Logic) для управления.

Достоинства: Глобальный поиск. Способен находить нетривиальные, экономически эффективные конфигурации в пространстве с множеством переменных. Гибкость. Легко интегрирует сложные, нелинейные ограничения и целевые функции (например, минимизация выбросов вместе со стоимостью). Автоматизация. Процесс оптимизации почти не требует ручного вмешательства после настройки.

Недостатки:

Отсутствие гарантии оптимальности. Методы сходятся к «достаточно хорошему» решению, но не гарантируют глобальный оптимум. Вычислительно затратны. Требуют тысяч итераций симуляции, что занимает время. Сложность верификации и интерпретации. «Черный ящик» — бывает трудно понять, почему алгоритм выбрал именно такую конфигурацию.

4. Подход на основе готовых коммерческих программных комплексов (HOMER Pro, iHOGA, RETScreen)

Достоинства: Удобство и доступность. Имеет дружелюбный интерфейс, обширные библиотеки оборудования, встроенные метеобазы. Стандартизация. Результаты, полученные в HOMER, легко представить и сравнить, они признаны в мире. Быстрый анализ чувствительности. Позволяет легко оценить влияние цены топлива, капитальных затрат, изменения климата.

Недостатки: «Серая коробка». Пользователь ограничен встроенными алгоритмами управления, которые могут быть упрощенными (например, стратегия «Cycle Charging» в HOMER часто не является оптимальной). Ограниченная детализация моделей. Динамика ДГУ и АКБ моделируется с существенными упрощениями. Стоимость. Лицензии на профессиональное ПО дороги.

Таблица 1 - Сравнительная таблица подходов

Критерий / Подход	Детерминированные модели	Динамическое оптимальное упр.	Интеллектуальная оптимизация	Коммерческое ПО (HOMER)
Точность оценки расхода топлива	Низкая	Очень высокая	Высокая (зависит от модели)	Средняя
Учет динамики и износа	Практически нет	Полный учет	Частичный, зависит от модели	Упрощенный учет
Оценка стоимости (LCOE)	Приблизительная	Точно для заданной конфигурации	Оптимальная для найденной конфигурации	Удовлетворительная
Вычислительные затраты	Низкие	Высокие	Очень высокие	Средние
Простота использования	Очень высокая	Низкая требует экспертизы	Низкая	Высокая
Гибкость учет специфики	Низкая	Высокая	Очень высокая	Ограниченная
Лучшее применение	Предпроектный анализ, обучение	Научное исследование, оптимизация упр. для конкретного объекта	Поиск инновационных конфигураций, многоцелевая оптимизация	Коммерческое проектирование, ТЭО, сравнение вариантов

Для инженерной практики (проектирование реального объекта) оптимален компромиссный подход: использовать HOMER Pro или аналог для первичного отбора 2-3 конфигураций, а затем детально прорабатывать лучший вариант с помощью динамического моделирования в MATLAB/Simulink или Python с реализацией алгоритма оптимального

управления (MILP). Это позволит точно оценить реальные эксплуатационные затраты и срок службы оборудования.

Главный недостаток многих работ — использование усредненных или типовых профилей нагрузки, тогда как реальное потребление удаленных объектов (вахтовый поселок, метеостанция) может иметь уникальную, «рваную» динамику, которая кардинально влияет на оптимальную стратегию управления ДГУ и выбор емкости накопителей.

Таким образом, современный тренд — это комбинация методов: использование метаэвристик для поиска пространства решений и точных математических методов (MILP, DP) для валидации и финальной оценки выбранных конфигураций с учетом полной динамики системы.

Список литературы

1. Безруких, П.П. Системы гарантированного электроснабжения автономных потребителей на основе возобновляемых источников энергии / П.П. Безруких, А.К. Сокольский, Б.П. Харитонов // Труды 3-й Международной научно-технич. конферен. «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве».- Москва, 2003.С. 3.

2. Виссарионов, В.И. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии / В.И. Виссарионов.-М.: МЭИ, 2009.-144 с.

3. Воропай, Н.И. Возобновляемые источники энергии: Теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика / Н.И. Воропай, З.А. Стычинский // Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Магдебург. 2010.

4. Ганжа, В.Л. Основы эффективного использования энергоресурсов. Теория и практика энергосбережения / В.Л. Ганжа.-Минск: Белорусская наука, 2007.-451 с.

5. Григораш, О.В. Нетрадиционные автономные источники электроэнергии / О.В. Григораш, Ю.И. Стрелков // Промышленная энергетика. 2001. №4. С. 37

6. Лоскутов, А.Б., Соснина, Е.Н., Чивенков, А.И. и др. Разработка технологии эффективного использования возобновляемых источников энергии в локальной системе электроснабжения потребителей. Этап 3: Экспериментальные исследования комплексного взаимодействия разнородных источников энергии. - Научно-технический отчет № госрегистрации: 01201174830 (ГК от 25.08.2011 №16.516.11.6114) // Н.Новгород: НГТУ, 2012.

7. Мастепанов, А.М. Топливо-энергетический комплекс России на рубеже веков: состояние, проблемы и перспективы развития / А.М. Мастепанов.- М.: ИАЦ Энергия, 2009. -476 с.

ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГРАММНЫМ СРЕДСТВАМ-ТРЕНАЖЕРАМ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ-ЭЛЕКТРИКОВ

Комиссарова Т.В.¹,

Семенова Н.Г.², д-р пед. наук, канд. техн. наук, профессор

¹Орский гуманитарно-технологический институт (филиал) ОГУ,

**²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Оренбургский государственный университет»

Развитие инженерного образования является основой устойчивого развития государства. Специалисты электроэнергетической отрасли должны обладать профессиональными знаниями, умениями и навыками и уметь их применять в профессиональной деятельности, в том числе в нестандартных ситуациях сопряженных с условиями неопределенности и повышенного риска.

Одним из инструментов повышения качества инженерного образования в условиях цифровой трансформации образования, согласно ФГОС 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника является формирование у студентов не только профессиональных знаний, умений, но и навыков работы на лабораторных стендах, программных средствах-тренажерах (ПСТ). Проведем анализ литературы для определения понятия программное средство-тренажер. Стоит отметить, что в русскоязычной литературе термин «тренажер» является синонимом «симулятор», выступая равнозначными по смыслу. Термин «тренажер» имеет много трактовок согласно своему функциональному назначению. Согласно ГОСТ Р 53626-2009 компьютерные тренажеры можно классифицировать как технические средства обучения (ТСО) представляющие собой совокупность специализированных устройств, аппаратных комплексов, оборудования и/или информационно-программного обеспечения, предназначенных для целенаправленного применения в образовательном процессе, с учетом своих функциональных свойств, с целью повышения его качества. Дозорцев В.М. позиционирует тренажер, как средство профессионального обучения персонала, согласно его исследованию [1] тренажер – это «программно-аппаратное средство формирования и закрепления профессиональных навыков и умений оператора, реализуемое путем имитационного моделирования процесса с учетом возможных вмешательств в его ход, воссоздания реального операторского интерфейса и обеспечения развитой инструментальной и методической поддержки обучения».

В [2] под тренажером понимается программно-техническое средство, предназначенное для формирования профессиональных умений и навыков у персонала в соответствии с установленными должностными требованиями и утверждёнными методиками обучения, реализующее имитационную модель энергетического объекта и совокупность задач по его управлению

(обслуживанию), обеспечивает проведение тренировочных сценариев, а также последующий анализ результатов обучаемых.

В ГОСТ Р 70449-2022 тренажер выступает как «техническое средство, воспроизводящее (имитирующее) условия управления реальным объектом, предназначенное для формирования и совершенствования у обучающихся профессиональных умений и навыков, необходимых для управления этим объектом, и обеспечивающее контроль выполнения ими приемов управления в штатных ситуациях, а также отработки действий в нестандартных ситуациях, и для проверки и оценки знаний и умений».

На базе проведенного анализа представляется возможность сформировать определение термина «программное средство-тренажер».

Здесь и далее под термином «**программное средство-тренажер (ПСТ)**» будем понимать «специализированное программное обеспечение разработанное с учетом дидактических возможностей информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) и предметных особенностей обучения студентов, ориентированное на формирование профессиональных умений и навыков, посредством комплекса заданий и упражнений симулирующих задачи профессиональной деятельности на промышленных предприятиях».

Вопросами разработки и применения ПСТ для подготовки персонала предприятий и обучения студентов инженерных специальностей, в том числе и студентов-электриков, посвящено множество научных работ зарубежных и отечественных исследователей: Joshua Grodotzki, Tobias R. Ortelt, Яннике Баалсруд Хауге, Вакуленко С.П., Григорьева С.В., Гринченков Д.В., Гуреев В.А., Карелина М.В., Мерецков О.В., Румановский И.Г., Фикс Н.П. и др.

На основе научных работ ученых-дидактов предложено выделять три группы требований к ЭОР: группа дидактических требований (Роберт И.В., Трощинский В.В., Фикс Н.П. и др.); группа программно-технологических требований (Гурдзибеева А.Р., Дозорцев В.М., Магид С.И. и др.); группа эргономических требований (Роберт И.В., ВострокнUTOва И.Е., Мухаметзянов И.Ш., Семеновой Н.Г. и др.). Конкретизируем каждую группу требований непосредственно для ПСТ, используемых для обучения студентов-электриков.

Группа дидактических требований к ПСТ. Охарактеризуем и обоснуем дидактические требования, предъявляемые к ПСТ.

Разработка ПСТ с учетом дидактических возможностей ИКТ. Вслед за Роберт И.В. [3], к дидактическим возможностям ИКТ отнесем: незамедлительная обратная связь; компьютерная визуализация; компьютерное моделирование; автоматизация сбора, обработки, архивирования, хранения, передачи информации; автоматизация процессов вычислительной, информационно-поисковой деятельности; автоматизация процессов обработки результатов учебного эксперимента; автоматизация процессов информационно-методического обеспечения, организационного управления учебной деятельностью и контроля результатов усвоения.

Это позволяет индивидуализировать учебный процесс, расширить образовательный контент, обеспечивает возможность изменения характера

взаимодействия всех участников образовательного процесса, что способствует реализации учебной деятельности на более высоком качественном уровне.

В нашем исследовании мы дополнили традиционную, классическую группу дидактических возможностей ИКТ следующим требованием к ПСТ – это *обеспечение профессиональной направленности контента ПСТ*. Введенное нами требование способствует:

- формированию у студентов-электриков умений, навыков необходимых для будущей профессиональной деятельности на конкретно взятом электроэнергетическом предприятии. Для наиболее качественной реализации профессиональной направленности контента разрабатывать ПСТ по профессиональным дисциплинам студентов-электриков предлагается преподавателями вузов совместно с представителями электроэнергетического предприятия [5].

- повышению мотивации к освоению профессиональных дисциплин, так как прослеживается прямая связь между изучаемым материалом и реальными задачами будущей профессиональной деятельности на электроэнергетическом предприятии.

- снижению сроков адаптации будущих выпускников электроэнергетической специальности на рабочем месте, что позволяет в более короткие сроки приступить к полноценной профессиональной деятельности.

Более подробно введенное нами новое требование отражено в работе [4].

Группа программно-технологических требований.

Обеспечение открытой архитектуры и применение свободно распространяемых программных оболочек [6].

- открытая архитектура ПСТ позволяет повысить гибкость и адаптируемость программы к совершенствованию. Открытая архитектура программы позволяет легко интегрировать в структуру ПСТ дополнительные модули: дидактические единицы (задания по отдельным разделам и темам профессиональной дисциплины) и компоненты дидактического цикла обучения (тренировочные задания, задания на самостоятельную работу, контроль). Кроме этого открытая архитектура позволяет легко изменять функционал под конкретные учебные задачи, подключать сторонние инструменты (базы данных, LMS-системы).

- применение свободно распространяемых программных оболочек позволяет обеспечивать переносимость контента между платформами; упрощает обмен материалами между преподавателями и студентами; позволяет легко экспортировать/импортировать тесты, схемы, методические материалы.

Обеспечение информационной открытости при разработке ПСТ означает, что ресурс должен быть доступным для всех участников образовательного процесса и легко интегрируемым в образовательную среду, что способствует повышению эффективности обучения.

Возможность использования в онлайн и офлайн формате. ПСТ необходимо разрабатывать с поддержкой как онлайн-, так и офлайн-режимов, что обеспечивает непрерывность учебного процесса, расширяет доступность

обучения и повышает устойчивость к техническим ограничениям образовательной среды.

Группа эргономических требований.

Как отмечено исследователями в работе [7] эргономические требования характеризуются двумя основными категориями: требования сохранения здоровья и эстетическими критериями. Вопросам здоровьесбережения в электронных образовательных ресурсах (ЭОР) посвящены работы таких исследователей как Роберт И.В., Граб В.П., Димова А.Л., Касторнова В.А., Мухаметзянов И.Ш. и др.

Вопросам эстетических критериев посвящены работы исследователей Роберт И.В., Вострокнутова И.Е., Зинченко В.П., Семеновой Н.Г. и др.

На основании проведенного анализа исследований можно сформировать эргономические требования к ПСТ по следующим группам:

- зрительная эргономика: читаемость текста, цветовое оформление, защита зрения (регулирование яркости экрана, смена светлой/темной темы, отсутствие мерцаний);

- интерфейс и навигация: простота и интуитивность интерфейса, обратная связь.

- когнитивная нагрузка: порционность располагаемой на экране информации, понятный язык интерфейса.

- физическое взаимодействие: минимизация точных движений (элементы управления соизмеримы с размерами экрана, способ взаимодействия с элементами интерфейса Drag-and-drop с «магнитной» привязкой).

- индивидуализация и комфорт: гибкость интерфейса (масштабирование, скорость воспроизведения анимации), учет утомляемости (таймер, напоминания о перерыве через установленные промежутки времени).

- доступность: поддержка работы с клавиатуры, совместимость с экранными дикторами, альтернативные способы ввода (голосовой ввод).

Выводы:

1. Обосновано новое категориальное понятие – «программное средство-тренажер (ПСТ)» под которым будем понимать «специализированное программное обеспечение разработанное с учетом дидактических возможностей ИКТ и предметных особенностей обучения студентов, ориентированное на формирование профессиональных умений и навыков, посредством комплекса заданий и упражнений симулирующих задачи профессиональной деятельности на промышленных предприятиях».

2. Выделены следующие группы требований к ПСТ для обучения студентов-электриков профессиональным дисциплинам: дидактические, программно-технологические, эргономические.

Список литературы

1. Дозорцев, В. М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов - теория, методология построения и использования

: автореферат дис. доктора технических наук : 05.13.01, 05.13.06. – Москва, 1999. – 43 с.

2. Методические рекомендации по формированию цифровой среды дополнительного профессионального образования и профессиональной подготовки персонала энергетических предприятий государств-участников СНГ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://energocis.ru/wyswyg/file/RGK/Documents/MP%20по%20форм%20цифр.%20среды.pdf>. – 27.12.2025.

3. Роберт, И.В. Теория и методика информатизации образования (психолого-педагогические и технологические аспекты): монография / И.В. Роберт. – 3-е изд. – М.: ИИО РАО, 2010. – 356 с.

4. Семенова, Н. Г. Реализация предметных особенностей в электронных образовательных ресурсах по профессиональным дисциплинам студентов-электриков / Н. Г. Семенова, Т. В. Комиссарова // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2025. – № 1(245). – С. 122-131.

5. Семенова Н.Г., Комиссарова Т.В., Сравнительный анализ программ-тренажеров для подготовки студентов и работников в электроэнергетической отрасли // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции / под общей редакцией Л. А. Влацкой; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2025. – 370-374 с.

6. Регламент использования технологических и цифровых решений в образовательной деятельности вузов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sudact.ru/law/pismo-minobrnauki-rossii-ot-17112023-n-mn-115257/prilozhenie/reglament-ispolzovaniia-tekhnologicheskikh-i-tsifrovyykh/> . – 02.01.2026.

7. Крайнова Е.А., Тихонов Ю.А., Снадченко С.В. Эргономический подход к проектированию электронных образовательных ресурсов // Проблемы современного педагогического образования. 2024. №85-3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ergonomicheskiy-podhod-k-proektirovaniyu-elektronnyh-obrazovatelnyh-resursov> . – 10.12.2025.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА - КОСМИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

**Коровин Н.В., Иванова А.П., д-р техн. наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Космические генераторы электроэнергии являются основными источниками питания бортовых систем космических аппаратов. Их надежная работа определяет функционирование систем связи, навигации, управления научными приборами и оборудованием.

В условиях космического пространства энергетические установки должны отличаться высокой надежностью, малой массой и устойчивостью к экстремальным факторам внешней среды.

Уникальная особенность космической техники заключается в том, что она может использоваться для генерации электроэнергии в космосе и передачи ее в любую точку нашей планеты.

В настоящий момент электричество является наиболее востребованным видом энергии, так как может сохраняться в различных формах, преобразовываться в другие виды энергии, передаваться дистанционно.

Широкие перспективы имеет идея создания космических генераторов для передачи энергии, через космические ретрансляторы в наиболее энергоистощенные районы.

К перспективным направлениям развития энергосистем в космическом пространстве, можно отнести: применение микроволнового луча; преобразование электроэнергии в другие виды; создание эффективных ретрансляторов больших объемов энергии на безопасные, большие дистанции.

Проектирование космических генераторов связано с жесткими ограничениями по массе, объему и ресурсу работы. На этапе проектирования важную роль играет начертательная геометрия, обеспечивающая точное пространственное моделирование элементов конструкции. Методы проекционного черчения позволяют анализировать форму, размеры и взаимное расположение узлов генераторов.

В современной космической технике применяются солнечные генераторы, радиоизотопные термоэлектрические генераторы и перспективные ядерные энергетические установки малой мощности. Каждый тип генератора обладает собственными конструктивными и энергетическими особенностями.

1. Солнечные Генераторы:

- Используют солнечные панели, преобразующие энергию Солнца в электричество.
- Идеальны для спутников и аппаратов, вращающихся вокруг Земли или находящихся ближе к Солнцу.

2. Радиоизотопные Термоэлектрические Генераторы (РИТЭГи):

- Преобразуют тепло от естественного распада радиоактивных изотопов в электричество.
 - Используют плутоний-238, который выделяет стабильное тепло.
 - Не имеют движущихся частей, долговечны (десятилетия) и надежны, но имеют низкий КПД.
 - Основной источник энергии для миссий в дальний космос (например, «Вояджеры», «Кьюриосити»).
3. **Космические Ядерные Реакторы** (в разработке/исследованиях):
- Предполагается использование для мощных станций на Луне или для глубокого космоса.
 - Отличаются от РИТЭГов тем, что используют цепную реакцию, а не просто тепло распада.

Сравнительный график изменения относительной мощности солнечного генератора и РИТЭГ, представлен на рисунке 1.

Доля выработки энергии космическими генераторами

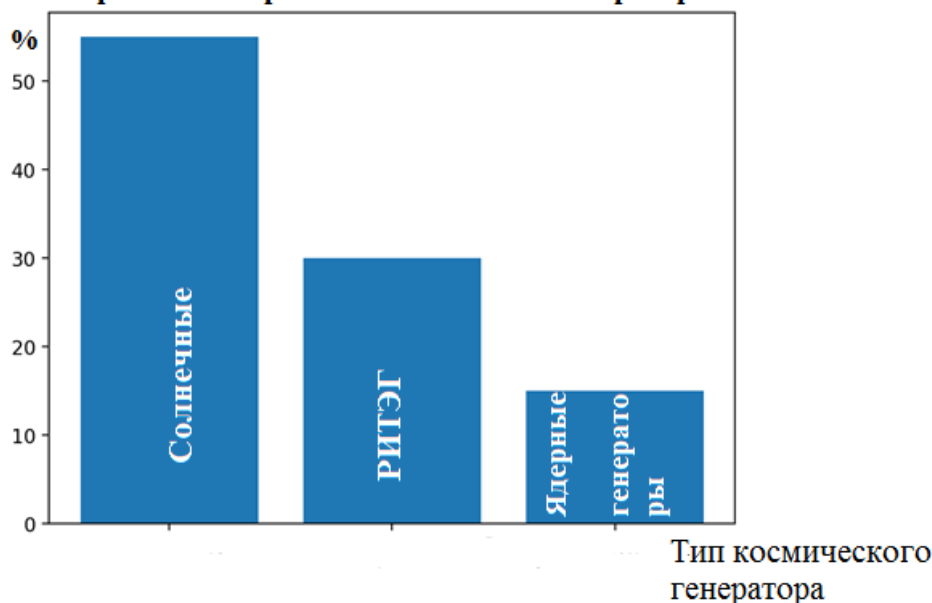


Рисунок 1 – Сравнительный график изменения относительной мощности солнечного генератора и РИТЭГ

Основные характеристики космических генераторов включают установленную электрическую мощность, удельную мощность (отношение мощности к массе), коэффициент полезного действия, срок активного функционирования, устойчивость к радиационному и температурному воздействию, а также габаритные размеры и конфигурацию.

Солнечные генераторы характеризуются высокой удельной мощностью и длительным сроком службы, однако их эффективность зависит от ориентации и удаленности от Солнца.

Радиоизотопные генераторы обеспечивают стабильную выработку электроэнергии независимо от внешних условий, но имеют большую массу и относительно низкий КПД.



Рисунок 2 – Условное соотношение выработки электроэнергии различными типами космических генераторов

Перспективы развития космических генераторов связаны с повышением энергетической эффективности и снижением массы конструкций.

Интеграция возобновляемых источников энергии в микросеть имеет достаточные перспективы. Свидетельством этому является создание в России Ассоциации развития возобновляемой энергетики [4].

Сравнительный графический анализ показывает, что солнечные генераторы обладают высокой начальной мощностью (рисунок 2), но подвержены деградации фотоэлементов и зависимости от условий освещенности, тогда как радиоизотопные генераторы обеспечивают более стабильную характеристику выработки энергии на протяжении длительного срока службы.

На практике выбор энергетической системы определяется назначением миссии, длительностью перелета, допустимой массой, а также требованиями к надежности.

Особое место занимает вопрос развития космической техники связанный с превращением солнечной энергии в электрическую, с помощью полупроводниковых фотоэлектропреобразователей.

При этом важным аспектом является проектирование приборов и систем в электротехнике, обеспечивающее эффективность работы приемных устройства. Это включает в себя оптимизацию расхода энергии, повышение коэффициента мощности, обеспечение безопасности при эксплуатации, что в свою очередь требует не только глубоких знаний в электротехнике, но и использование современных технологий и инструментов для эффективного управления энергией и ресурсами [5].

Космическая энергия имеет широкий спектр использования в наземных условиях. Например, в связке с солнечными батареями. Когда солнечная батарея генерирует электрический ток, весь ток проходит через контроллер заряда, так как напряжение и ток могут меняться, контроллер выравнивает его

значения и начинает заряжать аккумулятор и встречно питать потребителя, после того как батарея перестала вырабатывать энергию, аккумулятор начинает питать потребителя [6].

В настоящий момент более тридцати государств используют процесс создания электрической энергии на основе солнечной, при достаточно высокой стоимости.

Считается, что космический аппарат выполняет несколько функций, такие как: сбор солнечной энергии через батареи или тепловые двигатели, передачу ее на поверхность земли для дальнейшего преобразования в другие виды энергии. Аппарат не будет подвержен земным погодным условиям и воздействию силы тяжести, но солнечные бури и метеоритные дожди окажут на него влияние.

Существенным достоинством космических аппаратов по сбору солнечной энергии, можно считать возможность использования кольцевой системы энергоприемников на орбите вокруг планеты, позволяющей в любой момент времени иметь несколько из них находящихся в зоне солнечного освещения. Безвоздушная атмосфера создает защиту от коррозии оборудования, увеличивая его долговечность.

Использование космической энергии открывает широкие возможности интеграции возобновляемых источников в систему энергообеспечения нашей планеты.

Список литературы

1. Куликов А.А. Космические энергетические системы. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана.
2. Романов В.Н. Проектирование энергетических установок космических аппаратов. – М.: Машиностроение.
3. Харитонов В.А. Электроэнергетические системы космических летательных аппаратов. – М.: Энергоатомиздат.
4. Муллаянов Р.И., Иванова А.П. Интеграция возобновляемых источников энергии в микросеть. В сборнике: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. материалы Всероссийской научно-методической конференции, посвященной 70-летию Оренбургского государственного университета. Оренбург, 2025. С. 1182-1186.
5. Дербенева В.А., Иванова А.П. Проектирование приборов и систем в электротехнике. В сборнике: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург, 2024. С. 1153-1155.
6. Штыков В.К., Иванова А.П. Перспективы применения солнечных батарей на железнодорожном транспорте. В сборнике: Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития. Материалы Международной научно-исследовательской конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Редколлегия: А.Н. Попов [и др.]. Оренбург-Самара, 2021. С. 194-195.

АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОНОМНЫХ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ

**Коротков Н.В., Безгин А.С., канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Снабжение электроэнергией областей Сибири, Дальнего Востока, Заполярья, всегда было не простой задачей. Поскольку данные регионы являются труднодоступными в плане логистики, а также в силу отсутствия узлов подключения к закольцованной энергосистеме Российской Федерации, они активно застраиваются автономными гибридными энергокомплексами (АГЭК). Данные комплексы содержат дизель-генераторные установки (ДГУ), фотоэлектрические модули (ФЭМ) в составе солнечной электростанции (СЭС), а также модули аккумуляторных батарей (АКБ) в составе системы накопления электроэнергии (СНЭ). Все эти три компонента АГЭК позволяют обеспечить электроэнергией потребителей в изолированном режиме [1].

Ключ к успеху таких систем лежит не только в выборе оборудования, но в глубоком понимании и анализе их совместной работы как единого энергетического организма. Каждый компонент обладает уникальными характеристиками: ДГУ – стабильность и управляемость, СЭС – экологичность и переменная генерация, СНЭ – быстрый отклик и функция буферизации. Оптимальное использование их потенциала требует гибкого распределения ролей в течение суток в зависимости от нагрузки, уровня инсоляции и состояния накопителя.

Целью данной статьи является анализ поведения и взаимодействия компонентов гибридной энергосистемы на основе детального рассмотрения суточных графиков нагрузки и генерации. Сквозной анализ различных режимов работы – от ночной стабилизации сети ДГУ до полуденного доминирования СЭС – позволяет оценить баланс мощности, эффективность использования топлива и роль СНЭ как ключевого элемента, обеспечивающего гибкость и устойчивость всей системы. Такой подход даёт основу для дальнейшей оптимизации параметров настройки и повышения общей надёжности автономного энергоснабжения.

Для наглядной демонстрации принципов взаимодействия компонентов АГЭК рассмотрим типичный суточный график работы системы, условно разделенный на несколько характерных режимов.

Участок №1 (00:00 – 07:00): Ночной режим с доминированием ДГУ и утренним подключением СЭС и СНЭ. Данный участок показан на рисунке 1. В этот период система функционирует в классическом для автономных объектов режиме с дизельной генерацией как основой.

С 00:00 до 03:00 ДГУ работает с заданной уставкой по мощности, полностью покрывая прогнозируемую нагрузку и выполняя критически

важную функцию задания опорного напряжения и стабилизации частоты в сети. СНЭ и СЭС неактивны.

С 03:00 до 05:30 вступает в работу СНЭ. Его роль заключается в «срезе» пиков потребления, которые могут превысить установленную мощность ДГУ. Это позволяет избежать перегрузки дизель-генератора и работы его в неоптимальном режиме, сохраняя заданный уровень выдаваемой мощности. ДГУ остаётся источником базовой мощности и опорного напряжения.

С 05:30 до 07:00 к системе подключается СЭС, чья генерация начинает плавно нарастать с восходом солнца. Мощность от СЭС пропорциональна инсоляции и начинает вносить вклад в покрытие нагрузки. При этом СНЭ продолжает выполнять функцию источника «среза» пиковой нагрузки, а ДГУ сохраняет свою уставку по выдаче мощности. Этот период иллюстрирует плавный переход от чисто дизельного режима к гибриднему.

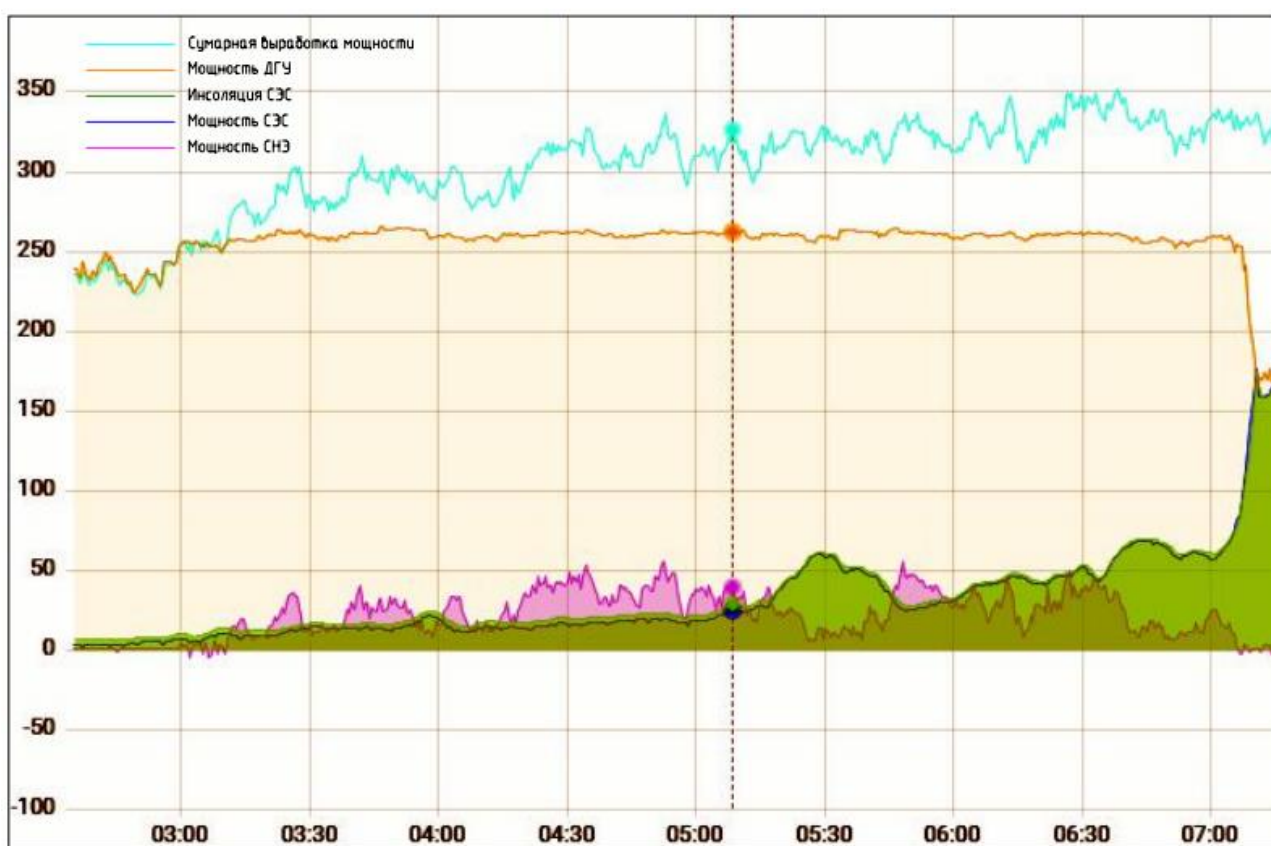


Рисунок 1 – Участок работы АГЭК №1 (00:00 – 07:00)

Участок №2 (07:00 – 11:00): Утренний переходный режим с лидирующей ролью СЭС. Данный участок характеризуется существенным ростом генерации от СЭС и сменой ролей. Участок №2 показан на рисунке 2.

СЭС переходит в режим с уставкой по ограничению мощности, становясь основным источником генерации. Избыток солнечной энергии, не потребляемый нагрузкой, направляется на заряд СНЭ.

ДГУ переключается в режим «подхвата». Его задача – мгновенно компенсировать просадки в генерации СЭС из-за облачности, выступая

гарантом стабильности сети и продолжая задавать опорное напряжение. Это позволяет СЭС работать с максимальной эффективностью, не опасаясь нарушения баланса мощности.

СНЭ работает в гибридном режиме «заряд-разряд». Основной процесс – заряд от излишков СЭС. Однако, при резком увеличении нагрузки или снижении инсоляции, СНЭ способен мгновенно перейти в режим разряда, «срезая» пик и страхуя систему до выхода ДГУ на необходимую мощность.

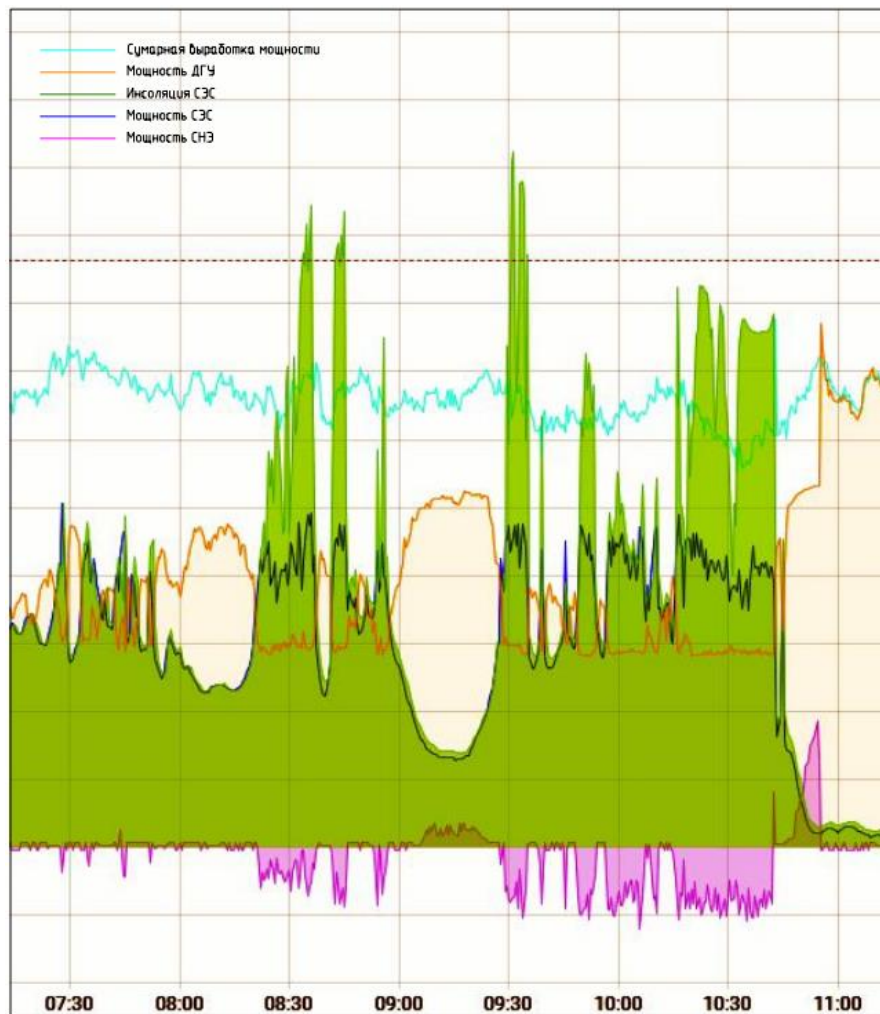


Рисунок 2 – Участок работы АГЭК №2 (07:00 – 11:00)

Участок №3 (11:00 – 23:00): Дневной и вечерний режим с возвращением к доминированию ДГУ. Это самый продолжительный и энергонапряжённый период, сочетающий высокую нагрузку и изменяющуюся генерацию от солнца.

СЭС продолжает работу, разгружая ДГУ. Её вклад в общий баланс мощности остаётся значительным, но переменным. Все излишки генерации также используются для заряда СНЭ.

ДГУ возвращается к роли «ведущего» источника, вновь становясь основным поставщиком мощности и безусловным источником опорного напряжения. Это связано с высоким и стабильным уровнем вечерней нагрузки, который не может быть гарантированно покрыт только СЭС.

СНЭ в этом периоде в основном функционирует в режиме «заряда», аккумулируя энергию от СЭС. Накопленный за день запас критически важен для вечернего пика, когда солнце уже не светит, а нагрузка велика.

Участок работы АГЭК №3 показан на рисунке 3.

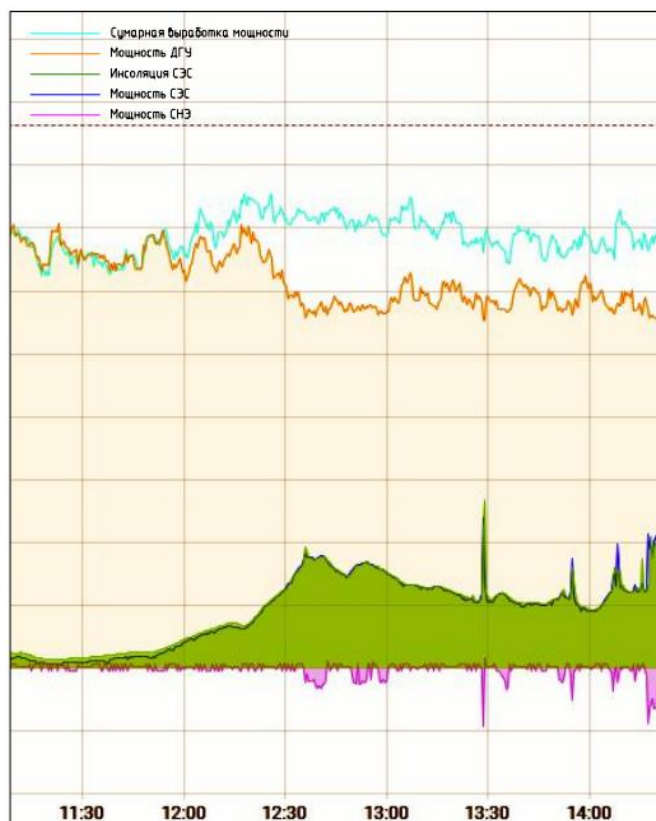


Рисунок 3 – Участок работы АГЭК №3 (11:00 – 23:00)

Представленные графики наглядно демонстрируют, как гибридная энергосистема динамически адаптируется к суточным циклам. Роли источников не являются фиксированными: ДГУ последовательно выполняет функции базового источника, резервного «подхвата» и снова ведущего генератора. СЭС переходит от вспомогательной утренней генерации к лидирующей роли и далее к дневной разгрузке ДГУ. СНЭ выступает универсальным инструментом: от корректора пиков ночью и утром до аккумулятора излишков днём. Такая гибкость и взаимодополняемость — залог устойчивости и экономии ресурсов всей системы.

Список литературы

1. Коротков, Н. В. Программно-аппаратное обеспечение автономных гибридных энергокомплексов / Н. В. Коротков, А. С. Безгин // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы : Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции, Оренбург, 15–17 октября 2024 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2024. – С. 164-168. – EDN JQСJE.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА MATHCAD ДЛЯ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ЦЕХОВОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Косенко А.Д., канд. техн. наук, доцент, Юрченко Е.А.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Проектирование систем электроснабжения промышленных предприятий относится к числу наиболее сложных инженерных задач, что обусловлено необходимостью обработки значительных объемов исходной информации. На различных этапах проектирования не только увеличивается количество обрабатываемых данных, но и изменяются их структура и характер. Указанная особенность, как правило, связана с ростом числа электроприёмников, разнообразием режимов их работы, а также усложнением схем электроснабжения и распределения электрической энергии. В результате возникла потребность в разработке и применении новых методологических подходов и расчётных методов, ориентированных на повышение точности и эффективности проектных решений. Особое значение при этом приобретает специализированный подход, обеспечивающий формализованное описание структуры распределения электрических нагрузок с учётом взаимного геометрического расположения источников питания и потребителей электроэнергии, а также их функциональных и режимных характеристик.

Уравнение прямой, определяющей медианы в рассматриваемом треугольнике, задается выражением:

$$kx + b = y \quad 1)$$

Координаты точки пересечения находятся путем решения соответствующей системы уравнений:

$$\begin{cases} k_1x + b_1 = y \\ k_2x + b_2 = y \end{cases} \quad 2)$$

Суммарное расстояние от точки расположения подстанции до нагрузок будет определяться по формуле:

$$S = \sum_{i=1}^k \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad 3)$$

где k – количество нагрузок;
 (x_i, y_i) – координаты i -ой нагрузки;
 (x, y) – координаты i -ой подстанции.

Для понимания действий с помощью рисунка 1 показывается тело программы в MathCad. Для выполнения решения метода приводится алгоритм решения:

- 1) проверяется условие, что все точки принадлежат одной прямой:
 - матричным способом решается система уравнений (2);
 - используя координаты первых двух точек генерируется уравнение прямой, которая будет проходить через них (таким образом задаются коэффициенты a и b);
 - используя цикл в MathCad составляется условие, которое будет определять лежит ли точка на построенной прямой, если ответ отрицательный, то k прибавляем единицу;
 - далее выполняется проверка на причастность точек к построенной прямой, параметр q должен быть равен количеству нагрузок – s , если ответ положительный, то следуем далее по циклу;
- 2) нахождение координат оптимального расположения цеховой подстанции:
 - определяется сколько шагов будет содержать цикл, их количество соответствует выражению $\log_3 k$;
 - выражение $k/3^{n-1}$ показывает сколько точек в рассматриваемом количестве переменных будет иметь необходимый вес;
 - необходимо далее по циклу определить середину двух сторон треугольника;
 - решая приведенную выше систему уравнений (2) необходимо определить точку, которая будет являться точкой пересечения прямых построенного треугольника (они будут медианами этого треугольника);
 - запишем в цикле значение равное координатам этого пересечения медиан, в тот же массив данных;
 - после выполнения цикла в составленной матрице определим координаты цеховой подстанции;
- 3) по формуле (3) определяется суммарное расстояние от подстанции до нагрузок.

На рисунке 1 и 2 представлена реализация метода в программной среде MathCad.

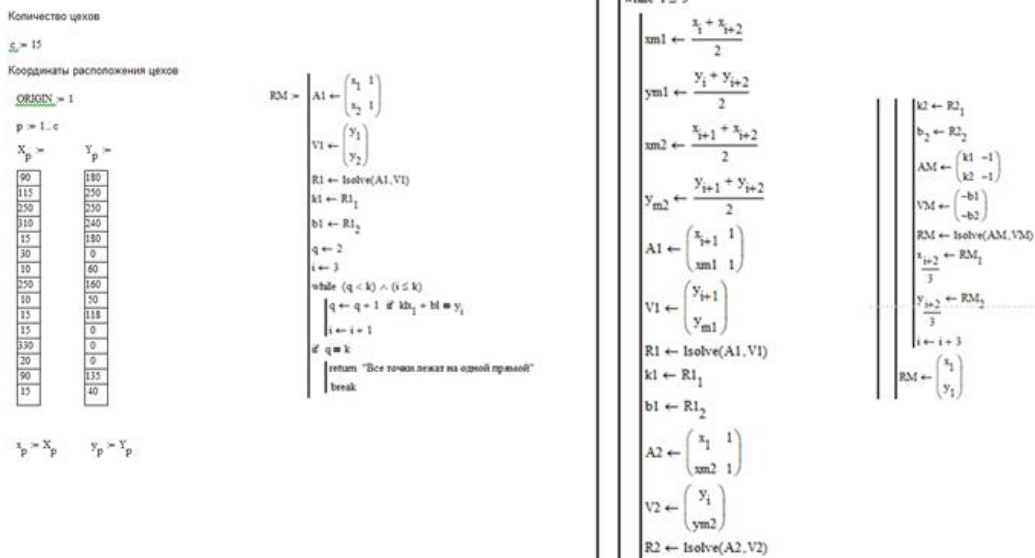


Рисунок 1 – Метод медиан

$$S_2 = \sum_{p=1}^c \sqrt{(X_p - XM)^2 + (Y_p - YM)^2} \quad S_2 = 2.189 \times 10^3$$

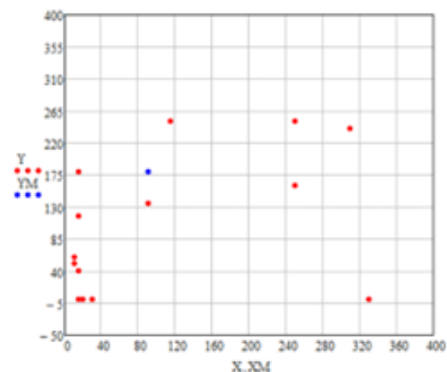


Рисунок 2 – Относительное расположение ЦТГ на предприятии и определение суммарного расстояния от центра до рассредоточенных нагрузок

Расчет методом сопряженных градиентов. Принцип расчета состоит в следующем:

Шаг 1. Вычисление антиградиента в произвольной точке $x(0)$:

$$d_0 = -f'(x_{(0)}) \quad (4)$$

Шаг 2. Вычисление нового приближения:

$$x^k = x^{k-1} + s^k \cdot t^k$$

5)

На рисунке 3 представлен листинг программы MathCad, где реализовано решение задачи методом сопряженных градиентов и отображен график расположения ЦТП по результатам расчетов и поиска минимума целевой функции.

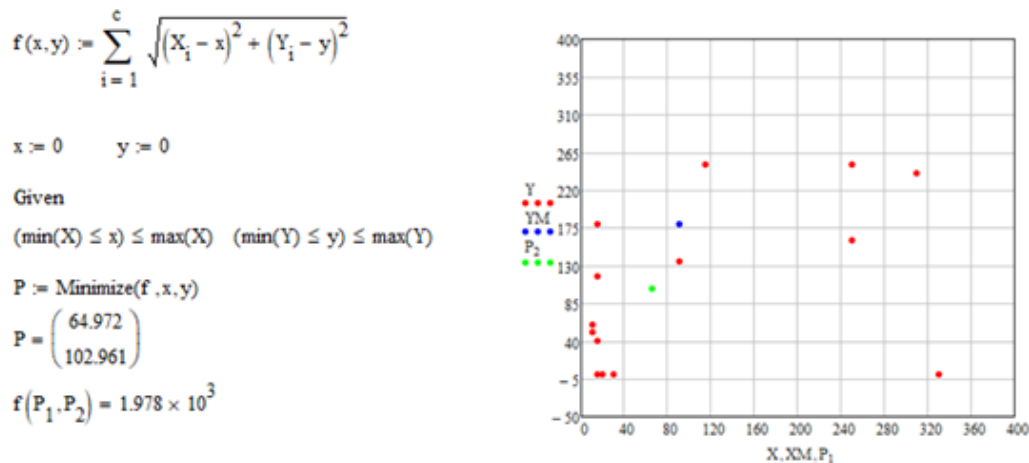


Рисунок 3 – Метод сопряженных градиентов

Выводы:

1. Разработка автоматизированной системы выбора оптимального места расположения цеховой трансформаторной подстанции является актуальной, позволяющим проектировать более экономичные сети.

2. Метод медиан для нахождения координат ПТП дает результат, при координатах пятнадцати нагрузок координаты ЦТП {90; 180}, а сумма длин кабельных линий 2189 метров.

3. Использование методов оптимизации для поиска координат ЦТП оказалось целесообразным. При тех же условиях найденные координаты ЦТП методом сопряженных градиентов {64,972; 102,961}, а сумма длин кабельных линий 1978 метров. Эффект от применения метода сопряженных градиентов составил 9,639% по сравнению с методом медиан.

Список литературы

1. Гринкруг, М. С. Задача проектирования системы электроснабжения на основе минимизации приведенных затрат / М. С. Гринкруг, С. А. Гордин // Двенадцатая всерос. науч.-техн. конф. «Энергетика, экология, надежность, безопасность». – Томск, 2006.

2. Овчаренко, А.С. Техничко-экономическая эффективность систем электроснабжения промышленных предприятий / А.С. Овчаренко, М.Л. Рабинович. – Москва: Техника, 2005. – 172 с.

3. Кротенок, В. В. Технико-экономическое обоснование выбора места расположения подстанции / В. В. Кротенок, Ю. В. Рабская // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. – 2011. – № 3. – С. 49–56.

4. Branch, M. A., T. F. Coleman, and Y. Li, "A Subspace, Interior, and Conjugate Gradient Method for Large-Scale Bound-Constrained Minimization Problems,"SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 21, Number 1, pp. 1–23, 1999.

5. Sorensen, D. C. Minimization of a Large-Scale Quadratic Function Subject to an Ellipsoidal Constraint / D. C. Sorensen // Department of Computational and Applied Mathematics, Rice University, Technical Report TR94-27, 1994.

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ НАХОЖДЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ЛЭП

**Кочетков Д.А., Семенова Н.Г., д-р пед. наук, канд. техн. наук, профессор
Федерально государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

В современном мире электросети являются критически важной инфраструктурой для функционирования экономики, социальной сферы и повседневной жизни. Надежное, оперативное и эффективное обнаружение и локализация повреждений линий электропередач (ЛЭП) играет ключевую роль в обеспечении устойчивого электроснабжения.

Главные причины повышения актуальности автоматизации этого процесса:

1) Рост и усложнение электросетей. Современные электросети становятся все более разветвленными, а их протяженность увеличивается, что осложняет традиционные методы ручной диагностики и поиска повреждений. В таких условиях автоматизированные системы позволяют быстро и точно определить поврежденный участок без необходимости долгих ручных проверок, что особенно важно при крупных авариях или экстренных ситуациях.

2) Повышение надежности электроснабжения. Обнаружение мест повреждений происходит вручную, что увеличивает время на их поиск и локализацию (купирование) аварий. Это может занимать часы или даже сутки, особенно при затрудненных условиях или в труднодоступных местах. Автоматизация позволяет значительно сократить время обнаружения повреждения, иногда до нескольких минут, что минимизирует простои и обеспечивает бесперебойность электроснабжения, а также снижает риск возникновения веерного отключения других потребителей.

3) Снижение экономических затрат. Автоматизированные системы снижают необходимость привлечения большого числа сотрудников в опасных или труднодоступных условиях. Они уменьшают расходы на диагностические работы и ремонт за счет точной концентрации усилий в проблемных местах, уменьшая время и трудозатраты.

4) Улучшение безопасности. Обнаружение повреждений в опасных или труднодоступных местах без необходимости отправки персонала снижает риски для работников. Использование автоматизированных систем и дистанционного мониторинга помогает минимизировать рабочие риски при ликвидации аварийных ситуаций.

5) Соответствие современным стандартам и нормативам. Многие национальные и международные стандарты безопасности и надежности требуют внедрения автоматизированных решений для мониторинга и диагностики инфраструктуры. Автоматизация помогает соблюдать эти

требования, повышая качество обслуживания, надежность и устойчивость электросетей.

Автоматизация процесса определения повреждений в линиях электропередач является стратегически важным направлением для модернизации энергетической инфраструктуры. Она обеспечивает устойчивое, эффективное и безопасное функционирование электросетей, что особенно актуально в условиях растущих требований к надежности поставок электроэнергии, необходимости снижения затрат и повышения технологического уровня отрасли.

Поскольку расчет режимных параметров линий электропередач включает в себя большое количество данных, необходимо выбрать такой метод расчета, который будет точно диагностировать режим работы ЛЭП с наименьшим количеством ресурсов-часов ЭВМ. В связи с вышесказанным, целью данной работы является анализ научно-технической литературы в области существующих методов расчета режимных параметров работы ЛЭП.

Проанализированные методы расчета нами условно разделены на 5 групп. Кратко рассмотрим каждый из них.

Методами узловых потенциалов с применением уравнений узловых напряжений [1] занимались Ананичева С.С., Мызин А.Л, где рассматривалась методика узловых потенциалов, которая включает в себя следующие шаги:

1) Сбор исходных данных:

- измерение узловых потенциалов и токов на ключевых узлах и ответвлениях;

- наличие базового (нормального) профиля работы сети без повреждений.

2) Построение модели сети:

- представление ЛЭП в виде системы уравнений узловых потенциалов;

- определение сопротивлений и характеристик линий.

3) Анализ исходных данных:

- сравнение текущих измерений с эталонными значениями;

- определение или расчет ожидаемых узловых потенциалов без повреждений.

4) Определение отклонений:

- оценка разницы между измеренными и расчетными потенциалами/токами;

- выделение аномальных зон, где отклонения превышают допустимые пороги.

5) Логика поиска повреждений:

- использование узловых потенциалов для локализации повреждений (например, поврежденных линий или участков);

- методы интерпретации: увеличение сопротивления, снижение потенциала, изменение токов помогают определить место повреждения.

6) Уточнение и диагностика:

- проведение дополнительных измерений в подозрительных зонах;

- использование методов обратной связи для уточнения места повреждения.

Можно сделать вывод о том, что повреждение в линии или узле вызывает характерные изменения потенциалов и токов, которые фиксируются и анализируются через уравнения узловых потенциалов для локализации дефекта.

Геоинформационная система (ГИС) [2] для определения места повреждения — это интегрированная информационная платформа, которая использует географические данные, данные измерений и аналитические алгоритмы для локализации повреждений в инфраструктуре (например, в линиях электропередач, трубопроводах или других объектах). Представитель данной методики Ципилева Т.А. выделила и описала основные компоненты:

1) Географические базы данных:

- хранятся карты, топографические и инфраструктурные данные (координаты линий, объектов, границ);

- используются для визуализации и ориентации в пространстве.

2) Датчики и измерения:

- вросные данные с датчиков (потенциалы, токи, сопротивления, параметры линий);

- включают показания в реальном времени или из архива.

3) Интеграция данных:

- слияние измерений с географической информацией для отображения в пространстве.

4) Аналитические модули:

- алгоритмы анализа отклонений и поиска повреждений на основе сравнения текущих данных с эталонными;

- используют модели сети и расчетные методы (например, методы узловых потенциалов).

5) Визуализация и интерфейс:

- на карте отображаются текущие состояния, подозрительные зоны, возможные места повреждения;

- обеспечивают оперативное принятие решений.

6) Функциональность оперативного реагирования:

- быстрое обнаружение и локализация, автоматизированные уведомления, планирование ремонтных работ.

Подробное описание **метода индикации** направления короткого замыкания [3] составляли Шуин В.А., Гусенков А.Г., где указывались выявления и определения расположения аварийного участка в электросетях или линиях электропередач, где произошло короткое замыкание (КЗ).

Целью данного метода является быстрое и точное определение направления (напрямую или по ходу тока) короткого замыкания для оперативного устранения аварии.

Принцип работы:

1) При возникновении КЗ в линии происходят характерные токовые и потенциальные сигналы.

2) Используются измерения на специальных устройствах или датчиках, расположенных в различных точках сети (например, в подстанциях).

3) Анализ изменения параметров (величина, направление тока и потенциала) позволяет определить, с какой стороны от точки измерения находится дефект.

Методами индикации могут служить: напряжение (сравнение потенциалов в разных точках, чтобы определить сторону короткого замыкания), ток (анализ потенциалов и токов для определения направления заземления или в линиях), автоматизированные устройства (множество современных реле и систем, использующих алгоритмы для автоматического определения направления).

Определением мест повреждений по *параметрам аварийного режима* [4] занимались Абрамочкина Л.В., Хрущев Ю.В., который основан на анализе изменений электросистемы после аварии или аварийного события. Этот метод часто используется в электроэнергетике для быстрого выявления и локализации повреждений, таких как короткие замыкания, обрывы линий или отключения оборудования.

Основные этапы и принципы метода:

1) Сбор данных о параметрах аварийного режима:

- в процессе аварии фиксируются параметры сети, такие как токи короткого замыкания, напряжения, угол сдвига фаз, частота и др;
- эти параметры собираются с помощью релейной защиты, измерительных трансформаторов, автоматических измерительных систем и других устройств.

2) Создание модели электросистемы до аварии:

- для анализа требуется знать исходное состояние сети, параметры линий, трансформаторов и нагрузок.

3) Анализ параметров после аварии:

- после возникновения аварии параметры сравниваются с нормальными значениями;
- в ключевых точках сети определяются изменения — например, снижение или повышение токов, изменение напряжений.

4) Проведение расчетов и моделирование:

- используют математические модели и компьютерные программы для симуляции аварийных режимов;
- в моделях можно варьировать параметры поврежденных элементов, чтобы сопоставить полученные параметры с реальными.

5) Определение места повреждения:

- на основе сравнительного анализа и моделирования выявляют участок сети, где параметры расходятся с нормальными, характерными для повреждений определенного типа;

- используются специальные алгоритмы (например, метод минимальной разницы, метод сравнения с эталонными режимами), чтобы определить наиболее вероятное место повреждения.

б) Подтверждение и локализация:

- после предварительного определения стороны повреждения проводят дополнительные измерения, проверки и визуальный осмотр для подтверждения локализации.

Волновой метод нахождения места повреждения в электропередачах [5] — это один из распространенных способов локализации повреждений, основанный на анализе отраженных и прошедших через поврежденный участок электромагнитных волн (волновых процессов). Этот метод особенно эффективен для линий электропередач, где возможна генерация и распространение высокочастотных сигналов.

Ермаков К.И., Кирюшин М.И. выделили основные принципы волнового метода:

1) Генерация сигнала:

- на одном из концов линии подается метроволновой сигнал (например, импульс высокий или низкий частотный);

- сигнал может быть вызван специальной тестовой установкой или коротким импульсом, созданным прибором (например, генератором импульсов).

2) Распространение волны:

- волновой сигнал распространяется по линии со скоростью, определяемой характеристиками проводов и изоляции;

- в идеальной ситуации он движется в обе стороны от источника.

3) Взаимодействие с повреждением:

- на поврежденном участке, например, на обрыве или коротком замыкании, происходит отражение части сигнала;

- оставшийся сигнал продолжает распространяться.

4) Фиксация сигналов:

- на другом конце линии или в определенной точке измерительные приборы фиксируют проходящие и отраженные сигналы во времени;

- время задержки между отправкой сигнала и его отражением используется для определения местоположения повреждения.

5) Обработка данных и расчет:

- знание скорости распространения волн по линии (обычно известна из характеристик линии).

б) Локализация повреждения:

- обнаружение времени отражения позволяет точно определить место повреждения на линии.

Особенностями данного метода являются точность значений параметров линии электропередач (скорость волны), применимость к коротким и длинным линиям, высокая точность при использовании современных цифровых измерителей и анализаторов сигналов.

Проведенный анализ позволяет выявить, что наиболее целесообразным методом определения мест повреждений на линии электропередач является метод определения мест повреждений с применением узловых потенциалов. Именно точность, чувствительность, экономичность и технологическая простота делает его одним из наиболее предпочтительных и наилучших методов для обнаружения повреждений на линиях электропередач.

Список литературы

1. Ананичева С.С., Мызин А.Л. Методы анализа и расчета замкнутых электрических сетей: Учебное пособие. – 4-е изд., исправл. / Екатеринбург: УрФУ, 2012. 94 с.
2. Ципилева Т.А. Геоинформационные системы: Учебное пособие. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2004 – 162 с.
3. Шуин В.А., Гусенков А.Г. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ. М.: НТФ «Энергопрогресс». // Приложение к журналу, «Энергетик» / Москва, 2001. 103 с.
4. Абрамочкин Л.В. Определение мест повреждений по параметрам аварийного режима: специальность / диссер. на соискание ученой степени канд. техн. наук по специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» / Абрамочкина Елена Викторовна; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2014. — 167 с.
5. Ермаков К.И., Кирюшин М.И. Программно–аппаратный комплекс ОМП: Учебное пособие / Чебоксары: ИПК РЗА, 2021 – 52 с.

SCADA-ПЛАТФОРМЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ: ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И СПЕЦИФИКА

Ларькина А.А., Шарипова С.Г., канд. хим. наук, доцент
Кумертауский филиал ОГУ

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) — это совокупность программных и технических средств, предназначенных для построения систем диспетчерского управления и сбора данных, работающих в режиме реального времени. Основное назначение таких комплексов — получение информации от объектов, её обработка, визуализация для оператора и долговременное хранение.

SCADA-решения являются важной частью автоматизированных систем управления технологическими процессами, применяются в учёте энергоресурсов, системах экологического контроля, научных установках, а также в комплексной автоматизации зданий и инженерных сооружений. Фактически они используются в любой отрасли, где требуется постоянное наблюдение за параметрами технологических процессов и возможность оперативного вмешательства человека.

Иногда SCADA-платформы дополняются средствами разработки программ для промышленных контроллеров. Такие расширенные комплексы относят к интегрированным решениям; в технической литературе для них также используется термин SoftLogic.

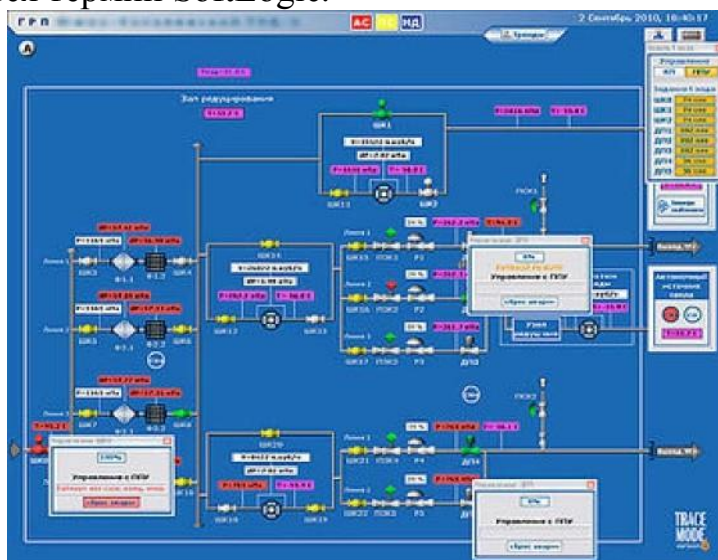


Рисунок 1 - Операторский интерфейс, разработанный в SCADA

Типовая SCADA-система обеспечивает выполнение ряда базовых задач:

1. Обмен данными в реальном времени с оборудованием нижнего уровня — ПЛК, удалёнными модулями ввода-вывода и другими устройствами — через специализированные драйверы связи.
2. Оперативную обработку поступающей технологической информации.
3. Реализацию алгоритмов логического управления и автоматизации.

4. Представление текущих параметров процесса в наглядной графической форме на рабочих местах операторов.
5. Ведение базы данных реального времени для хранения технологических показателей.
6. Поддержку аварийной сигнализации с регистрацией и анализом тревожных событий.
7. Сетевое взаимодействие между узлами SCADA-комплекса.
8. Интеграцию с внешними программами — СУБД, офисными приложениями и другим прикладным ПО.

Применение SCADA-технологий в электроэнергетике может быть реализовано, в частности, с использованием лабораторного стенда, представленного на рисунке 2.



Рисунок 2- Лабораторный стенд «SCADA -система в электроэнергетике»

Одним из примеров использования SCADA-технологий в энергетике служат учебно-лабораторные комплексы, имитирующие работу энергосистем. Подобные стенды применяются в образовательных учреждениях при подготовке студентов энергетических специальностей. Они позволяют моделировать режимы работы энергосетей, изучать принципы их построения и анализировать эксплуатационные параметры электростанций и распределительных сетей с использованием математических моделей.

Кроме учебных задач, такие комплексы дают возможность разрабатывать учебные версии SCADA-систем для диспетчерского контроля, управления и регулирования процессов выработки и распределения электроэнергии.

Энергетика относится к стратегически значимым отраслям экономики. Надёжность её функционирования напрямую связана с вопросами безопасности и устойчивого развития страны. В последние годы отрасль проходит этап масштабной модернизации, что повышает требования к оборудованию и средствам автоматизации.

Одновременно усиливается конкуренция между производителями аппаратных средств, поставщиками программных платформ и интеграторами, реализующими проекты автоматизации энергообъектов. Выбор технических и программных решений во многом определяется отраслевой спецификой. Если среди контроллеров существует множество специализированных предложений для энергетики, то выбор SCADA-платформ часто требует компромисса. Одни

заказчики предпочитают готовые закрытые системы с подтверждённой надёжностью, но ограниченными возможностями развития. Другие идут по пути доработки существующих платформ под собственные требования, привлекая программистов.

Цель подобных исследований обычно состоит в оценке программных средств, которые одновременно удовлетворяют общим требованиям к SCADA-системам и учитывают особенности энергетических объектов, а также перспективные потребности отрасли.

Далее рассмотрим обобщённую структуру типовой автоматизированной системы управления технологическими процессами, реализованной на базе SCADA-платформы (рисунок 3).

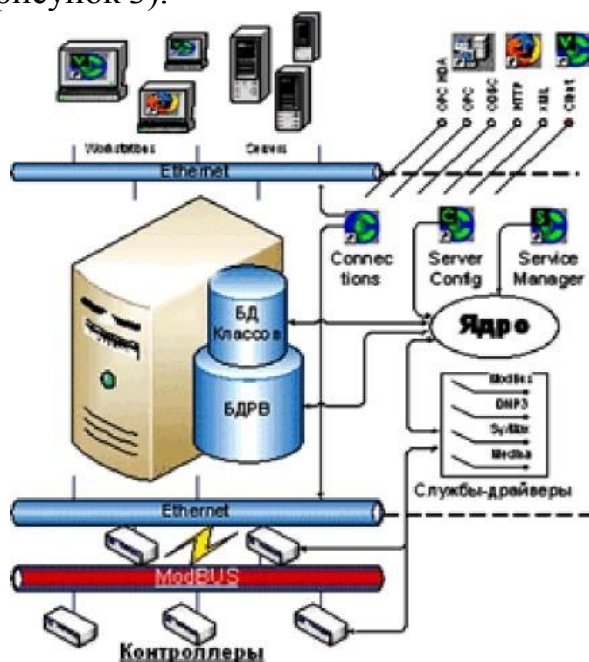


Рисунок 3 - Обобщенная структура традиционной АСУ ТП

Одним из решений, применяемых в энергетике, является платформа ClearSCADA, созданная компанией *Control Microsystems*. Она поддерживает различные телекоммуникационные стандарты и открытые протоколы обмена данными, что обеспечивает совместимость с оборудованием многих производителей, включая Siemens, Schneider, Yokogawa, Omron и других.

Функциональные возможности платформы подтверждены отраслевыми испытаниями, по результатам которых было разрешено её использование в составе систем управления и учёта в электроэнергетике. В настоящее время ClearSCADA активно внедряется на территориально распределённых объектах энергетической инфраструктуры.

Типовая система управления на базе SCADA включает контур управления технологическим процессом и информационный контур, обеспечивающий сбор, передачу и отображение данных. Работа возможна как в полностью автоматическом режиме, так и при участии оператора.

Серверный уровень выполняет функции центрального ядра: взаимодействует с базой данных и реализует логику обработки информации. При разработке ClearSCADA особое внимание уделялось удобству проектирования и

сокращению сроков внедрения.

Иерархическое представление объектов облегчает навигацию даже в крупных проектах. Каждый объект имеет собственную карточку параметров и методов с системой подсказок, помогающей избежать ошибок конфигурирования. Поддерживается коллективная разработка: несколько специалистов могут работать с одной базой проекта. Клиент-серверная архитектура позволяет выполнять настройку и отладку удалённо.

Средства визуализации

Платформа предоставляет развитый инструментарий для создания операторских интерфейсов. Графические элементы поддерживают работу со слоями и масштабирование в реальном времени, что даёт возможность строить детализированные, но удобные для восприятия мнемосхемы. Технология слоёв позволяет объединять различные аспекты отображения объекта на одной основе и упрощает параллельную работу нескольких разработчиков.

Дополнительным преимуществом является объектно-ориентированный подход: каждый графический элемент рассматривается как объект с набором свойств и методов, которые можно расширять в соответствии с характеристиками реального оборудования.

Список литературы

1. Елизаров, И. А. Интегрированные системы проектирования и управления: SCADA-системы : учеб. пособие для вузов / И. А. Елизаров [и др.]. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 160 с.
2. Николаев, М. Ю. Информационные технологии в электроэнергетике : метод. указания для проведения лаб. работ / М. Ю. Николаев [и др.]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2006. – 31 с.
3. Матвейкин, В. Г. Применение SCADA-систем при автоматизации технологических процессов : учеб. пособие для вузов / В. Г. Матвейкин, С. В. Фролов, М. Б. Шехтман. – М. : Машиностроение, 2000. – 176 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ТАБЛИЧНОГО ПРОЦЕССОРА MS EXCEL ПРИ РЕШЕНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Ларькина А.А., Андросов В.И., доцент
Кумертауский филиал ОГУ

Автоматизация сегодня стала неотъемлемой частью самых разных направлений деятельности человека. Её активно внедряют как в производственных процессах, так и в научной сфере. Причина очевидна: автоматизированные системы позволяют выполнять работу быстрее, снижать объём ручного труда и добиваться более высокой точности и эффективности. Эти изменения затронули и образование — в учебные программы всё чаще включают дисциплины, предполагающие использование вычислительной техники и специализированного программного обеспечения.

В гуманитарных исследованиях для анализа количественных показателей нередко применяются прикладные статистические пакеты, например Statistica. В естественнонаучных областях более востребованы среды математического моделирования и численных экспериментов — такие как MATLAB, Mathematica, Mathcad и их аналоги.

Тем не менее подобные программные комплексы требуют предварительного освоения и не всегда доступны на каждом компьютере. Поэтому в учебной практике удобно использовать универсальный инструмент, который не нуждается в сложной установке, интуитивно понятен и знаком большинству обучающихся ещё со школы. Одним из таких средств является табличный процессор Microsoft Excel, подходящий как для расчётов, так и для визуального анализа результатов.

Функциональность Excel включает автоматическое заполнение данных, копирование формул с закреплением ссылок, а также разнообразные способы графического отображения информации. При корректировке исходных чисел все связанные формулы пересчитываются автоматически, а построенные диаграммы обновляются без дополнительных действий со стороны пользователя.

К достоинствам Excel можно отнести [1]:

- возможность одновременно выполнять численные расчёты и отображать их результаты графически, что особенно удобно при использовании приближённых методов;
- широкую распространённость программного пакета Microsoft Office;
- развитые средства визуализации данных;
- наличие базовой подготовки по работе с программой у большинства студентов;
- реализацию вычислительных схем без необходимости писать макросы.

Рассмотрим, насколько удобен данный инструмент на практике, на примере расчёта разветвлённой цепи постоянного тока. Математическое описание такой цепи строится на основе уравнений, составленных по законам Кирхгофа.

Количество уравнений, необходимых для анализа цепи, определяется числом её ветвей и обозначается n^B . Уравнения, составленные по первому закону Кирхгофа, описывают баланс токов в узлах. Их число на единицу меньше количества узлов схемы:

$$n_1 = n_y - 1,$$

где n_y — число узлов.

Оставшиеся уравнения формируются по второму закону Кирхгофа и отражают баланс напряжений в контурах:

$$n_2 = n^B - n_1 = n^B - n_y + 1.$$

Если в цепи присутствуют идеальные источники тока, число независимых уравнений уменьшается на их количество. Тогда выражение принимает вид:

$$n_2 = n^B - n_y + 1 - n_i,$$

где n_i — число соответствующих ветвей [2].

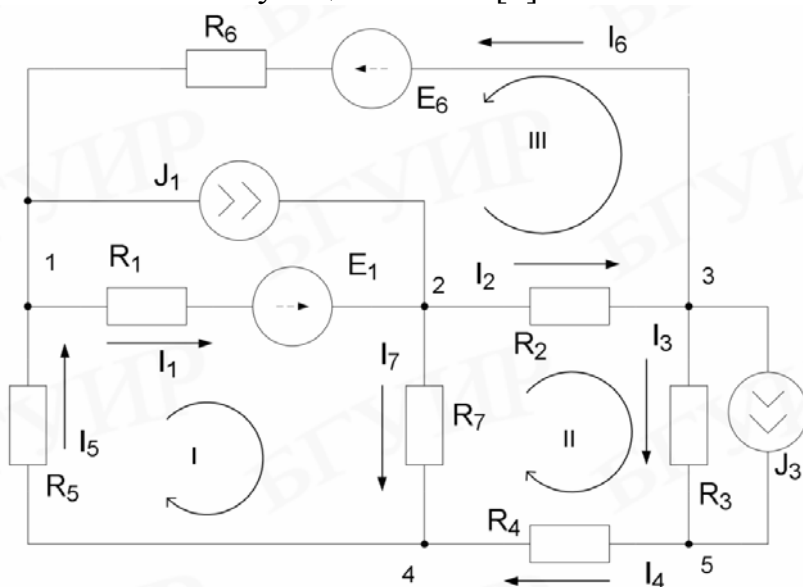


Рисунок 1 – Разветвленная цепь постоянного тока

Исследуемая схема (рис. 1) включает пять узлов и девять ветвей, две из которых содержат идеальные источники тока. Следовательно, требуется составить четыре уравнения по первому закону Кирхгофа и три — по второму.

Для узлов 1, 2, 3 и 5 записываются уравнения токов, а для трёх независимых контуров — уравнения напряжений. В результате получается система:

$$\left\{ \begin{array}{l} -I_1 - J_1 + I_5 + I_6 = 0 \\ -I_2 - I_7 + I_1 + J_1 = 0 \\ -I_3 - J_3 - I_6 + I_2 = 0 \\ -I_4 + J_3 + I_3 = 0 \\ R_1 I_1 + R_5 I_5 + R_7 I_7 = E_1 \\ R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4 - R_7 I_7 = 0 \\ R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_6 I_6 = E_1 + E_6 \end{array} \right.$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1																				
2																				
3	R1= 310		E1= 400		J1= 6		-1	0	0	0	1	1	0							6
4	R2= 150		E6= 500		J3= 2		1	-1	0	0	0	0	-1							-6
5	R3= 540						0	1	-1	0	0	-1	0							2
6	R4= 420					A=	0	0	1	-1	0	0	0					B=		-2
7	R5= 880						310	0	0	0	880	0	450							400
8	R6= 240						0	150	540	420	0	0	-450							0
9	R7= 450						310	150	0	0	0	240	0							900
10																				

Рисунок 2 – Скрин программы

Далее задаются числовые параметры элементов схемы. При заполнении таблиц удобно применять автозаполнение, что ускоряет ввод однотипных данных.

Полученную систему представим в матричной форме:

$$A \cdot x = B,$$

где A — квадратная матрица коэффициентов размером 7×7 ,
 x — вектор неизвестных токов,
 B — столбец свободных членов.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2								
3	R1= 310			E1= 400			J1= 6	
4	R2= 150			E2= 500			J3= 2	
5	R3= 540							
6	R4= 420							
7	R5= 880							
8	R6= 240							
9	R7= 450							
10								

Рисунок 3 – Скрин программы

После задания числовых параметров матрица будет выглядеть следующим образом:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1																				
2																				
3	R1= 310		E1= 400		J1= 6		-1	0	0	0	1	1	0							=H3
4	R2= 150		E6= 500		J3= 2		1	-1	0	0	0	0	-1							=-H3
5	R3= 540						0	1	-1	0	0	-1	0							=H4
6	R4= 420					A=	0	0	1	-1	0	0	0					B=		=-H4
7	R5= 880						=B3	0	0	0	=B7	0	=B9							=E3
8	R6= 240						0	=B4	=B5	=B6	0	0	=-B9							0
9	R7= 450						=B3	=B4	0	0	0	=B8	0							=E3+E4
10																				

Рисунок 4 – Скрин программы

После подстановки числовых значений формируется конкретная матрица

коэффициентов. Значения токов находятся через умножение обратной матрицы на вектор правых частей:

$$x = A^{-1} \cdot B.$$

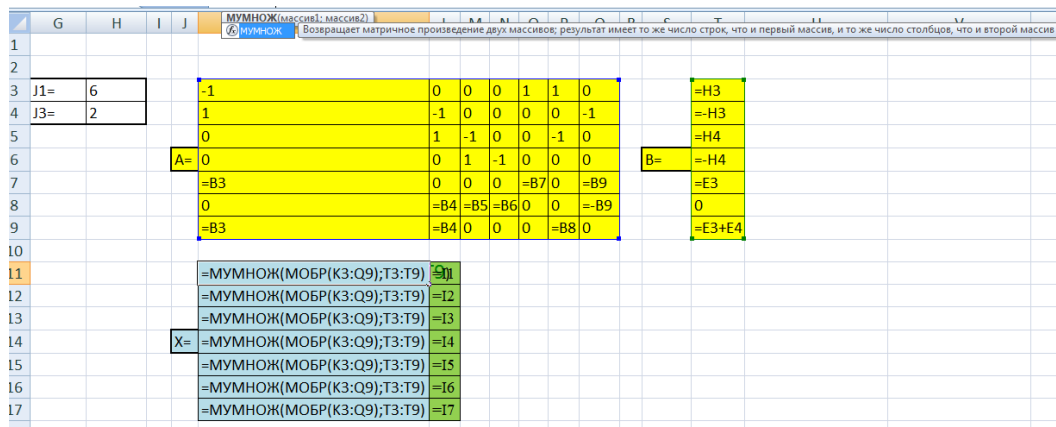


Рисунок 5 – Скрин программы

В Excel это удобно реализовать с помощью встроенных функций работы с матрицами, например МУМНОЖ. Подсказки при вводе формул уменьшают вероятность ошибок и упрощают освоение инструмента.

Полученные результаты можно представить в числовом виде и при необходимости дополнить графиками или таблицами:

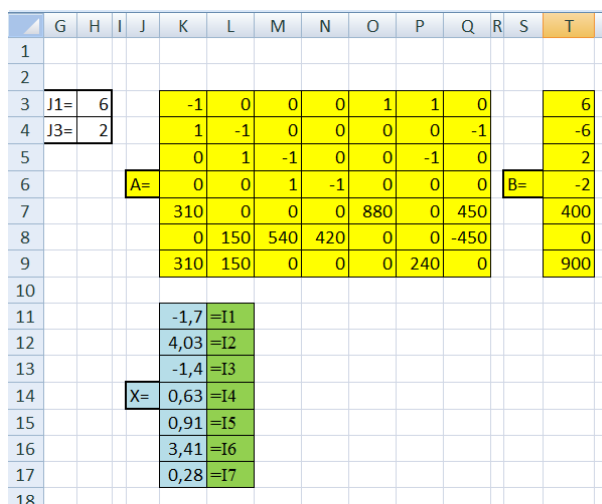


Рисунок 6 – Скрин программы

Рассмотренный способ носит демонстрационный характер, однако тот же принцип может применяться и для других инженерных расчётов. Его преимущество заключается в простоте: пользователю не требуется владеть языками программирования — достаточно уметь работать с формулами и стандартными функциями Excel.

На большинстве компьютеров уже установлен Microsoft Office, поэтому не нужно дополнительно настраивать среду разработки. Кроме того, файл с расчётной моделью занимает минимальный объём памяти, тогда как даже

простые специализированные программы требуют значительно больше ресурсов.

Перенос Excel-файла на другой компьютер обычно не вызывает затруднений, в отличие от программ, работа которых зависит от сторонних библиотек и настроек среды выполнения.

Список литературы

1. Иванов С.С. Применение MS Excel в инженерных расчетах / С.С. Иванов // Журнал «Современные технологии». – № 1. – 2017. – С. 58–62.
2. Семенов А.А. Использование электронных таблиц при решении инженерных задач / А.А. Семенов, И.В. Петров // Научно-методический журнал «Информационные технологии в образовании». – № 4. – 2015. – С. 32–36.

САУ БАРАБАНЫМ КОТЛОМ: ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ ЧЕТКОЙ ЛОГИКИ И КАСКАДНЫХ СХЕМ

Ларькина А.А.
Кумертауский филиал ОГУ

Барабанный паровой котёл является одним из ключевых элементов тепловых электростанций и крупных промышленных энергоустановок. Его работа характеризуется протеканием множества взаимосвязанных тепловых и гидродинамических процессов, выраженной инерционностью, нелинейным поведением и сильным влиянием параметров друг на друга. Основная задача автоматизированной системы управления таким котлом — стабильное получение пара требуемого давления и температуры при минимальных затратах топлива и обязательном соблюдении норм промышленной безопасности.

В промышленной практике используются как современные интеллектуальные методы управления, так и классические алгоритмы, основанные на детерминированной («чёткой») логике. К последним относятся ПИД-регуляторы и логические схемы с однозначными условиями срабатывания. Несмотря на развитие адаптивных и предиктивных подходов, именно традиционные решения по-прежнему преобладают на реальных объектах благодаря своей надёжности, прозрачности работы и соответствию действующим нормативам.

Далее рассматриваются общие принципы построения системы автоматического управления барабанным котлом на базе классических алгоритмов.

Для нормальной и безопасной работы котла необходимо поддерживать ряд ключевых параметров:

- Давление пара в барабане (P) — отражает баланс между тепловыделением при сжигании топлива и потреблением пара.
- Уровень воды в барабане (H) — критически важный показатель, отклонение которого может привести к серьёзным авариям.
- Соотношение «топливо–воздух» — определяет полноту сгорания и экономичность процесса.
- Разрежение в топке (S) — необходимо для устойчивого горения и безопасной работы оборудования.

Воздействие на объект осуществляется через изменение расхода топлива (B), воздуха (A) и питательной воды (W). Все контуры управления тесно связаны: например, увеличение подачи топлива вызывает не только рост давления пара, но и изменение уровня воды.

Регулирование давления пара.

Контур давления является ведущим и наиболее динамичным. Его задача — компенсировать колебания нагрузки и удерживать давление на заданном уровне. Обычно применяется каскадная схема: главный ПИ-регулятор сравнивает текущее давление с уставкой и формирует сигнал нагрузки. Этот сигнал передаётся в подчинённые контуры подачи топлива и воздуха.

Если давление падает, регулятор увеличивает управляющее воздействие, что приводит к росту тепловыделения. При превышении уставки сигнал уменьшается, снижая интенсивность горения. Одновременное управление подачей топлива и воздуха позволяет сохранять их согласованность.

Поддержание уровня воды.

Регулирование уровня воды в барабане осложняется динамическими эффектами, такими как «набухание» уровня и ложные колебания, возникающие при изменении расходов. Для компенсации этих явлений применяется трёхимпульсная схема — классическое решение на основе детерминированного алгоритма.

Регулятор получает три сигнала: фактический уровень воды, расход пара и расход питательной воды. Управляющее воздействие формируется с учётом разности потоков, что позволяет системе реагировать на возмущения упреждающе. В обобщённом виде алгоритм можно представить как ПИД-регулирование с дополнительными корректирующими слагаемыми по расходам.

Контур «топливо–воздух».

Для обеспечения полного сгорания топлива необходимо поддерживать требуемый коэффициент избытка воздуха. В системе используется перекрёстное регулирование: сигнал нагрузки, сформированный контуром давления, поступает одновременно в каналы управления топливом и воздухом. Дополнительную коррекцию вносит датчик содержания кислорода в дымовых газах, позволяющий точнее настраивать подачу воздуха.

Система защит.

Автоматические защиты также реализуются на основе чётко заданных логических условий по принципу «если — то». Типовые примеры:

- при чрезмерном повышении уровня воды подача питательной воды прекращается;
- при опасном росте давления или чрезмерном снижении уровня формируется команда на снижение нагрузки или останов котла;
- при исчезновении пламени немедленно блокируется подача топлива;
- при недостаточном расходе воздуха работа горелки запрещается.

Такие алгоритмы имеют однозначную структуру и легко поддаются проверке.

Преимущества и ограничения подхода.

Системы, построенные на основе классической логики, отличаются стабильностью работы, предсказуемостью поведения и понятностью для обслуживающего персонала. Они сравнительно просты в настройке, удобны для диагностики и сертификации, а также хорошо реализуются на стандартных промышленных контроллерах.

Однако у этого подхода есть и недостатки. Он менее эффективен при сильных нелинейностях объекта и изменении его характеристик во времени (например, при загрязнении поверхностей нагрева). Кроме того, такие системы предъявляют высокие требования к точности измерений.

Использование традиционных алгоритмов при автоматизации барабанных котлов остаётся распространённой инженерной практикой. Каскадное регулирование давления, трёхимпульсный контроль уровня и согласованное управление подачей топлива и воздуха в сочетании с жёстко заданными защитами обеспечивают устойчивую и безопасную работу оборудования.

Несмотря на развитие интеллектуальных методов управления, классические схемы продолжают играть базовую роль в энергетике. Их дальнейшее совершенствование связано не с отказом от проверенной структуры, а с внедрением дополнительных адаптивных механизмов, способных автоматически корректировать параметры регуляторов без нарушения общей логики системы.

Список литературы

1. Смирнов, Н.И., Петров, А.С. Модернизация системы управления барабанным котлом ТЭЦ на основе каскадных регуляторов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2020. – № 5. – С. 35-40.
2. Мирошниченко, В.В. Логические контроллеры в системах автоматизации: проектирование и программирование. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2017. – 256 с.

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ РАЗЪЕМНЫХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

**Масяев М.Н., Косенко А.Д., канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Обеспечение надежности и устойчивости функционирования Единой энергетической системы России является приоритетной государственной задачей, закрепленной в «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года». В условиях масштабной модернизации сетевого комплекса, предусмотренной «Схемой и программой развития электроэнергетических систем России на 2025–2030 годы» (приказ Минэнерго РФ № 2328 от 29.11.2024)^[6], первостепенными становятся технологии ранней диагностики дефектов оборудования. Одним из ключевых векторов развития, согласно ведомственному проекту «Цифровая трансформация ТЭК», является переход от системы планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию.

Наиболее уязвимым элементом подстанционного оборудования остаются разъемные контактные соединения. Согласно отраслевой статистике, нарушение их проводимости и последующий перегрев являются причиной до 40–60% аварийных отключений. Существующая нормативная база, в частности РД 153-34.0-20.363-99 «Основные положения методики инфракрасной диагностики...» и СТО 34.01-23.1-001-2017 (стандарт ПАО «Россети»), регламентирует периодичность тепловизионного контроля, как правило, 1 раз в год или после ремонтов. Однако дискретный характер таких инспекций не позволяет выявлять быстроразвивающиеся дефекты в периоды пиковых нагрузок или экстремальных погодных условий.

Для достижения поставленной цели нами проведен анализ научно-технической литературы в области методов диагностики разъемных контактных соединений, который позволил выделить следующие методы реализации:

К первой группе методов диагностики разъемных контактных соединений относится визуальный контроль. При использовании данного метода зрительным органом человека оценивается механическая целостность электрического соединения, отсутствие или наличие трещин, деформаций, загрязнений, видимых признаков окислений^[1]. Все эти факторы влияют на переходное сопротивление контактного соединения.

Достоинства метода:

Объективные количественные данные о температурном состоянии элемента; возможность точного определения места дефекта; Безопасность персонала (дистанционный метод); регламентирован ГОСТ Р 50571.16-2007

Недостатки метода:

Периодичность контроля (1 раз в 1–3 года); дефект может развиваться в межконтрольном интервале; невозможен контроль оборудования со сложной конструкцией (ячейки КРУ); зависимость от погодных условий при наружных работах; высокие затраты на обслуживание.

Ко второй группе относится метод термоиндикаторных наклеек, основанный на контактном способе измерения. Данный метод представляет собой простой и доступный способ первичной диагностики контактных соединений^[2]. Метод основан на использовании специальных индикаторных материалов, которые меняют свой цвет или физические свойства при достижении определенной температуры.

Достоинства метода:

Простота применения; не требует сложного оборудования; возможность применения в местах сложной конфигурации; низкая стоимость первичного контроля;

Недостатки метода:

Одноразовый контроль (необходимо менять индикаторы); менее объективные результаты; требует визуального наблюдения; не дает непрерывного мониторинга; невозможен дистанционный анализ.

К третьей группе относится комплексный метод оценки состояния разъемных контактных соединений, основанный на обработке данных с использованием систем искусственного интеллекта^[3]. Этот метод представляет собой современный подход к диагностике электрического оборудования, основанный на принципах цифровой трансформации и интеллектуализации.

Достоинства метода:

Адаптация к изменениям условий эксплуатации; Прогнозирование вероятности дефектов; Возможность автоматизации вычислительных процессов; Снижение ошибок при анализе; Оптимизация затрат на материалы и обслуживание на этапе проектирования.

Недостатки метода:

Высокая сложность разработки программного обеспечения; необходимость большого объема тренировочных данных; высокие материально-технические затраты; требует специализированных навыков разработчиков;

К четвертой группе относятся встроенные системы инфракрасного мониторинга в управляющих шкафах. Данный метод основан на международном опыте компаний представляет собой интегрированное решение для непрерывной диагностики электрооборудования. Системы содержат встроенные тепловизионные камеры (обычно микрокамеры), которые постоянно контролируют температурное поле внутри электрического шкафа^[4].

Достоинства метода:

Встроенная непрерывная диагностика; раннее обнаружение внутренних дефектов соединений; безопасность в высоковольтной среде; полная автоматизация процесса; интеграция с системами управления зданиями; возможность дистанционного анализа

Недостатки метода:

Очень высокая стоимость оборудования; сложность монтажа внутри шкафов; требует квалификации для настройки; отсутствие стандартизации подходов.

К пятой группе методов относятся автоматизированные системы непрерывного теплового мониторинга. Данный метод представляет собой наиболее перспективное направление развития диагностики. Система осуществляет непрерывный мониторинг температурного состояния оборудования в режиме 24/7, автоматически обнаруживая любые отклонения от нормальных значений^[5]. При обнаружении повышенной температуры система генерирует предупреждения, которые передаются персоналу в режиме реального времени. Накопленные исторические данные могут быть использованы для анализа тенденций развития дефектов и прогнозирования вероятности отказа оборудования.

Достоинства метода:

Непрерывный автоматизированный контроль 24/7; раннее выявление развивающихся дефектов; возможность контроля оборудования сложной конфигурации; отсутствие проводов питания (беспроводные датчики); возможность монтажа на концевых муфтах и кабельных наконечниках; интеграция с SCADA и системами управления энергообъектов.

Недостатки метода:

Высокие первоначальные затраты на оборудование; необходимость разработки программного обеспечения для обработки данных; требует навыков обращения с системой; зависит от надежности беспроводного канала связи.

Рассмотренные методы диагностики разъемных контактных соединений, а также их достоинства и недостатки представлены в таблице 1.

Проведенный анализ научно-технической литературы позволяет заключить, что наиболее целесообразно выбрать метод с использованием автоматизированной системы непрерывного теплового мониторинга. По сравнению с другими методами, он имеет ряд преимуществ, которые помогут более точно и своевременно оценивать состояние разъемных контактных соединений оборудования.

Таблица 1 - Результаты сравнительного анализа методов диагностики разъемных контактных соединений.

Метод контроля	Ф.И.О. ученых	Достоинства	Недостатки
Визуальный контроль	Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И., Троцкий-Марков Т.Е.	<ul style="list-style-type: none"> • Объективные количественные данные о температурном состоянии; • Возможность точного определения места дефекта; безопасность персонала (дистанционный метод); • регламентирован ГОСТ Р 50571.16-2007 	<ul style="list-style-type: none"> • Периодичность контроля (1 раз в 1-3 года); • Дефект может развиваться в межконтрольном интервале; • Невозможен контроль оборудования со сложной конструкцией (ячейки КРУ); • Зависимость от погодных условий при наружных работах; • Высокие затраты на обслуживание
Термоиндикаторные наклейки (контактный метод)	Лесив А.В.	<ul style="list-style-type: none"> • Простота применения; не требует сложного оборудования; • Возможность применения в местах сложной конфигурации; • Низкая стоимость первичного контроля 	<ul style="list-style-type: none"> • Одноразовый контроль (необходимо менять индикаторы); • Менее объективные результаты; требует визуального наблюдения; • Не дает непрерывного мониторинга; • Невозможен дистанционный анализ
Комплексный метод на базе снятых показаний с оборудования и их обработки системами искусственного интеллекта	Хальясмаа А.И., Горобец В.Л., Каликсанов Н.Т.	<ul style="list-style-type: none"> • Адаптация к изменениям условий; • Прогнозирование вероятности дефектов; • Возможность автоматизации вычислительных процессов; • Снижение ошибок при анализе; • Оптимизация затрат на материалы и Обслуживание на этапе проектирования 	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая сложность разработки ПО; • Необходимость большого объема тренировочных данных; • Высокие материально-технические затраты; • Требуется специализированных навыков разработчиков
Встроенные системы ИК-мониторинга в шкафах управления	Optris AG, FLIR	<ul style="list-style-type: none"> • Встроенная непрерывная диагностика; • Раннее обнаружение внутренних дефектов соединений; • Безопасность в высоковольтной среде; - полная автоматизация процесса; 	<ul style="list-style-type: none"> • Очень высокая стоимость оборудования; • Сложность монтажа внутри шкафов; • Требуется квалификации для настройки; • Отсутствие стандартизации подходов

		<ul style="list-style-type: none"> • интеграция с системами управления зданиями; • Возможность дистанционного анализа 	
Автоматизированная система непрерывного теплового мониторинга	Гаврилов А.В., Каликсанов Н.Т., Сарсенбаев Е.А.	<ul style="list-style-type: none"> • Непрерывный автоматизированный контроль 24/7; • Раннее выявление развивающихся дефектов; возможность контроля оборудования сложной конфигурации; • Отсутствие проводов питания (беспроводные датчики); возможность монтажа на концевых муфтах и кабельных наконечниках; • Интеграция с SCADA и системами управления энергообъектов 	<ul style="list-style-type: none"> • Высокие первоначальные затраты на оборудование; • Необходимость разработки ПО для обработки данных; • Требуется навыков обращения с системой; • Зависит от надежности беспроводного канала связи

Список литературы

1. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И., Троцкий-Марков Т.Е. Визуальный контроль электрооборудования в эксплуатации. Методология и практика применения // Известия электромашиностроительной промышленности. — 2018. — № 4. — С. 45–52.
2. Лесив А.В. Термоиндикаторные наклейки для диагностики температурного состояния электрических соединений // Энергетик. — 2019. — № 2. — С. 28–34. — Москва: ООО ТермоЭлектрика.
3. Хальясмаа А.И., Горобец В.Л., Каликсанов Н.Т. Искусственный интеллект в диагностике электрооборудования: применение машинного обучения для анализа данных // Электроэнергетика и электротехника. — 2020. — Т. 15. — № 3. — С. 112–128.
4. Optris AG, FLIR Systems. Встроенные системы инфракрасного мониторинга в распределительных устройствах: стандарты и рекомендации. — Берлин; Таллин: Optris AG, FLIR Systems, 2021. — 156 с.
5. Гаврилов А.В., Каликсанов Н.Т., Сарсенбаев Е.А. Автоматизированные системы непрерывного теплового мониторинга высоковольтного оборудования // Надежность и безопасность энергосистем. — 2021. — № 1. — С. 8–18. — Пермь: ООО ПАРМА.
6. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» // Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru. — 2020.

ИГРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ В ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ-ЭНЕРГЕТИКОВ

Моисеев Д.А., Шинкарев В.В.

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Оренбургский государственный университет»

Энергетический сектор находится на этапе формирования новой технологической парадигмы, где физические процессы неразрывно связаны с цифровыми. Рост энергопотребления со стороны искусственного интеллекта и центров обработки данных (ЦОД), прогнозируемый на уровне сотен тераватт-часов к 2030 году, сопровождается ответной цифровизацией самой отрасли [1]. Ключевыми драйверами становятся повсеместное внедрение Интернета вещей (IoT – Internet of Things), обеспечивающего поток данных с оборудования, и искусственного интеллекта (ИИ), преобразующего эти данные в управляющие решения. Этот синтез требует от выпускников технических образовательных учреждений в сфере энергетики не только традиционных инженерных знаний, но и навыков работы с информационно-физическими системами, анализа больших данных и построения алгоритмов.

Традиционные образовательные методы, сфокусированные на изучении изолированных дисциплин и устройств, не успевают за скоростью изменений. В этом контексте игровые технологии перестают быть вспомогательным инструментом и становятся центральной платформой для моделирования профессиональной реальности, где IoT и ИИ — не абстрактные концепции, а рабочие инструменты. Цель данной статьи — предложить практико-ориентированную модель интеграции игровых технологий, имитирующих работу с IoT-сетями и AI-алгоритмами, в подготовку студентов-энергетиков на основе учебного плана профиля «Электроснабжение» [2].

Новый метод базируется на объединении трех технологий, каждая из которых моделируется через соответствующий игровой формат:

1. IoT как источник данных. Моделируется через симуляторы цифровых двойников и виртуальные датчики, генерирующие потоки информации о состоянии оборудования, нагрузках, потерях.

2. ИИ как инструмент анализа и управления. Моделируется через конструкторы алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей, где студенты настраивают виртуальные ИИ-модели для обработки данных от IoT.

3. Игровая среда как безопасное пространство для экспериментов. Объединяет первые два компонента в комплексные симуляторы, деловые игры и учения, где можно тестировать решения без риска для реальных объектов.

Эта триада позволяет трансформировать абстрактные дисциплины в серию связанных сценариев, формируя у студентов целостное видение интеллектуальной энергосистемы.

В таблице представлены актуальные игровые форматы, напрямую связывающие IoT и ИИ с профессиональными задачами энергетика.

Таблица 1 – Игровые технологии для дисциплин профиля «Электроснабжение»

Группа дисциплин	Ключевые технологии	Игровая технология/ сценарий
<p>Автоматизация, защита и управление (Релейная защита и автоматизация, средства защиты и автоматики, автоматизированные системы управления и учета)</p>	<p>Цифровые двойники, предиктивная аналитика на базе ИИ, IoT-сенсоры для мониторинга в реальном времени.</p>	<p>Деловая игра «Учения на цифровой подстанции». Команды получают роль диспетчеров. На цифровом двойнике подстанции происходит виртуальная атака, вызывающая ложные срабатывания защит. Задача — по данным с IoT-датчиков и ИИ-системы анализа аномалий выявить и локализовать инцидент, предотвратив отключение.</p>
<p>Проектирование и моделирование систем (Проектирование систем электроснабжения, Математическое моделирование в электроэнергетике)</p>	<p>ВМ-технологии, облачные платформы для совместного проектирования, симуляторы на основе цифровых двойников.</p>	<p>Симулятор-стратегия «Энергокластер Smart City». Студенты – работники проектного бюро. В симуляторе необходимо спроектировать электроснабжение нового района с ВИЭ, зарядными станциями и умными сетями. Оценивается баланс стоимости, надежности и интеграции с городской платформой.</p>
<p>Надежность, диагностика и безопасность (Надежность систем электроснабжения, диагностика оборудования, электробезопасность)</p>	<p>Системы предиктивного техобслуживания, тепловизионный и вибродиагностика через IoT, цифровые разрешения на работы.</p>	<p>Виртуальный квест-расследование «Детектив надежности». Студент в роли инженера-диагноста получает доступ к «цифровому журналу» виртуальной подстанции с историей отказов, данными тепловизоров и вибродатчиков. Цель — проанализировать историю, выявить дефектное оборудование и составить план ремонтов.</p>
<p>Эксплуатация и монтаж (Эксплуатация и монтаж систем)</p>	<p>Дополненная реальность для проведения ремонтов, цифровые инструкции и чек-листы, треккинг</p>	<p>VR/AR - тренажер «Виртуальный допуск». В VR-среде студент выполняет полный цикл подготовки</p>

Группа дисциплин	Ключевые технологии	Игровая технология/ сценарий
электроснабжения, сервисное обслуживание)	инструментов.	рабочего места на распределительном устройстве: проверяет отсутствие напряжения с помощью указателя, накладывает переносные заземления. Система в режиме AR может проецировать схемы и предупреждения на реальный учебный стенд.
Энергоэффективность и ВИЭ (Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, энергосбережение, энергоменеджмент)	ИИ для оптимизации энергобаланса, IoT-платформы для мониторинга потребления, системы управления микросетями.	Бизнес-симулятор «Конкурс контрактов». Команды-подрядчики анализируют данные цифрового двойника завода, выявляют точки потерь с помощью ИИ-аналитики, предлагают решения (частотные приводы, солнечные панели) и рассчитывают финансовую модель с гарантированной экономией для победы в «тендере».
Режимы и качество электроэнергии (Качество электроэнергии, режимы работы электроэнергетической системы)	Системы компенсации реактивной мощности с ИИ-управлением, синхрофазоры.	Симулятор «Диспетчер по качеству». Студент получает поток данных от виртуальных синхрофазоров и качественных анализаторов в реальном времени. Необходимо определить источник искажений (дуговая печь, запуск двигателя), спрогнозировать влияние на чувствительное оборудование и отдать команду на включение нужного компенсирующего устройства.

Внедрение модели, основанной на группе «Игры — IoT — ИИ», дает качественные преимущества:

1. Глубокая практическая ориентация. Студенты работают не с абстрактными задачами, а с цифровыми двойниками, отрабатывая навыки, напрямую востребованные в условиях Индустрии 4.0 [1, 4].
2. Формирование цифрового мышления. Понимание неразрывной связи физического актива, его IoT-образа в виде данных и ИИ-алгоритма, управляющего им, становится базовой компетенцией.

3. Безопасность и масштабируемость. Ошибки в настройке нейросети или реакции на кибератаку происходят в виртуальной среде, не нанося ущерба, но давая бесценный опыт.

Ключевые вызовы для внедрения:

1. Инфраструктурный. Требуется развитие вычислительных мощностей и программных платформ, поддерживающих симуляцию IoT-сетей и работу с ИИ-моделями в учебных целях.

2. Кадровый. Преподаватели должны освоить роль архитекторов игровых сред и наставников по работе с данными, что требует серьезных программ повышения квалификации.

3. Методический. Необходима разработка объективных критериев оценки не только итогового решения в игре, но и процесса работы с данными, настройки алгоритмов и командной коммуникации.

Перспективным направлением является развитие формата «Непрерывной игровой симуляции» (Continuous Gaming), где цифровой двойник энергообъекта, населенный IoT-агентами и управляемый студенческими ИИ-моделями, существует на протяжении всего курса обучения, эволюционируя и усложняясь от семестра к семестру.

Образование в области энергетики стоит перед необходимостью фундаментального обновления. Предложенная модель, объединяющая игровые технологии, интернет вещей и искусственный интеллект, предлагает путь от обучения отдельным дисциплинам к формированию целостного системного инженера для цифровой энергетики. Такой специалист способен не только обслуживать оборудование, но и проектировать, внедрять и защищать сложные ИТ-системы. Внедрение этой модели, начатое с пилотных курсов и конкретных игровых модулей, позволит вузам, таким как Оренбургский государственный университет, готовить выпускников, опережающих запросы времени и готовых к вызовам энергетики ближайшего десятилетия.

Список литературы

1. Международное энергетическое агентство. Энергетика и искусственный интеллект : докл. [Электронный ресурс] / Междунар. энергет. агентство. — 2025. — URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-and-ai> (дата обращения: 14.01.2026).

2. Учебный план профиля «Электроснабжение» : 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», специализация «Электроснабжение» / ФГБОУ ВО «Оренбург. гос. ун-т». — Оренбург, 2025. — 20 с.

3. Вербицкий А. А. Контекстное обучение в компетентностном подходе / А. А. Вербицкий // Высшее образование в России. — 2006. — № 11. — С. 39–42.

4. В России нашли способ снизить энергозатраты на добычу нефти : [ПНИПУ создал интеллектуальную систему для нефтяных скважин] // Газета.Ru. — 2026. — 13 янв. — URL: <https://www.gazeta.ru/science/news/2026/01/13/27609589.shtml> (дата обращения: 15.01.2026).

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНТЕГРАЦИИ ПРАКТИЧЕСКИХ НАВЫКОВ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ПОДГОТОВКИ КАДРОВ

**Морозов В.А., Митрофанов С.В., канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Современная энергетика представляет собой совокупность энергетических производств, функционально объединённых в большие энергетические системы, которые производят, перерабатывают и распределяют топливно-энергетические ресурсы, энергию и мощность для потребителей. Для полного цикла производства работ по сооружению подстанции в электросетевом комплексе, требуется выполнить строительные, электромонтажные и пусконаладочные работы. Современные подстанции с установленным на них высокотехнологичным оборудованием 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.

По нашему мнению, наиболее существенные и значимые проблемы в современной энергетике существуют по следующим направлениям [1].

1. Старение кадров (в условиях отсутствия преемственности подготовки кадров на производстве).

2. Существенный технологический разрыв образовательных программ от инновационных производственных разработок в энергетической отрасли.

3. Консервативная реакция общества на значимость современной энергетике для жизнеобеспечения общества, где профессия энергетика олицетворяется с эксплуатацией громоздкого энергоёмкого оборудования.

4. Высокая степень цифровизации объектов энергетике.

5. Недостаточный уровень интеграции практических знаний и навыков работников в современной промышленности в учебные программы вуза, в том числе промышленных программно-аппаратных средств (средства АСДУ, ОИК диспетчера, современные комплексы моделирования и расчётов режимов сложных энергосистем);

6. Частичное отсутствие в вузах бесплатных 3-D тренажеров для обучения оперативного персонала на подстанциях, использование, учебно-практические модели электрической сети с действующими электроустановками и др.

Развитие высшей школы, а также необходимость разработки учебного процесса адаптированного требованиям энергетического комплекса России определяют острую необходимость усиления взаимодействия вузов и хозяйствующих субъектов регионов. Существенную роль в укреплении

практической составляющей обучения студентов играет, так же и повышение квалификации профессорско-преподавательского состава в условиях действующего производства, в том числе на передовых предприятиях электроэнергетической отрасли. При этом, преподаватель непосредственно общается с участниками производственного процесса и получает актуальные знания по проектно-сметной документации на объекты строительства и реконструкции, знакомится с характеристиками и техническими данными оборудования, закупаемого и поставляемого на участки работ. Там же, предоставляется возможность непосредственно наблюдать выполнение основных этапов технологии производства строительных, электромонтажных и пуско-наладочных работ (воздушные и кабельные линии, подстанции).

Опыт практической деятельности, например, электромонтажных организаций может быть рационально внедрен в учебный процесс студентов электроэнергетических специальностей, поскольку при строительстве или реконструкции электроэнергетических объектов приходится выполнять работы в чрезвычайно широкой сфере деятельности – начиная от общестроительных работ на площадке объекта и заканчивая системами автоматизированного управления технологическим производством (АСУ ТП), а также современными системами коммуникации и связи. Студент в процессе обучения в вузе должен постепенно «погружаться» в реалии производства и представлять, в каких условиях в дальнейшем он должен будет совершенствоваться в своей профессиональной деятельности [1, 2]. Таким образом, отражается актуальность методических принципов внедрения в учебный процесс практических задач организации производства. При этом, важно определить не только объем и содержание практических занятий, но и их место в учебной программе в соответствии и последовательностью изучаемых инженерных дисциплин.

Известно, что образование представляет собой процесс и результат усвоения систематических знаний, умений и навыков [2]. При этом, учебный процесс в вузе существенно зависит от применяемой совокупности методов обучения, как способов организации познавательной деятельности. Метод обучения представляет собой средство управления механизмом образовательного процесса по определенным направлениям получения знаний. В современных условиях, рациональный подход к интеграции практических навыков, знаний и умений в процесс обучения диктует и развитие методов обучения, как компонентов педагогического процесса взаимосвязанной деятельности преподавателей и студентов.

Интеграция технологий современной энергетики в учебный процесс подготовки кадров предполагает комплексный системный подход:

- учет действующих нормативных (законодательных) требований;
- разработка эффективных образовательных программ, учитывающих современные вызовы в отрасли энергетика;
- разработка и широкое использование современных методов обучения;

- организация практической подготовки студентов с учетом современных трендов развития энергетики;

- внедрение в учебный процесс подготовки кадров научно-практические разработки не только в области электроэнергетики, но и в сфере IT-технологий, автоматизированных систем, нетрадиционных и возобновляемых источников энергии и др.;

- освоение эффективных методов автоматизации, экономики и управления;

- учёт актуальных вопросов кибербезопасности, охраны труда и экологии.

Необходимо принимать во внимание некоторые аспекты законодательных требований к развитию системы обучения:

- актуализация образовательных стандартов и развитие их в сторону соответствия динамичного развития технологий в электроэнергетике;

- шире применять в образовательном процессе гибкие модульные программы, чтобы максимально быстро адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям на рынке труда;

- системно внедрять опережающее обучение руководящего персонала для вводимых в работу новых и реконструируемых объектов электроэнергетики.

В образовательные учебные программы целесообразно интегрировать ряд современных направлений электроэнергетики.

1. Моделирование и анализ энергосистем с использованием специализированного программного обеспечения. Оценка динамической и статической устойчивости энергосистемы, оптимизация режимов энергосистемы с использованием для лабораторных занятий учебно-практических моделей энергосистемы, например на базе действующих электроустановок университета [4].

2. Изучение современных технологий «умных сетей» Smart Grid и интеллектуальных систем (автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии – АСКУЭ), а также средств автоматизации систем диспетчерско-технологического управления с применением SCADA систем, технологии интернета вещей (IoT) и искусственного интеллекта. При этом, необходимо понимать принципы работы интеллектуальных сетей, протоколы обмена данными между различными устройствами, основы кибербезопасности и методы защиты информации.

3. Освоение современных технологий возобновляемой энергетики (ВИЭ), в том числе гибридных генерирующих систем. Студенты должны уметь оценивать эффективность сооружения и эксплуатации солнечных электростанций, ветропарков и другие объектов ВИЭ.

4. Внедрение в учебный процесс дисциплин с изучением и получением первичных навыков программирования для задач электроэнергетики (расчеты энергобалансов, прогнозирование электропотребления, управление электропотреблением для целей энергосбережения и др.).

Для реализации задачи интеграция технологий современной энергетики в учебный процесс предлагается ряд эффективных методов.

1. Использование передовых информационных технологий. Так, возможно применение виртуальных лабораторий для проведения экспериментов [5], обучение с помощью открытых онлайн-курсов и других электронных ресурсов.

2. Внедрение методологии проектного обучения. Это может позволить студентам заниматься решением реально значимых задач электроэнергетики, что способствует развитию их практических навыков и умений, а также повышению конкурентоспособности на рынке труда.

3. Внедрение форм интерактивного обучения. Это даёт возможность студентам быть активными участниками процесса обучения и, несомненно, помогает лучше усваивать сложный учебный материал.

4. Весьма полезно привлечение специалистов ведущих предприятий энергетической отрасли. Когда часть практически значимых дисциплин читается ведущими действующими сотрудниками энергетических предприятий, это, несомненно даёт студентам возможность увидеть, как фундаментальные теоретические знания могут эффективно применяться на практике.

Рациональный подход к организации практики студентов, как и формы практической подготовки студентов в области энергетики, должны учитывать современные тенденции в развитии отрасли с целью приобрести расширенных профессиональных компетенций по профилю подготовки. Примером может служить, например, создание учебных полигонов, имитирующих реальные условия работы энергосистемы или отдельных её компонентов [4, 5]. Это позволяет не только производить мониторинг электрических режимов «в темпе процесса», но и отрабатывать решение инженерных задач по энергосбережению, оперативно-диспетчерскому управлению и управлению электропотреблением. Причем, наличие развитой структуры информационно-вычислительной сети института энергетики, электроники и связи (ИЭЭС) позволяет внедрять всё перечисленное в учебный процесс, как в штатных компьютеризированных лабораторных аудиториях, так и для работы в удаленном (дистанционном) формате обучения.

Следует отметить особую необходимость интеграции современных технологий энергетики в проектную деятельность студентов. Это предполагает расширение тематики выпускных квалификационных работ с элементами практической реальности и внедрение разработанных технических решений. Это могут быть, как индивидуальные проекты, так и студенческие проекты, выполненные в рамках хоздоговорных работ ИЭЭС, включающие в себя задачи для реальных энергетических объектов по их совершенствованию (модернизации, расширению технических, технологических, эксплуатационных возможностей и др.).

В качестве пожеланий в развитие современных форм обучения студентов можно предложить следующее:

- обучение с опережающими трендами изучаемых компетенций, развитие междисциплинарного подхода и внедрения элементов практико-ориентированного обучения;

- при освоении современных технологий энергетики, целесообразно давать студентам знания и практические навыки ещё и в рамках факультативных дисциплин (моделирование энергосистем, энергосбережение, интеллектуальные системы в энергетике и системы автоматизации с применением технологий искусственного интеллекта);
- непрерывность обучения за счет развития системы дополнительного образования;
- развитие эффективного взаимодействия школа-вуз.

Список литературы

1 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.

3 Камалеева А.Р. Педагогика высшей школы : педагогическое образование : учебное пособие для студентов магистратуры / Камалеева А.Р., Гризодуб Н.В.; Институт педагогики, психологии и социальных проблем ; Донецкий национальный университет; - Казань : [б. и.], 2023. – 230 с.

4 Морозов В.А. Учебно-практическая модель электроэнергетической системы на базе действующих электроустановок ОГУ [Электронный ресурс] / В. А. Морозов, С. В. Митрофанов, Кильметьева О.И. // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы : материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф., Оренбург, 17 -19 окт. 2023 г. / Оренбург. гос. ун-т ; под общ. ред. Л. А. Влацкой. - Оренбург : ОГУ, 2023. - С. 105-111.

5 Морозов В.А. Моделирование графиков электрических нагрузок для лабораторных исследований в задачах управления электропотреблением [Электронный ресурс] / В. А. Морозов, С. В. Митрофанов // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: материалы XVI Всерос. науч.-техн. конф., Оренбург, 14 -17 окт. 2025 г. / Оренбург. гос. ун-т ; под общ. ред. Л. А. Влацкой. - Оренбург: ОГУ, 2025. - С. 168 – 172 с.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ ОТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЛЭП 220 КВ

**Мягкенко Д.Ю., Быковская Л.В., канд. техн. наук
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

В соответствии с Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», устанавливающим обязательные требования к безопасности оборудования, особое внимание уделяется обеспечению электромагнитной совместимости технических средств. Статья 46 данного закона прямо указывает на необходимость подтверждения соответствия продукции требованиям защиты от электромагнитных помех, что подчеркивает нормативную значимость проводимого исследования.

Одной из актуальных задач при проектировании и эксплуатации современных промышленных систем автоматизации является обеспечение устойчивой работы электронных блоков управления двигателем (БУД) в условиях сильных внешних электромагнитных помех. Особую опасность представляют низкочастотные магнитные поля, создаваемые воздушными линиями электропередачи напряжением 220 кВ. Такие поля, характеризующиеся высокой напряженностью (до десятков А/м), способны наводить паразитные ЭДС и токи в цепях питания, сигнализации и управления, что приводит к сбоям программного обеспечения, искажению измеряемых параметров, ложным командам на включение/отключение, а в критических случаях — к необратимому повреждению компонентов силовой электроники. Проблема усугубляется при размещении оборудования в непосредственной близости от трасс ЛЭП, что характерно для объектов энергетики, транспорта и добывающих отраслей. Таким образом, разработка и систематизация эффективных методов защиты БУД от воздействия магнитного поля промышленной частоты 50 Гц является важнейшим условием обеспечения надежности, безопасности и бесперебойности технологических процессов.

Анализ нормативной документации, научных публикаций и инженерной практики показывает, что несмотря на наличие общих принципов электромагнитной совместимости (ЭМС), вопросы комплексной защиты специализированных БУД именно от низкочастотного магнитного поля ЛЭП требуют детального рассмотрения. Большинство стандартных решений ориентировано на подавление высокочастотных помех, в то время как магнитное поле 50 Гц требует специфических подходов. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью системного анализа и оценки эффективности совокупности методов защиты на разных уровнях: корпусном, схемотехническом, кабельном и программном. Целью работы является анализ существующих методов защиты блока управления двигателем от наведенных помех магнитного поля ЛЭП 220 кВ, их классификация и оценка

синергетического эффекта при совместном применении. В связи с этим появляется необходимость детального рассмотрения ключевых методов.

Защита БУД от внешнего магнитного поля представляет собой многоуровневую задачу, где каждый метод направлен на устранение помехи на определенном этапе ее проникновения в систему. Современные подходы можно условно разделить на методы физического экранирования, схемотехнической и конструктивной фильтрации и программно-логической коррекции. Их комбинирование или выделение отдельного метода позволяет создать устойчивую систему, способную функционировать в неблагоприятной электромагнитной обстановке.

1. Экранирование корпуса блока управления

Данный метод является первым и основным барьером на пути внешнего магнитного поля. Принцип действия основан на использовании корпусов из материалов с высокой магнитной проницаемостью (μ), таких как холоднокатаная электротехническая сталь, пермаллой или современные композитные материалы. Переменное магнитное поле ЛЭП наводит вихревые токи в материале экрана, а также перераспределяет магнитный поток внутри его стенок, ослабляя поле в защищаемом объеме [1]. Эффективность экранирования (коэффициент ослабления) зависит от толщины материала, его μ , частоты поля (50 Гц) и целостности конструкции. Критически важным является обеспечение минимального количества и площади технологических отверстий (для вентиляции, разъемов) и качественный электрический контакт между всеми элементами корпуса (крышкой, базовой платой, панелями).

Основное преимущество — прямое и значительное ослабление внешнего поля до его проникновения внутрь устройства. Недостатки включают: увеличение массы, габаритов и стоимости корпуса.

2. Применение ферритовых фильтров на линиях питания и связи

Ферритовые кольца, бусы и цилиндры, устанавливаемые на кабели, являются эффективным средством подавления высокочастотных составляющих помех. Однако в контексте защиты от поля 50 Гц их роль несколько иная. Низкочастотное магнитное поле наводит синфазную помеху (одинаковую на всех проводниках кабеля). Ферритовый фильтр, работая как синфазный дроссель, создает высокий импеданс для этого синфазного тока, не затрагивая полезный дифференциальный сигнал или питание [2]. Установка ферритов непосредственно у разъема входа/выхода корпуса БУД препятствует проникновению наведенных токов внутрь устройства по кабельным линиям.

Преимущество — целенаправленное подавление синфазных токов, наведенных на кабелях, что дополняет экранирование корпуса. Недостаток — низкая эффективность на частоте 50 Гц для ферритов общего назначения; для значимого эффекта требуются специальные марки ферритов с высокой магнитной проницаемостью на низких частотах или многооборотные намотки кабеля на кольцо, что не всегда удобно.

3. Оптимизация трассировки печатной платы

Внутренняя компоновка БУД играет ключевую роль в минимизации восприимчивости. Метод направлен на уменьшение площади контуров, в которых внешнее магнитное поле может навести ЭДС. Основные принципы включают [3]:

Минимизация длины и площади параллельных трасс, особенно критичных для цепей аналоговых датчиков (тока, положения).

Использование дифференциальных пар для передачи чувствительных сигналов.

Выделение на плате «чистых» аналоговых и цифровых зон с отдельными системами заземления, соединенными в одной точке.

Размещение наиболее чувствительных компонентов и цепей в центре платы, максимально удаленно от краев и разъемов, где уровень остаточного поля после экрана может быть выше.

Главное преимущество — снижение восприимчивости на самом фундаментальном уровне без дополнительных затрат на компоненты. Недостаток — требует высокой квалификации разработчика и тщательного моделирования на ранних этапах проектирования; может быть ограничено стандартными габаритами и разводкой модулей.

4. Использование экранированных кабелей

Этот метод дополняет экранирование корпуса и ферритовую фильтрацию. Экранированный кабель (с оплеткой или фольгированным экраном) выполняет две функции: во-первых, частично ослабляет внешнее магнитное поле за счет вихревых токов в экране; во-вторых, и это главное, обеспечивает путь с низким сопротивлением для наведенных синфазных токов, отводя их на корпус («землю») в соответствии с правильной схемой заземления (обычно на обоих концах для низких частот) [4]. Для максимальной эффективности экран кабеля должен иметь надежный 360-градусный контакт с экранированным корпусом БУД и соответствующей клеммой заземления.

Преимущество — защита самого слабого звена системы: линий связи и питания вне защищенного корпуса. Недостатки — увеличение стоимости, массы и жесткости кабельной продукции; критическая важность правильного монтажа и заземления, ошибки в которых могут свести эффективность к нулю или даже ухудшить ситуацию.

5. Программные методы защиты (коррекция ошибок, сторожевые таймеры).

Данные методы не предотвращают наводки, а минимизируют их последствия на уровне логики работы БУД. Они являются последним рубежом обороны:

Коррекция ошибок (фильтрация данных): программные медианные, скользяще-средние фильтры для аналого-цифровых каналов, алгоритмы обнаружения и исправления ошибок в цифровой связи (CRC, контроль четности), голосование по мажоритарному принципу для критичных данных.

Сторожевые таймеры (Watchdog Timer): аппаратно-программный механизм, который принудительно перезагружает микроконтроллер в случае,

если основная программа из-за сбоя (например, ухода в бесконечный цикл из-за помехи) перестает периодически сбрасывать таймер.

Преимущество — высокая эффективность в парировании случайных одиночных сбоев, вызванных кратковременными помехами, при минимальных аппаратных затратах. Недостаток — не защищает от постоянной помехи, вызывающей систематическое искажение данных.

Результаты проведенного анализа представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – результаты сравнительного анализа

Метод	Преимущества	Недостатки	Авторы
Экранирование корпуса БУ	Высокая эффективность против электрической составляющей ЭМП. Защита от широкого частотного диапазона. Пассивность и постоянная готовность.	Увеличение массы и стоимости БУ.	Петров А.В. Сидоров К.Л. Smith J. Johnson L.
Применение ферритовых фильтров на линиях питания и связи	Простота установки и низкая стоимость.	Эффективность резко падает на низких частотах (характерных для ЛЭП 50 Гц). Добавление паразитных параметров в цепь.	Чжан В. Кумар А. Волков Д.И.
Оптимизация трассировки печатной платы (ПП)	Не приводит к увеличению массы и стоимости изделия.	Требует глубоких знаний в области ЭМС на этапе проектирования. Сложность модификации готовой платы.	Гордеев Е.Н. Ott H.W.
Использование экранированных кабелей	Высокая эффективность против наведенных помех.	Существенное удорожание кабельной продукции Необходимость качественного заземления экрана с двух сторон.	Иванова Л.М. Федоров С.П. Goedbloed J.J.
Программные методы защиты (коррекция ошибок, сторожевые-таймеры)	Повышение отказоустойчивости системы после прохождения помехи.	Не предотвращает физическое воздействие помехи, а лишь смягчает последствия. Требует процессорного времени.	Семенов А.Б. Laplante P.A.

Проведенный анализ демонстрирует, что экранирование корпуса обладает принципиальным преимуществом обобщающего характера по отношению к остальным методам. В то время как применение ферритовых фильтров, оптимизация трассировки, использование экранированных кабелей и программные методы направлены на борьбу с уже проникшей помехой, её локальными проявлениями или последствиями сбоев, экранирование корпуса действует как барьер нулевого уровня. Этот метод фундаментально снижает саму величину воздействующего на внутренние компоненты фактора, создавая

общий благоприятный электромагнитный климат внутри защищаемого объёма. Таким образом, эффективность всех последующих, более специализированных методов (фильтрации, правильной разводки, корректирующих алгоритмов) изначально и существенно повышается, будучи построена на этом прочном основании.

Экранирование корпуса не просто дополняет другие способы защиты, а выступает их необходимой предпосылкой и силовым множителем, обеспечивая системный, а не точечный подход к обеспечению устойчивости блока управления

Список литературы

1. Калантаров, П.Л. Расчет индуктивностей / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
2. Уайт, Д. Справочник по электромагнитным помехам и совместимости / Д. Уайт; пер. с англ. – М.: Техносфера, 2014. – 336 с.
3. Отт, Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах / Г. Отт. – М.: Мир, 2009. – 678 с.
4. Мозголов, В.П. Экранирование и фильтрация в технике связи / В.П. Мозголов. – М.: Связь, 1977. – 248 с.
5. Таненбаум, Э. Архитектура компьютера / Э. Таненбаум, Т. Остин. – 6-е изд. – СПб.: Питер, 2013. – 816 с.
6. ГОСТ Р 51317.4.8-2010 (МЭК 61000-4-8:2009). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты. Требования и методы испытаний. – М.: Стандартиформ, 2012.
7. Кечиев, Л.Н. Основы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / Л.Н. Кечиев. – М.: Горячая линия–Телеком, 2018. – 416 с.
8. Williams, T. EMC for Product Designers / T. Williams. – 5th ed. – Newnes, 2017. – 496 p.
9. Мантино, Ф. Электромагнитная совместимость в силовой электронике / Ф. Мантино; пер. с англ. – М.: Додэка-XXI, 2012. – 336 с.

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

**Рева К.Ю., Митрофанов С.В. канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Надежность и доступность энергоснабжения удаленных и изолированных территорий Российской Федерации является приоритетной государственной задачей, закрепленной в «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» утверждённой распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 года №1523-р (в редакции от 15 февраля 2025 года) [1]. В условиях активного социально-экономического развития Арктической зоны, Дальнего Востока и других труднодоступных регионов, предусмотренного «Схемой и программой развития электроэнергетических систем России на 2025-2030 годы» (приказ Минэнерго РФ № 2328 от 29.11.2024) [2], первостепенными становятся технологии распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии. Одним из ключевых векторов развития, согласно стратегическому направлению в области цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса, является переход к интеллектуальным гибридным энергосистемам с интеграцией ВИЭ и систем накопления энергии.

Критической проблемой при организации энергоснабжения удаленных объектов остается поддержание баланса в условиях высокой изменчивости выработки от возобновляемых источников и выраженных сезонных вариаций потребления. Действующая нормативно-техническая база, включая программы развития распределенной генерации и планы внедрения гибридных технологий, устанавливает требования к повышению надежности и оптимизации эксплуатационных режимов, однако традиционные методы не в полной мере учитывают непостоянный характер ВИЭ и необходимость полной автономности. При этом количество исследований, посвященных системной оптимизации подобных комплексов, остается крайне ограниченным, в связи с чем целью данной научной работы является разработка автономного гибридного энергокомплекса на базе возобновляемых источников энергии и систем накопления для обеспечения надежного и экономически эффективного электроснабжения удаленных потребителей.

Целью исследования является: разработка энергетического комплекса для энергоснабжения удаленных потребителей, представляющей собой не только техническую задачу, но и прямое соответствие требованиям государственной политики в области энергосбережения, экологии и внедрения микрогенерации.

Чтобы достичь поставленной цели необходимо провести системный анализ различных видов гибридных энергетических комплексов и определить оптимальный.

При анализ научно-технической литературы были определены пять видов комплексов:

1. Гибридные солнечно-водородные системы. В таких системах фотоэлектрические модули вырабатывают электрическую энергию, которая направляется на электролизёры для получения водорода из воды; накопленный водород в дальнейшем используется в топливных элементах для производства электроэнергии по требованию. Данные компоненты определяют общую эффективность процессов преобразования и возможность компенсации сезонных колебаний выработки.

Солнечно-водородные гибридные комплексы построены на принципе преобразования солнечной энергии в химически связанную форму с последующим контролируемым обратным преобразованием. Характерной особенностью солнечно-водородных систем является способность обеспечивать хранение энергии на протяжении нескольких месяцев практически без потерь на саморазряд, что делает их эффективным решением для компенсации выраженных сезонных диспропорций между генерацией и потреблением. Анализ энергетических потоков позволяет выявить критические участки, например, недостаточную мощность электролизёра или неоптимальный режим компрессии, влияющие на общую круговую эффективность.

Такие комплексы часто рассматриваются в качестве базовой конфигурации для полностью автономных объектов в регионах с продолжительными периодами низкой солнечной активности. При выявлении ограничений по эффективности рекомендуется дополнение другими источниками или буферными накопителями. Основными элементами комплекса являются такие элементы как: фотоэлектрические панели; электролизер; емкость для воды; топливный элемент.

Достоинства: обеспечение сезонного и многомесячного накопления энергии с минимальными потерями на саморазряд; высокая удельная энергетическая ёмкость по массе и возможность масштабного хранения; полная экологическая нейтральность (нулевые выбросы парниковых газов); многофункциональность водорода как энергоносителя (электроснабжение, теплоснабжение, транспорт); эффективное решение для территорий с длительными периодами отсутствия солнечного излучения; минимальные требования к регулярному техническому обслуживанию накопителей.

Недостатки: низкий коэффициент итоговой эффективности (обычно 30-50%), приводящий к существенным потерям; высокие первоначальные капитальные вложения в электролизёры и топливные элементы; зависимость первичной генерации от метеорологических условий и уровня инсоляции; значительные затраты на организацию безопасного хранения и обработки водорода; повышенные требования к безопасности в связи с физико-химическими свойствами водорода.

2. Ветро-солнечные гибридные системы. Данные системы, состоящие из ветроэнергетических установок и фотоэлектрических модулей,

вырабатывают электрическую энергию, которая через общую систему питания поступает к потребителю или в накопитель. Данные компоненты отличаются общей эффективностью генерации и возможностью взаимной компенсации изменчивости источников.

Ветро-солнечные гибридные комплексы построены на принципе комбинированной генерации из двух комплексных возобновляемых источников с последующим объединением энергетических потоков. Система обеспечивает повышенную стабильность выработки благодаря взаимодополнению режимов работы: солнечная генерация преобладает в дневные часы и летний период, ветровая - часто в ночное время и зимние месяцы. Ключевыми элементами данной системы являются; фотоэлектрический модуль; ветряной модуль; преобразователь; аккумуляторная батарея.

Характерной особенностью ветро-солнечных систем является способность взаимно компенсировать изменчивость источников, что значительно повышает коэффициент использования установленной мощности и снижает зависимость от внешних факторов по сравнению с моновидовыми системами. Анализ энергетических режимов позволяет выявить критические участки, например, недостаточную мощность одного из источников в определённые периоды или неоптимальное соотношение компонентов системы, влияющие на общую надёжность электроснабжения.

Такие комплексы часто рассматриваются в качестве базовой конфигурации для автономных объектов в регионах с разнообразным ветровым и солнечным потенциалом. При выявлении ограничений по стабильности рекомендуется дополнение буферными накопителями или резервными элементами.

Достоинства такой системы: повышенная надёжность электроснабжения за счёт комплексности солнечной и ветровой генерации; более высокий коэффициент использования установленной мощности по сравнению с моновидовыми системами; полная экологическая нейтральность цикла; снижение необходимой ёмкости накопителей благодаря взаимной компенсации; эффективное решение для территорий с выраженными суточными и сезонными вариациями ресурсов; минимальные эксплуатационные расходы после ввода в действие.

Недостатки: более высокие первоначальные капитальные вложения из-за наличия двух типов генерирующих установок; увеличенная сложность проектирования и настройки системы управления; зависимость общей генерации от локальных метеорологических условий (инсоляция и ветер); ограниченная эффективность в регионах с низким потенциалом одного из источников; повышенные требования к механической прочности и защите от экстремальных погодных условий.

3. Моновидовые комплексы на базе ветровой генерации. К третьей группе конфигураций гибридных энергетических комплексов на базе возобновляемых источников энергии относятся моновидовые комплексы на базе исключительно ветровой генерации. В таких системах

ветроэнергетические установки являются единственным источником выработки электрической энергии, которая через преобразователи и систему питания поступает к потребителю или накопителю. Данные компоненты определяют общую эффективность генерации и степень зависимости от ветрового режима.

Моновидовые ветровые комплексы построены на принципе прямого преобразования кинетической энергии ветра в электрическую с использованием турбин горизонтального или вертикального типа. Система ориентирована на максимальное использование доступного ветрового потенциала, с преобладанием генерации в периоды повышенной скорости ветра, часто ночные часы и зимний сезон.

Характерной особенностью моновидовых ветровых систем является высокая зависимость выработки от изменчивости ветрового ресурса, что может приводить к значительным колебаниям мощности и необходимости существенного резервирования. Анализ энергетических потоков позволяет выявить критические участки, например, периоды штиля или превышения номинальной скорости ветра, влияющие на общую надёжность электроснабжения.

Такие комплексы часто рассматриваются в качестве базовой конфигурации для регионов с устойчивым и высоким ветровым потенциалом, где другие ВИЭ менее эффективны. При выявлении ограничений по стабильности рекомендуется дополнение накопителями энергии большой ёмкости или резервными элементами.

Достоинства: высокая удельная выработка в регионах с устойчивым ветровым режимом; полная экологичность; минимальные занимаемые площади по сравнению с солнечными фермами аналогичной мощности.

Недостатки: высокая изменчивость выработки и зависимость от метеорологических условий; необходимость значительной ёмкости накопителей для компенсации периодов безветренной погоды; повышенный уровень шума; отрицательное влияние на живую природу (столкновения птиц и летучих мышей с лопастями, нарушение миграционных путей, шумовое и электромагнитное воздействие на фауну); сложность в строительстве и монтаже.

4. Солнечная генерация с аккумуляторными накопителями. К четвёртой группе конфигураций гибридных энергетических комплексов на базе возобновляемых источников энергии относятся моновидовые комплексы на базе исключительно солнечной фотоэлектрической генерации с аккумуляторными накопителями. В таких системах фотоэлектрические модули выступают единственным источником первичной выработки электрической энергии, которая частично направляется непосредственно к потребителю, а избыток заряжает аккумуляторные батареи для обеспечения энергоснабжения в периоды отсутствия инсоляции. Данные компоненты определяют общую эффективность генерации, уровень автономности и способность сглаживать суточные колебания выработки.

Моновидовые солнечные комплексы с аккумуляторными накопителями построены на принципе прямого преобразования солнечного излучения в постоянный ток с последующим хранением в химических (преимущественно литий-ионных) или иных аккумуляторах. Система ориентирована на максимальное использование дневного солнечного потенциала, с накоплением энергии для вечернего и ночного потребления, а также для компенсации облачных периодов.

Характерной особенностью таких систем является ярко выраженная суточная цикличность выработки, полностью зависящая от уровня инсоляции, что приводит к нулевой генерации в ночное время и требует адекватной ёмкости накопителей. Анализ количества выработанной энергии позволяет выявить критические участки, например, дефицит энергии в зимний период или при длительной пасмурной погоде, влияющие на общую надёжность электроснабжения. Дополнительно учитывается деградация фотоэлементов и аккумуляторов со временем, что требует прогнозирования жизненного цикла системы.

Ещё одной важной особенностью является модульность и гибкость масштабирования: комплексы легко расширяются добавлением панелей или батарей без значительной реконструкции, что делает их удобными для поэтапного развития энергоснабжения удалённых объектов.

Такие комплексы часто рассматриваются в качестве базовой конфигурации для регионов с высоким солнечным потенциалом и умеренной сезонностью (например, южные широты), где ветровой ресурс ограничен. При выявлении ограничений по автономности рекомендуется увеличение ёмкости аккумуляторов или интеграция систем управления энергопотреблением. Конфигурация активно применяется на стадии концептуального проектирования автономных объектов для оценки потенциала солнечной генерации как единственного возобновляемого источника с буферизацией.

Достоинства: высокая предсказуемость суточного профиля генерации в ясную погоду; отсутствие движущихся механических частей, что обеспечивает высокую надёжность; полная экологическая нейтральность в процессе эксплуатации; простота монтажа и масштабирования; эффективное решение для территорий с высоким уровнем инсоляции и ограниченным пространством; быстрый отклик на изменения нагрузки благодаря прямому подключению и аккумуляторам.

Недостатки: полная зависимость от уровня инсоляции с нулевой выработкой в ночное время и при плотной облачности; ограниченная энергетическая плотность аккумуляторов, требующая значительной ёмкости для многодневной автономности; сезонные колебания выработки электроэнергии; деградация фотоэлементов (0,5-1 % в год) и аккумуляторов; Проблемы утилизации отработанных аккумуляторов и потенциальное экологическое воздействие при неправильной переработке.

5. Системы на основе солнечной генерации с водородными элементами и резервным дизель-генератором для обеспечения пиковой автономности.

К пятой группе конфигураций гибридных энергетических комплексов на базе возобновляемых источников энергии относятся многоисточниковые системы на основе солнечной генерации с водородными элементами для накопления энергии и резервным дизель-генератором для обеспечения пиковой автономности. В таких системах фотоэлектрические модули выступают основным источником выработки электрической энергии, избыток которой направляется на электролизёры для производства водорода, хранимого в качестве долгосрочного энергоносителя; топливные элементы обеспечивают обратное преобразование водорода в электроэнергию, а резервный дизель-генератор активируется только в экстремальных случаях для покрытия пиковых нагрузок или длительных дефицитов. Данные компоненты в совокупности определяют высочайший уровень автономности, гибкости и надёжности, минимизируя зависимость от внешних факторов и обеспечивая многомесячную энергетическую независимость.

Многоисточниковые солнечно-водородные комплексы с дизельным резервом построены на принципе иерархического использования энергии: первичная солнечная генерация покрывает текущую нагрузку, избыток преобразуется в «зелёный» водород для сезонного хранения, топливные элементы служат основным источником в периоды низкой инсоляции, а дизель-генератор включается эпизодически лишь как «страховка» для пиковых или аварийных ситуаций. Система идеально адаптирована к регионам с выраженной сезонностью (включая высокие широты России), где солнечная выработка летом значительно превышает потребление, позволяя накапливать энергию на зимний период.

Характерной особенностью таких систем является уникальное сочетание краткосрочной (прямое потребление), среднесрочной (буферные аккумуляторы, если присутствуют) и долгосрочной (водород) буферизации с минимальным использованием углеводородного резерва, что обеспечивает практически полную автономность при крайне низком расходе дизельного топлива (обычно менее 5–10 % годовой выработки). Анализ энергетических потоков демонстрирует высокую круговую эффективность в годовом цикле за счёт сезонного хранения, а дизель-генератор гарантирует 100 % покрытие нагрузки даже в самых неблагоприятных сценариях. Ещё одной ключевой особенностью является многотопливная гибкость: водород может использоваться не только для генерации электроэнергии, но и для отопления или заправки транспорта, повышая общую энергоэффективность объекта.

Такие комплексы представляют собой наиболее оптимальную конфигурацию для удалённых и изолированных потребителей в условиях Российской Федерации (Арктика, Дальний Восток, Сибирь), где традиционная дизельная генерация экономически обременительна, а чисто возобновляемые решения недостаточно надёжны. При правильном проектировании расход

дизельного топлива снижается в 5–10 раз по сравнению с чисто дизельными системами, что обеспечивает быструю окупаемость и минимальные логистические затраты.

Достоинства: максимальная автономность и надёжность благодаря комбинации сезонного (водород) и пикового (дизель) резервирования; значительное снижение расходов на дизельного топлива (до 90 % по сравнению с традиционными системами); полная компенсация сезонных колебаний выработки солнечной энергии без ограничений по длительности хранения; экологическая преимущества: основная выработка «зелёная», дизель используется минимально и только в экстремальных случаях; гибкость применения водорода для электроэнергии, отопления и транспорта; высокий коэффициент использования солнечного потенциала за счёт эффективного накопления избытка; гарантированное покрытие пиковых нагрузок и аварийных ситуаций.

Недостатки: высокие первоначальные капитальные вложения; низкое суммарное КПД; необходимость мер безопасности при работе с водородом; длительный срок окупаемости в регионах с низкой инсоляцией без государственной поддержки.

Для наглядности результаты сравнительного анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ изученных видов комплексов представлен в таблице 1.

№	Виды комплексов	Достоинства	Недостатки	ФИО Авторов
1	Гибридные солнечно-водородные системы	1. Долгосрочное сезонное хранение энергии без саморазряда; 2. Высокая масштабируемость и плотность энергии; 3. Полная экологическая чистота; 4. Гибкость использования водорода; 5. Идеально для регионов с сезонными колебаниями.	1. Низкое общее КПД; 2. Высокая капитальная стоимость компонентов; 3. Зависимость от инсоляции для производства водорода; 4. Зависимость от погодных условий.	Митрофанов С.В.; Alaaeldin M. Abdelshafy, Hamdy Hassana, Jakub Juraszd
2	Ветро-солнечные гибридные системы	1. Комплектность источников энергии повышает общую надежность; 2. Высокий коэффициент использования мощности;	1. Зависимость от метеоусловий; 2. Низкая эффективность в районах, где одна из частей комплекса малоэффективна; 3. Большие	Елистратов В.В., Коновалов Д.А.

		3. Экологическая нейтральность.	первоначальные капитальные затраты.	
3	Моновидовые комплексы на базе ветровой генерации	1. Низкие эксплуатационные расходы; 2. Высокая удельная выработка в ветреных регионах.	1. Высокая изменчивость выработки; 2. Отрицательное влияние на фауну (птицы, летучие мыши); 3. Дорогостоящий монтаж.	Безруких П.П., Шакиров В.А.
4	Солнечная генерация с аккумуляторными накопителями	1. Предсказуемость суточной генерации; 2. Простота монтажа и модульность.	1. Нулевая выработка ночью/в облачность; 2. Деградация солнечных элементов; 3. Опустынивание территорий на месте установки панелей 4. Ограниченная ёмкость аккумуляторов.	Панченко В.А., Аветисов А.К., Тарасов Д.А
5	Системы на основе солнечной генерации с водородными элементами и резервным дизель-генератором для обеспечения пиковой автономности	1. Максимальная автономность и надёжность; 2. Сезонное хранение и пиковый резерв; 3. Высокая экологичность с минимальными выбросами; 4. Гибкость и многотопливность 5. Лучший баланс стоимости, надёжности и экологии.	1. Высокие первоначальные затраты на оборудование; 2. Сложность системы и обслуживания.	Митрофанов С.В.; Alaaeldin M. Abdelshafy, Hamdy Hassana, Jakub Juraszd

Проведённый анализ показывает, что оптимальным решением для удалённых территорий Российской Федерации является гибридная система с солнечной генерацией, водородным накоплением и резервным дизель-генератором. Она обеспечивает высокую автономность за счёт сезонного хранения энергии в виде водорода — критически важного в условиях резкой сезонной асимметрии инсоляции на Дальнем Востоке, в Сибири и Арктике. Дизель используется лишь в пиковых или аварийных ситуациях, снижая расход топлива на 80–90 % и минимизируя логистические затраты. Система гарантирует надёжное электроснабжение при преобладании «зелёной» выработки, соответствует целям низкоуглеродного развития и позволяет использовать водород также для теплоснабжения и транспорта. Несмотря на

высокие капитальные затраты, эта конфигурация наиболее полно отвечает стратегическим задачам энергобезопасности и устойчивого развития удалённых регионов России.

Список литературы

1. «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» утверждённая распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 года №1523-р (в редакции от 15 февраля 2025 года).
2. «Схема и программа развития электроэнергетических систем России на 2025-2030 годы» (приказ Минэнерго РФ № 2328 от 29.11.2024)
3. Елистратов В.В., Коновалов Д.А. Гибридные ветро-солнечные энергетические комплексы в изолированных районах России // Вестник СПбГПУ. — 2019. — № 3. — С. 112–120.
4. Безруких П.П. Ветроэнергетические ресурсы Российской Федерации // Энергетика России. — 2020. — № 1. — С. 56–63.
5. Панченко В.А. Солнечные фотоэлектрические системы с аккумуляторными накопителями // Альтернативная энергетика. — 2022. — № 6. — С. 14–22.
6. Аветисов А.К. Автономные фотоэлектрические станции с литий-ионными аккумуляторами // Электротехника. — 2021. — № 8. — С. 40–47.
7. Тарасов Д.А. Оптимизация гибридных солнечных систем с аккумуляторами // Вестник МЭИ. — 2023. — № 2. — С. 78–85
8. Шакиров В.А. Автономные ветроэнергетические установки для удалённых районов // Энергосбережение. — 2017. — № 4. — С. 28–35.
9. Митрофанов С.В. Исследование работы гибридной энергетической установки, работающей на возобновляемых источниках энергии. – Оренбург: ОГУ, 2023.
10. Alaaeldin M. Abdelshafya, Hamdy Hassana, Jakub Juraszd. Optimal design of a grid-connected desalination plant powered by renewable energy resources using a hybrid PSO–GWO approach // Energy Conversion and Management 173 (2018) 331–347

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ДАННЫХ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

**Рыжков К.А., Косенко А.Д., канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Современная электроэнергетика находится в стадии активной цифровой трансформации, что требует повышения надёжности, предиктивности и автоматизации процессов контроля и диагностики оборудования. Важнейшую роль в обеспечении устойчивой работы энергосистемы играют воздушные линии электропередачи (ЛЭП), являющиеся наиболее протяжённой и уязвимой частью электрической сети. Эксплуатационные дефекты на ЛЭП — ослабление контактных соединений, коррозия зажимов, перегрев проводов — могут привести к локальным авариям, технологическим нарушениям, а в отдельных случаях — к масштабным отключениям.

Согласно Приказу Минэнерго России от 12.02.2021 № 84 и ГОСТ Р 57903–2017, диагностика воздушных линий электропередачи (ЛЭП) должна включать регулярный контроль теплового состояния оборудования с использованием современных средств измерения. Одним из наиболее эффективных и неразрушающих методов выявления дефектов и аварийно-опасных участков на ЛЭП является тепловизионная диагностика. Она позволяет дистанционно контролировать температурное состояние соединительных зажимов, изоляторов, проводов и других элементов, выявляя участки с повышенным сопротивлением, коррозией или ослабленными контактами.

Анализ научно-технической литературы позволил выделить четыре основных направления обработки тепловизионных данных при диагностике воздушных ЛЭП. В данной работе представлен подробный анализ этих методов с акцентом на их применимость в условиях реальной эксплуатации, с учётом влияния внешних факторов (солнечной радиации, ветровой нагрузки, влажности и температуры окружающей среды), а также на их потенциал для интеграции в автоматизированные системы технического диагностирования.

К первой группе отнесён метод пороговой бинаризации и морфологического анализа [1]. Данный подход основан на выделении областей перегрева путём задания температурного порога и последующей фильтрации шумов с помощью морфологических операций (эрозия, дилатация и др.).

Основные достоинства метода:

- Простота реализации. Алгоритмы бинаризации и морфологии легко программируются на большинстве языков (Python, C++, MATLAB) и не требуют сложных библиотек.

- Низкие вычислительные затраты. Обработка одной термограммы занимает доли секунды даже на встраиваемых платформах (Raspberry Pi, Jetson Nano).

- Возможность работы в реальном времени. Это особенно важно при облёте ЛЭП с помощью БПЛА: оператор может мгновенно получить информацию о перегреве.

- Эффективность при высоком контрасте. Если температура дефекта значительно превышает фон (например, при перегрузке или разрыве контакта), метод показывает высокую чувствительность.

К недостаткам следует отнести:

- Высокая чувствительность к шуму и фоновому излучению. Температурные флуктуации, вызванные солнечным нагревом, отражением от соседних металлических элементов или изменением угла съёмки, легко интерпретируются как дефекты.

- Отсутствие учёта геометрии и структуры объекта. Метод не «понимает», что на изображении — зажим, провод или изолятор. Он рассматривает термограмму как массив температур, что снижает достоверность анализа.

- Необходимость ручной настройки порога. Оптимальное значение порога зависит от погодных условий, времени суток, нагрузки и даже типа оборудования. При изменении этих параметров требуется повторная калибровка, что затрудняет автоматизацию.

- Невозможность оценки степени дефекта. Метод даёт бинарный ответ: «дефект есть / нет», но не указывает, насколько критичен перегрев или какова его вероятная причина.

Ко второй группе отнесены методы, основанные на свёрточных нейронных сетях (CNN) и глубоком обучении [2]. Эти алгоритмы способны автоматически извлекать признаки из термограмм и обучаться распознаванию различных классов дефектов (перегретый зажим, повреждённый изолятор, перегрев провода и др.) без явного задания правил.

Подход активно исследуется в работах Иванова М.Ю., Токарева А.Н., а также зарубежными авторами — Garcia M. и Rossi M. Обычно используется архитектура на базе ResNet, EfficientNet или U-Net, обученная на тысячах размеченных термограмм, собранных как в полевых условиях, так и в лабораторных стендах.

Достоинства данного подхода:

- Высокая точность классификации. Современные CNN достигают 90–98 % точности при распознавании типов дефектов, что сопоставимо с уровнем квалифицированного инженера-диагноста.

- Минимизация участия человека. После обучения модель может автономно анализировать термограммы, что особенно ценно при обработке больших объёмов данных (например, после массового облёта ЛЭП).

- Обобщение на новые данные. При условии разнообразного обучающего набора сеть способна адаптироваться к различным типам оборудования, углам съёмки и погодным условиям.

- Возможность сегментации дефектов. Архитектуры типа U-Net позволяют не только классифицировать дефект, но и точно локализовать его на изображении.

Недостатки метода:

- Требовательность к размеченным данным. Для качественного обучения необходимо собрать и разметить тысячи термограмм, что трудоёмко и дорого. Особенно сложно размечать редкие или уникальные дефекты.

- Низкая интерпретируемость («чёрный ящик»). Сеть выдаёт результат, но не объясняет, почему она сочла данный участок дефектным. Это критично в энергетике, где требуется обоснование каждого вывода.

К третьей группе относится метод теплового и термодинамического анализа [3]. Он основан на физическом моделировании тепловых процессов в элементах ЛЭП с учётом нагрузки, солнечной радиации, ветра и других внешних факторов: протекающего тока и сопротивления контакта, теплопроводности материалов, солнечной радиации, скорости и направления ветра, температуры и влажности окружающего воздуха.

Такой подход применялся в исследованиях Соколова В.Р., Tanaka H. и Patil R. Модель решает уравнение теплового баланса, позволяя не только предсказать температуру в точке, но и оценить, соответствует ли наблюдаемый перегрев ожидаемому значению при заданных условиях.

Преимущества метода:

- Физическая обоснованность. Метод даёт не просто «картинку перегрева», а объясняет его причины: перегрузка, плохой контакт, отсутствие ветрового охлаждения и т.п.

- Повышенная достоверность диагностики. Позволяет отличить реальный дефект от ложного срабатывания, вызванного, например, солнечным нагревом.

- Совместимость с системами расчёта нагрузок. Модель легко интегрируется с данными SCADA, АСУ ТП и прогнозами нагрузки, что позволяет выполнять «виртуальные эксперименты».

- Поддержка принятия решений. Инженер получает не только факт перегрева, но и рекомендацию: снизить нагрузку, заменить зажим, проверить коррозию и т.д.

Недостатками являются:

- Требовательность к входным данным. Для построения модели необходимы точные параметры: геометрия элемента, материал, коэффициенты излучения и отражения, метеоданные — что не всегда доступно в полевых условиях.

- Сложность моделирования переходных процессов. Резкие изменения нагрузки, порывы ветра или облачность сложно учесть в реальном времени.

- Высокая вычислительная сложность. Решение нестационарной задачи теплопроводности требует значительных ресурсов и времени.

К четвёртой группе отнесены гибридные методы, сочетающие искусственный интеллект и физические модели [4]. Такие подходы используют

нейросети для первичного анализа термограмм, а термодинамическое моделирование — для верификации и коррекции результатов.

Такие системы описаны в работах Жукова А.Е., Garcia M., и Князева А.В.

Например, нейросеть может выделить зону перегрева на зажиме, а термодинамическая модель — проверить, может ли такой перегрев возникнуть при текущей нагрузке и погоде. Если модель показывает, что ожидаемая температура — 40 °С, а на термограмме — 95 °С, это чёткий сигнал о дефекте.

Достоинства гибридного подхода:

- Сочетание скорости ИИ и достоверности физики. Быстрый отбор подозрительных участков + их глубокая верификация.

- Снижение числа ложных срабатываний. Физическая модель отсеивает аномалии, вызванные внешними факторами.

- Повышенная интерпретируемость. Результат подкрепляется физическим расчётом, что важно для принятия технических решений.

- Перспективность для цифровых двойников. Гибридная система может интегрироваться в платформу цифрового моделирования, обеспечивая непрерывный мониторинг и прогнозирование.

Недостатки:

- Высокая сложность интеграции. Требуется совместная работа специалистов в области ИИ, теплотехники, электроэнергетики и программной инженерии.

- Требования к междисциплинарной экспертизе. При проектировании и сопровождении системы нужны знания из нескольких областей.

Несмотря на сложности, именно гибридные методы считаются наиболее подходящими для создания автоматизированной системы тепловизионной диагностики ЛЭП, соответствующей требованиям цифровой трансформации электроэнергетики.

Для наглядности результаты сравнительного анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты сравнительного анализа методов обработки тепловизионных данных при диагностике воздушных ЛЭП

№	Методы обработки	Достоинства	Недостатки	ФИО Авторы
1	Пороговая бинаризация и морфологический анализ	<ul style="list-style-type: none"> – метод обеспечивает простоту реализации и низкие вычислительные затраты; – эффективен при высоком контрасте термограмм; – позволяет выделять зоны перегрева в реальном времени. 	<ul style="list-style-type: none"> – чувствителен к шуму и фоновому излучению; – не учитывает форму и структуру объектов; – требует ручной настройки порога при изменении условий съёмки. 	Жуков А.Е.; Новиков Д.Р.; Соколов В.Р.; Li J., Zhao Q.

2	Свёрточные нейронные сети (CNN) и глубокое обучение	– высокая точность классификации дефектов; – обучается на больших наборах данных; – минимизирует участие оператора.	– требует размеченных данных; – низкая интерпретируемость; – высокие требования к GPU.	Иванов М.Ю.; Garcia M.; Токарев А.Н.; Rossi M.
3	Тепловое моделирование и термодинамический анализ	– оценивает причины перегрева, а не только температуру; – совместим с расчётами нагрузок; – повышает достоверность диагностики.	– требует точных входных параметров; – сложность моделирования переходных процессов; – не подходит для экспресс-анализа.	Соколов В.Р.; Tanaka H.; Patil R.
4	Гибридные методы (ИИ + физические модели)	– сочетают точность ИИ и физическую интерпретацию; – снижают ложные срабатывания; – перспективны для цифровых двойников.	– сложна интеграция компонентов; – требуют междисциплинарной экспертизы.	Жуков А.Е.; Garcia M.; Князев А.В.

В 2020 году была утверждена Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2035 года [5], в которой цифровая трансформация и интеллектуализация электроэнергетики обозначены как приоритетные направления. В этом контексте разработка автоматизированных систем тепловизионной диагностики, особенно на основе гибридных методов, становится особенно актуальной.

Однако, несмотря на теоретическую проработанность гибридного подхода, программных решений, обеспечивающих его практическое применение в условиях реальной эксплуатации ЛЭП с учётом внешних метеорологических факторов, в настоящее время недостаточно.

Таким образом, тема исследования — «Разработка автоматизированной системы тепловизионной диагностики воздушных ЛЭП» — является актуальной и значимой для функционирования электроэнергетической системы.

Список литературы

1. Жуков А.Е., Новиков Д.Р., Соколов В.Р. Методы обработки термограмм в задачах диагностики электрооборудования // Электрические станции. — 2020. — № 6. — С. 45–51.
2. Иванов М.Ю., Токарев А.Н. Применение глубокого обучения для анализа термографических изображений ЛЭП // Вестник ИГЭУ. — 2021. — № 4. — С. 33–39.

3. Соколов В.Р., Tanaka H. Thermodynamic modeling of overhead power lines under solar radiation // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2019. — Vol. 34, № 3. — P. 1125–1132.
4. Князев А.В., Garcia M. Гибридные подходы к обработке тепловизионных данных в энергетике // Промышленная энергетика. — 2022. — № 2. — С. 28–35.
5. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года».
6. ГОСТ Р 57903–2017. Диагностика технического состояния воздушных линий электропередачи. Общие требования. — М.: Стандартиформ, 2017. — 32 с.
7. Приказ Минэнерго России от 12.02.2021 № 84 «Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей и Инструкции по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 0,4 – 750 кВ».

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПО ВЫБОРУ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

**Семенова Н.Г., д-р пед. наук, канд. техн. наук, профессор;
Ищенко Б.В.**

**Федерально государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

В соответствии с Федеральным законом от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике», надежное и качественное электроснабжение потребителей является одним из приоритетов государственной политики в сфере энергетики, что обуславливает актуальность темы исследования. Для промышленного предприятия электроэнергия представляет собой ключевой компонент производственного процесса, от бесперебойности и эффективности которого напрямую зависят объемы выпуска продукции, ее себестоимость и, в конечном счете, конкурентоспособность всего предприятия.

В современных условиях траектория развития энергохозяйства промышленного предприятия является сложным управленческим выбором, требующим учета множества экономических и технологических факторов. В этой связи, обоснованный выбор стратегии развития системы электроснабжения, учитывающей долгосрочные цели предприятия, технологические тренды и нормативно-правовые ограничения, превращается в критически важную управленческую задачу. Поэтому разработка автоматизированной системы по выбору стратегии развития системы электроснабжения (СЭС) промышленного предприятия в настоящее время является актуальным и значимым. Целью исследования является разработать автоматизированную систему по выбору стратегии развития системы электроснабжения промышленного предприятия. Для достижения поставленной цели необходимо провести анализ научно-технической литературы по существующим методам выбора стратегии развития СЭС промышленного предприятия. В данной статье представлены результаты проведенного анализа.

Анализ научно-технической литературы в области методов выбора стратегии развития СЭС промышленного предприятия позволил условно выделить четыре группы методов исследования:

- метод приведенных затрат;
- метод анализа иерархий;
- методы экспертного оценивания;
- методы нечеткой логики.

Рассмотрим кратко каждую группу методов.

1. Метод приведенных затрат.

Это классический технико-экономический метод сравнения инвестиционных вариантов в энергетике и электротехнике, особенно при выборе проектных решений для развития систем электроснабжения.

Сущность метода заключается в следующем: метод основан на расчете суммы единовременных (капитальных) затрат и текущих (эксплуатационных) затрат, приведенных к сопоставимому виду через коэффициент эффективности капитальных вложений.

Основная формула: $PЗ = K + (E_n \times K) + I$,

где: PЗ — годовые приведенные затраты (руб./год);

K — единовременные капитальные вложения в проект (руб.);

E_n — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (безразмерная величина). Это ключевой нормативный параметр, обратный сроку окупаемости. Например, для энергетики часто принимается $E_n = 0.12-0.15$ (что подразумевает нормативный срок окупаемости 8–6.7 лет);

I — годовые издержки (эксплуатационные расходы) (руб./год).

К достоинствам данного метода следует отнести следующее: простота и наглядность, быстрота расчетов; а к недостаткам - неприменимость оценки доходных проектов, т.к. не учитывает динамику инвестиций и временную стоимость денег.

2. Методы анализа иерархий.

Это математические методы многокритериального принятия решений, которые помогают структурировать сложную задачу, систематизировать критерии выбора и определить наилучшую альтернативу, даже когда критерии противоречат друг другу.

Суть метода состоит в том что осуществляется переход от хаоса к порядку.

Когда решение зависит от множества факторов (стоимость, надежность, сроки), простое сравнение ненадежно. Этот метод состоит из следующих операционных действий:

- строится иерархия (дерево решения);
- попарно сравниваются элементы каждого уровня;
- вычисляются веса (важности) критериев и приоритеты альтернатив;
- синтезируется результат — находится альтернатива с максимальным общим приоритетом.

Достоинствами методов данной группы являются: структурирование сложных проблем, гибкость и универсальность. К недостаткам нами отнесены: относительная, а не абсолютная оценка; сложность при изменении набора альтернатив; зависимость от структуры иерархии.

3. Методы экспертного оценивания.

Эта группа методов принятия решений основана на систематизированном использовании знаний, интуиции и опыта привлеченных экспертов (специалистов высокой квалификации) для анализа сложных задач, где недостаточно объективных данных или формальных моделей. Рассмотрим некоторые методы из этой группы.

Метод непосредственного оценивания.

Суть метода заключается в том, что эксперт прямо, без промежуточных процедур, определяет каждому оцениваемому объекту числовое значение в рамках заданной шкалы.

К достоинствам нами отнесены: скорость, простота, минимальные трудозатраты как для эксперта, так и для аналитика, а к недостаткам – возможный непрофессионализм экспертов.

Метод парных сравнений.

Это более сложный, но и значительно более точный и научно обоснованный метод. Его ключевой принцип: человеку гораздо проще и точнее сравнивать два объекта, чем давать абсолютную оценку каждому в отдельности. Как это работает: эксперту последовательно предъявляют все возможные пары объектов для сравнения и задают вопрос: «Насколько объект А важнее объекта Б?». Для ответа используется специальная шкала, обычно 0; 0,5; 1. 1 (единица) означает, что объект А предпочтительнее объекта Б, 0, 5 – объекты А и Б равнозначны; 0 (ноль) – объект А менее предпочтителен, чем объект Б.

Далее все ответы заносятся в квадратичную матрицу парных сравнений и с помощью математического аппарата (нахождения главного собственного вектора этой матрицы) вычисляются итоговые веса объектов. Эта математическая процедура минимизирует случайные ошибки эксперта.

К достоинствам метода парных сравнений нами отнесены: высокая достоверность и точность, наличие встроенного механизма проверки согласованности суждений, позволяет работать со смешанными данными (качественными и количественными критериями). К недостаткам отнесены: быстрый рост трудоёмкости с увеличением числа объектов, субъективность и зависимость от компетентности эксперта.

Метод обобщённого ранжирования.

Это компромиссный метод между простотой и точностью. Его цель — выстроить объекты в строгий порядок по убыванию или возрастанию важности.

Сущность метода заключается в следующем: эксперту дают список объектов и просят их проранжировать, присваивая каждому объекту ранг. Самый важный объект получает ранг 1, следующий по важности — 2, и так далее, до последнего места. Чем меньше ранг, тем выше важность. Нами выделены следующие достоинства метода ранжирования: наличие математического аппарата проверки согласованности, универсальность и гибкость применения. Недостатки: зависимость от субъективности и компетентности эксперта.

4. Методы нечеткой логики.

Это математическая концепция, расширяющая классическую теорию множеств, предназначенная для моделирования рассуждений и работы с данными, которые носят неточный, качественный или расплывчатый характер.

Ключевая идея: В классической логике элемент либо принадлежит множеству (1), либо не принадлежит (0).

Основной переменной нечеткой логики является — функция принадлежности $\mu(x)$, под которой понимаем степень принадлежности элемента множеству. Функция принадлежности может изменяться в пределах от 0 до 1. К достоинствам методов рассматриваемой группы относится: адекватное моделирование неопределенности и неточности, учет качественных (экспертных) оценок, а к недостаткам: субъективность в определении функций принадлежности.

Изложенный выше материал представлен в таблице 1.

Таблица 1 – результаты сравнительного анализа.

Существующие методы выбора стратегии развития СЭС	Достоинства	Недостатки	ФИО авторов
Методы приведенных затрат	- простота и наглядность; - быстрота расчетов.	- не применимы для оценки доходных проектов; - не учитывают динамику инвестиций и временную стоимость денег.	Федоров А.А. Каменова В.В. Ковалев В.В.
Методы анализа иерархий	- структурирование сложных проблем; - гибкость и универсальность.	- относительная, а не абсолютная оценка; - сложность при изменении набора альтернатив; - зависимость от структуры иерархии.	Андрушко И.О. Поздняков Ю.М. Саати Т.
Методы экспертного оценивания	- возможность прогнозирования; - скорость получения результатов; - применимость к слабоструктурированным и сложным задачам; - учет качественных и неформализуемых факторов.	- коллективное мнение может подавлять индивидуальное.	Семенова Н.Г. Литвак Б.Г. Эддоус М. Стэнфилд Р.
Методы нечеткой логики	- адекватное моделирование неопределенности и неточности; - учет качественных (экспертных) оценок.	- субъективность в определении функций принадлежности; - вычислительная сложность; - сложность интерпретации результатов.	Семенова Н.Г. Рыжов А.П. Леоненков А.В.

Проведенный анализ позволил заключить, что методы экспертного оценивания обладают принципиальными преимуществами обобщающего характера по отношению к остальным методам. Они выступают в роли системообразующего и интегрирующего каркаса, который позволяет связать в единую логическую структуру количественные расчеты, качественные суждения и неформализуемые критерии. В отличие от строго формальных методов (приведенных затрат, анализа иерархий), экспертные методы не просто вычисляют результат, а структурируют сам процесс принятия стратегического решения, обеспечивая его комплексность и обоснованность.

Список литературы

1. Ершов, А. М. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: учебное пособие [Электронный ресурс] / А. М. Ершов. – 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – URL: <https://energynet.susu.ru/wp-content/uploads/2021/09/Ершов-А.М.-СЭС.-Ч.-4.-Электроснабжение-промышленных-предприятий-и-городов-2020.08.17-2.pdf>
2. Семенова, Н. Г. Исследование и моделирование электроэнергетических объектов / Н. Г. Семенова, Л. А. Влацкая; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбург. гос. ун-т".
<https://lib.osu.ru/search?text=Исследование%20и%20моделирование%20электроэнергетических%20систем.%202022>
3. Камарудин, Б. А. Анализ надёжности электроснабжения в обрабатывающей промышленности / Б. А. Камарудин, М. Ю. Мохтар // Журнал передовых производственных технологий. – 2020. – № 14 (1). – С. 45–54. – URL: https://www.iupr.ru/files/ugd/b06fdc_85989e1c288c4dabb266d6522e0acd97.pdf?index=true (дата обращения: 17.12.2025).
4. Бабурин, С. В. Выбор направлений оптимизации систем электроснабжения промышленных предприятий [Электронный ресурс] / С. В. Бабурин // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 5 (ч. 2). – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/05/54543> (дата обращения: 17.12.2025).
5. Королев, И. В. Анализ системы электроснабжения промышленного предприятия / И. В. Королев, И. С. Ромашов, А. Е. Кузнецов // КиберЛенинка [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sistemy-elektrosnabzheniya-promyshlennogo-predpriyatiya> (дата обращения: 17.12.2025).

КОНЦЕПЦИЯ СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И УПРАВЛЕНИЯ НАГРУЗКАМИ

**Сильвашко С.А., канд. техн. наук, доцент, Татаренко Э.А.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Интенсивное внедрение технологий искусственного интеллекта и цифровизация всех сфер жизнедеятельности, увеличение количества электромобилей (замена двигателей внутреннего сгорания на электродвигатели), стремительный рост майнинга и ряд других факторов требуют существенного увеличения количества генерируемой электроэнергии. По оценкам Международного энергетического агентства (МЭА) мировое производство электроэнергии в 2024 году достигло 31 029 ТВт·ч, а к концу 2027 г. при тех же темпах роста ожидается производство электроэнергии в объеме 34 566 ТВт·ч [1]. Причем потребность в электроэнергии к тому времени может превысить возможности по ее генерации.

Аналогичная ситуация в области электроэнергетики наблюдается и в России. В соответствии с данными Минэнерго [2], в 2024 году Единой энергетической системой (ЕЭС) России и технологически изолированными территориальными электроэнергетическими системами (ТИТЭС) произведено 1 182 072,3 млн кВт·ч электрической энергии. Ожидаемое потребление электрической энергии в 2025 году – 1 163 785,3 млн кВт·ч. Прогноз потребления электрической энергии по ЕЭС России и ТИТЭС предполагает его увеличение к 2031 году до 1 354 659 млн кВт·ч. Однако по результатам исследования консалтинговой компании ЭКОПСИ («ЭКОПСИ Консалтинг» – компания в области управленческого и HR-консалтинга в России и СНГ) ввод новых мощностей и сетевых объектов не успевает за потреблением, в результате чего к 2030 году прогнозируется дефицит мощности электроэнергии до 14,2 ГВт [3].

Несмотря на меры, принимаемые Правительством РФ, направленные на увеличение производства электрической энергии [4], без качественного учета количества генерируемой электроэнергии и ее правильного распределения между потенциальными потребителями решить проблему энергодефицита не представляется возможным. Решить перечисленные выше задачи в рамках ЕЭС России возможно только с помощью автоматизированной системы учета генерируемой электроэнергии и управления ее распределением между нагрузками.

Потребителей электроэнергии можно разделить на несколько групп [5]:

- промышленные и приравненные к ним (строительные и транспортные предприятия, шахты, рудники, карьеры, нефтяные и газовые промыслы и т. п.);
- производственные сельскохозяйственные (животноводческие фермы, зернохранилища и пр.);

- бытовые (жилые дома, приусадебные хозяйства и т. п.);
- общественно-коммунальные (учреждения, организации, предприятия торговли и общественного питания и др.).

Каждая из приведенных групп потребителей отличается определенным режимом работы, а, соответственно, и электрической нагрузкой для электроэнергетической системы. Эти особенности необходимо учитывать для организации эффективного и безаварийного функционирования электрогенерирующих систем.

Учет потребляемой различными видами нагрузок электроэнергии в ЕЭС России и ТИТЭС обеспечивается с помощью автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ). Такие системы включают комплекс оборудования и программного обеспечения, обеспечивающих точный сбор, обработку и передачу данных об объемах потребляемой энергии. К основным компонентам АСКУЭ относятся: интеллектуальные приборы учета (электросчетчики), коммутационное оборудование, телекоммуникационные сети и программное обеспечение, обеспечивающее автоматизацию процессов учета и анализа потребления электроэнергии. Современные приборы учета электроэнергии являются цифровыми устройствами, что позволяет использовать их не только для учета потребленной электроэнергии и передачи результатов измерений, но и для полного или частичного ограничения режима потребления электрической энергии при перегрузках.

В электроэнергетике известны различные методы управления нагрузками, например:

- автоматическое регулирование нагрузки (потребление регулируют в зависимости от текущей нагрузки на сеть);
- использование устройств плавного пуска и частотных преобразователей, обеспечивающих снижение скачков нагрузки при запуске оборудования;
- использование интеллектуальных систем управления энергией (EMS), которые на основе анализа текущих данных о потреблении и прогнозирования могут принимать решения о перераспределении нагрузки, отключении неприоритетных потребителей или использовании резервных источников энергии;
- использование систем хранения энергии (аккумуляторных батарей, накопителей на основе суперконденсаторов), позволяющих накапливать энергию в периоды низкого потребления и использовать ее в пиковые периоды.

Таким образом, в настоящее время в ЕЭС России и ТИТЭС на практике используются современные средства учета произведенной и потребленной электроэнергии, а также средства управления нагрузками. Задача состоит в том, чтобы объединить эти средства в единую систему, что обеспечит возможность эффективно использовать уже имеющиеся средства генерации электроэнергии, снизить аварийность систем электроснабжения и себестоимость производимой электроэнергии, решить ряд других задач, связанных с надежностью

электроснабжения уже существующих и перспективных потребителей электроэнергии.

Современная система учета электроэнергии и управления нагрузками должна быть реализована в виде целостного программно-аппаратного комплекса, представляющего собой, по сути, информационно-измерительную систему контроля и управления (ИИС КУ). Как и любая ИИС, система должна включать совокупность датчиков для получения измерительной информации о текущем потреблении электроэнергии и состоянии оборудования системы (генерирующего, транспортирующего и т. п.), а также совокупность исполнительных устройств для управления нагрузками, предотвращения аварийных ситуаций и т. п. Основным элементом системы является вычислительное устройство, функционирующее под управлением соответствующего программного обеспечения. Передача информации (измерительной, управляющей) между отдельными элементами системы, удаленными территориально, обеспечивается современными средствами связи.

Ключевым элементом ИИС КУ выступают интеллектуальные приборы учета электроэнергии, которыми, согласно Федеральному закону Российской Федерации от 27.12.2018 г. № 522-ФЗ [6], начиная с первого января 2021 г. должен быть оснащен каждый многоквартирный дом после его ввода в эксплуатацию. Такие приборы учета представляют собой микропроцессорные устройства, обеспечивающие многотарифный учет, отдельно фиксирующие активную и реактивную энергию, измеряющие в реальном времени параметры качества электроэнергии (напряжение, частоту, гармоники) и выступающие сетевыми терминалами с двусторонней связью. Их работа обеспечивает сбор детализированного профиля нагрузки потребителя – набора данных с временной привязкой, который является «цифровым отпечатком» его энергопотребления.

Для измерения в высоковольтных цепях используют измерительные трансформаторы тока и напряжения, которые, как правило, оснащены цифровым выходом. Это позволяет передавать оцифрованный сигнал непосредственно по оптоволоконным линиям, что исключает дополнительные погрешности и обеспечивает высокую точность результата измерения.

В качестве источников информации о состоянии оборудования электроэнергетической системы необходимо использовать:

- датчики температуры на контактах, контролирующие перегрев;
- датчики вибрации на трансформаторах, выявляющие механические неисправности;
- датчики обледенения линий электропередачи;
- устройства фиксации несанкционированного доступа (антимагнитные пломбы, датчики вскрытия).

Информация от средств измерения и различных датчиков поступает в локальные сети сбора данных (ЛССД). Техническими средствами для реализации ЛССД могут быть, например: на промышленных предприятиях – проводная шина RS-485, в зданиях с развитой IT-инфраструктурой – сеть

Ethernet, а для территориально распределенных или сложных для прокладки кабелей объектов – беспроводные технологии с низким энергопотреблением и большой дальностью, такие как LoRaWAN. Собранные на локальных концентраторах данные затем отправляются на центральный сервер по каналам дальней связи. Такие каналы можно реализовать, например, с помощью публичных сетей мобильной связи (4G/LTE), выделенных высокозащищенных радиоканалов или оптоволоконных линий.

Собранные таким образом данные используются в программно-аналитическом комплексе системы: происходит накопление и хранение данных в специализированных базах, их сложная обработка, выполнение расчетов, сопоставление отпущенной в сеть энергии с оплаченной потребителями, осуществляется анализ профилей нагрузки, который выявляет закономерности, строит прогнозы потребления и интегрируется с системой управления нагрузками. Данные о текущей и прогнозируемой нагрузке, полученные системой учета, используются для формирования управляющих команд. Эти команды могут выполняться как автоматически, по заданным алгоритмам (например, при достижении сетью предельной нагрузки происходит дистанционное отключение части неприоритетных потребителей), так и вручную диспетчером.

Таким образом, разработка структуры автоматизированной системы учета электрической энергии и управления нагрузками – это комплексная междисциплинарная задача, находящаяся на стыке энергетики, информационно-измерительной техники и телекоммуникаций. Ее успешное решение заключается в проектировании целостной, открытой, масштабируемой и безопасной архитектуры с использованием самых современных технических решений.

Список литературы

1. Мировая энергетика и ИИ-бум. Хватит ли энергии на всех? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://worldmarketstudies.ru/article/mirovaa-energetika-i-ii-bum-hvatit-li-energii-na-vseh/>.

2. Схема и программа развития электроэнергетических систем России на 2026-2031 годы [Электронный ресурс] : приказ Минэнерго России от 28.11.2025 г. № 1553. – Режим доступа: https://www.minenergo.gov.ru/upload/iblock/0ee/qk0fgtteujwd4pwydt7h72i53bm4ybqc/Prikaz-Minenergo-1553-SIPR-2026_2031.pdf.

3. Эксперты назвали меры для борьбы с энергодефицитом в России. Почему действующих механизмов недостаточно? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rbc.ru/business/23/04/2025/6806710c9a7947155691b18e?ysclid=mkibm4bbau261410442>.

4. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года [Электронный ресурс] : распоряжение Правительства Рос. Федерации от

12.04.2025 г. № 908-р. – Режим доступа:
<https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/d6a/Energostrategiya-RF-do-2050-goda.pdf?ysclid=mkjjakefh6522125403>.

5. Савина, Н. В. Электроэнергетические системы и сети : учебное пособие : в 2 ч. / Н. В. Савина. – Благовещенск : Амурский гос. ун-т, 2014. – Ч. 1. – 177 с.

6. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации: Фед. закон от 27.12.2018 г. № 522-ФЗ [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: справ.-прав. система. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_314661.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

**Синявский И.И., Валиуллин К.Р., канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Обеспечение надёжности, эффективности и технологической безопасности энергетической инфраструктуры является стратегическим приоритетом развития страны в соответствии с Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 года, утверждённой распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р[1]. Особое внимание в документе уделяется внедрению цифровых технологий и интеллектуальных систем мониторинга для повышения эксплуатационной готовности энергообъектов.

Для промышленных предприятий и энергокомпаний электрооборудование распределительных устройств представляет собой критически важный актив, от бесперебойной работы которого напрямую зависят непрерывность технологических процессов, экономические показатели деятельности и безопасность персонала.

Одной из ключевых проблем в эксплуатации такого оборудования являются дефекты, приводящие к локальному перегреву контактных соединений, токоведущих частей или элементов изоляции. Своевременное обнаружение подобных термических аномалий позволяет предотвратить развитие аварийных ситуаций, избежать значительных экономических потерь от перерывов в электроснабжении и сократить затраты на ремонты.

Традиционные методы периодического тепловизионного контроля, выполняемые оператором вручную, характеризуются субъективностью оценки, невозможностью непрерывного наблюдения и низкой оперативностью реакции на развивающийся дефект. Активное развитие энергетической инфраструктуры, рост нагрузок и ужесточение требований к надёжности электроснабжения делают эти методы технологически устаревшими и экономически неэффективными.

В этой связи разработка автоматизированного решения для непрерывного тепловизионного мониторинга состояния электрооборудования, способного своевременно выявлять термические аномалии, минимизировать участие оператора и интегрироваться в системы предиктивного обслуживания, становится ключевой технической задачей. Однако существующий спектр методов разнороден и требует систематизации для понимания их возможностей, ограничений и определения наиболее перспективных направлений развития для задач предиктивной диагностики.

Анализ научно-технической литературы в области тепловизионного контроля состояния электрооборудования позволил систематизировать существующие методы по пяти основным классификационным признакам:

- по характеру взаимодействия с исследуемым объектом (физическая классификация);
- по методу анализа и выявления повреждений (классификация по методологии);
- По режиму контроля (эксплуатационная классификация);
- по уровню автоматизации обработки результатов;
- по детализации результатов.

Рассмотрим кратко каждый из них.

Физическая классификация (по характеру взаимодействия).

В данной группе методы определяются источником теплового сигнала.

Пассивная термография является основным методом для диагностики под нагрузкой, регистрируя собственное инфракрасное излучение объекта, возникающее вследствие омического нагрева или диэлектрических потерь. Его ключевое ограничение — неспособность выявлять внутренние дефекты при малой нагрузке или ее отсутствии.

В отличие от пассивных, активные методы требуют внешнего энергетического воздействия на объект. Эти методы применяются для неразрушающего контроля материалов и выявления скрытых дефектов в обесточенном оборудовании.

Импульсная активная термография основывается на кратковременном тепловом ударе и анализе процесса остывания, что позволяет выявлять внутренние расслоения в изоляторах.

Модулированная (Lock-in) термография использует периодическое нагревание и анализ фазового сдвига тепловой волны, что делает её высокоточным методом для обнаружения микротрещин.

Ультразвуковая термография (вибротермография) преобразует механическую энергию ультразвуковых колебаний в тепло в зонах дефектов, выявляя усталостные микротрещины и дефекты сварки.

Лазерная сканирующая термография (лазерная фототермическая радиометрия) представляет собой один из наиболее точных методов активного неразрушающего контроля. В отличие от пассивной термографии, которая регистрирует тепло от тока нагрузки, лазерная термография использует лазер как внешний источник энергии для локального нагрева поверхности. Анализ динамики распространения этого тепла позволяет обнаруживать скрытые дефекты структуры (трещины, отслоения) с высоким разрешением. Если системы непрерывного мониторинга ориентированы на эксплуатационный контроль, то лазерная термография чаще применяется на этапе производственного контроля или глубокой диагностики. В таблице 1 представлена физическая классификация методов тепловизионного контроля (ТК).

Таблица 1 – Физическая классификация методов

Метод ТК	Суть метода	Автор / разработчик	Пример реализации
Пассивная термография	Регистрация собственного ИК-излучения объекта под нагрузкой	В. П. Вавилов [4, 5], РД 153-34.0-20.363-99 [2]	Fluke Ti480 PRO, FLIR AX8
Импульсная термография	Кратковременный тепловой импульс и анализ остывания объекта	В. П. Вавилов [5], S. Shepard [10]	EchoTherm, FLIR X8580
Lock-in термография	Периодическое нагревание и фазовый анализ тепловых волн	G. Busse [11]	Automation Technology IR-NDT
Ультразвуковая термография	Преобразование акустической энергии в тепло в зоне дефектов	S. Shepard [10]	VisioSonic, FLIR SC/X
Лазерная термография	Локальный лазерный нагрев и сканирование поверхности	В. П. Вавилов [5]	Роботизированные НК-комплексы

Нормативная классификация (по методологии анализа).

Данная группа методов определяет алгоритмы обработки тепловизионных данных в соответствии с нормативными документами и принципами диагностики.

Метод абсолютных температур основан на прямом сравнении измеренного значения температуры объекта с фиксированными нормативными значениями, установленными стандартами или заводами-изготовителями.

Метод превышения температуры (ΔT) основан на оценке разности между измеренной температурой объекта и температурой окружающего воздуха. Этот метод позволяет выделить «добавочный» нагрев, вызванный протеканием тока или дефектом, нивелируя влияние внешних условий.

Метод относительного нагрева (коэффициент дефектности K_d) основан на оценке состояния через отношение перегрева дефектного узла к перегреву аналогичного исправного, что позволяет выявить дефект на ранней стадии при малой нагрузке.

Динамический адаптивный метод с учетом тока нагрузки основан на расчете допустимого уровня нагрева в реальном времени с учетом фактической нагрузки оборудования (измеренного тока) и температуры окружающей среды. Это позволяет отделить аномальный нагрев, вызванный дефектом, от

нормального рабочего нагрева под нагрузкой, повышая точность и предиктивный потенциал диагностики.

Метод температурных градиентов основан на анализе распределения температуры по поверхности объекта для выявления внутренних дефектов изоляции по искажению теплового поля.

Количественный анализ по NFPA представляет собой международный индустриальный стандарт, который жёстко регламентирует классификацию дефектов по шкале разности температур, требуя обязательной сертификации специалиста. В таблице 2 представлена нормативная классификация методов ТК.

Таблица 2 – Нормативная классификация методов ТК

Метод	Суть метода	Автор / Разработчик	Пример реализации
Метод Абсолютных температур	Сравнение измеренной температуры узла с предельно допустимыми значениями по нормативам.	РД 153-34.0-20.363-99 [2], ISO 18434-1 [10]	Любой измерительный тепловизор (Testo, Guide, Fluke)
Метод превышения температуры (ΔT)	Оценка состояния по разности температур между узлом и окружающей средой (воздухом).	С. А. Бажанов [2]	Тепловизоры FLIR T540, ПО FLIR Thermal Studio
Метод относительного нагрева (Кд)	Отношение превышения температуры дефектного узла к превышению температуры исправного узла.	И. М. Озерницкий [2], ПАО «Россети»	FLIR T865, методики ПАО «Россети»
Динамический адаптивный метод с учетом тока нагрузки	Анализ распределения температурных полей для поиска внутренних скрытых дефектов.	В. В. Поляков, Институт «ВЕМО»	FLIR T1020, высокоразрешающие ИК-системы
Метод температурных градиентов	Анализ характера распределения температурных полей по поверхности для поиска внутренних скрытых дефектов.	Институт «ВЕМО», В. В. Поляков	FLIR T1020, высокоразрешающие системы ИК-панорамирования

Классификация по режиму контроля.

Эта классификация определяет способ организации процесса контроля.

Периодический обходной ТК — это базовая форма, при которой специалист с переносным тепловизором обследует объекты по утверждённому графику.

Непрерывный мониторинг представляет собой установку стационарных датчиков (реле «КАКТУС», смарт-тепловизоры FLIR A50) непосредственно в электроустановках для круглосуточного контроля и передачи данных в режиме реального времени.

Беспилотный автономный ТК (UAV) используется для обследования распределённых объектов, таких как ЛЭП, с помощью дронов, оснащенных тепловизорами и выполняющих полёт по заданному маршруту.

Стационарный мониторинг шкафов — это специализированный вид непрерывного мониторинга, при котором компактные ИК-сенсоры устанавливаются **внутри шкафов КРУ/КСО** для постоянного контроля скрытых и труднодоступных соединений (шинные мосты, контакты выключателей). В отличие от обычного непрерывного мониторинга, ориентированного на внешние узлы оборудования, данный метод позволяет выявлять перегрев и дефекты внутри шкафов, недоступных для визуальной или внешней диагностики. В таблице 3 представлена эксплуатационная классификация методов ТК.

Таблица 3 – Эксплуатационная классификация методов ТК

Метод	Суть метода	Автор / Разработчик	Пример устройства
Периодический обходной ТК	Плановое тепловизионное обследование по утвержденному графику силами персонала.	РД 153-34.0-20.363-99 [2]	Портативные тепловизоры (Fluke Ti480 PRO, Guide PC210)
Непрерывный мониторинг	Стационарный круглосуточный контроль с интеграцией в цифровые платформы и предиктивную аналитику.	Энергетическая стратегия РФ [1], ООО «ИННОТЕХ»	Реле «Кактус», системы мониторинга «I-MT»
Беспилотный ТК (UAV)	Дистанционная инспекция протяженных объектов (ЛЭП) с использованием БПЛА и ИК-камер.	DJI [13], ПАО «Россети»	DJI Matrice 350 RTK + Zenmuse H30T

Продолжение таблицы 3

Метод	Суть метода	Автор / Разработчик	Пример устройства
Стационарный мониторинг шкафов КРУ/КСО	Постоянный мониторинг внутренних труднодоступных соединений (шин, контактов) без вскрытия.	ГОСТ Р 72289-2025 [3]	FLIR AX8, интеллектуальные датчики температуры

Классификация по уровню автоматизации обработки результатов.

Данная группа отражает степень автоматизации обработки результатов анализа тепловизионных снимков.

ИИ-сегментация и детектирование используют нейронные сети для автоматического поиска и распознавания дефектов на термограммах.

Embedded TinyML анализ представляет собой технологию «интеллекта на периферии» (Edge AI), когда оптимизированные модели машинного обучения работают непосредственно в микроконтроллерах датчиков.

Метод температурных трендов является основой предиктивного обслуживания и заключается в анализе исторических данных температуры для прогнозирования отказа.

Облачная предиктивная аналитика предполагает передачу данных в облачные платформы для комплексного анализа и расчёта остаточного ресурса оборудования. В таблице 4 представлена цифровая классификация методов ТК.

Таблица 4 – Цифровая классификация методов ТК

Метод	Суть метода	Автор / Разработчик	Пример реализации
ИИ-сегментация и детектирование	Применение нейросетей (CNN) для автоматического выделения объектов и поиска аномалий.	Бугаева М. А., Кулинчик Д. В. [6]	ПО Percepto AIM, камеры HIKMICRO
Embedded TinyML анализ (Edge AI)	Исполнение моделей ИИ непосредственно на датчике («интеллект на периферии») для мгновенных решений.	Google (TensorFlow Lite) [7]	Модули NVIDIA Jetson Orin Nano [14]
Метод температурных трендов	Статистический анализ временных рядов для предсказания момента отказа.	ГОСТ Р ИСО 17359 [8]	ПО FLIR Thermal Studio Pro, AWS IoT SiteWise [9]
Облачная	Централизованная	Microsoft	ПО «Цифровая

Метод	Суть метода	Автор / Разработчик	Пример реализации
предиктивная аналитика	обработка больших данных ТК в облаке для глобального управления активами.	(Azure IoT) [17]	подстанция» (ПАО «Россети»)

Классификация по детализации уровня обработки данных.

Данная классификация определяет уровень детализации и интеграции полученных данных.

Качественная термография — это визуальный поиск «горячих точек» без точного измерения, используемый для первичного обследования.

Мультиспектральное динамическое наложение (MSX) — технология визуализации, при которой контуры и текст с изображения в видимом спектре накладываются на тепловую картину для облегчения идентификации объектов.

Цифровой двойник создаёт виртуальную модель, синхронизированную с реальными данными для моделирования тепловых процессов и прогнозирования состояния.

3D-термокартирование заключается в наложении тепловых данных на трёхмерную модель объекта, полученную с помощью лазерного сканирования, для пространственного анализа тепловых полей. В таблице 5 представлена классификация методов ТК по детализации обработки данных.

Таблица 5 – Технологическая классификация методов ТК

Метод	Суть метода	Автор / Разработчик	Пример реализации
Качественная термография	Оперативный визуальный поиск «горячих точек» без точного измерения температуры (оценка «норма/аномалия»).	Infraspection Institute [15]	Бюджетные модули (FLIR One Edge, Seek Thermal)
Мультиспектральное наложение (MSX / IR-Fusion)	Текстурирование ИК-изображения деталями видимого спектра для идентификации контуров.	Teledyne FLIR [13], Fluke	FLIR E8-XT, FLIR T865, Fluke Ti480 PRO

Продолжение таблицы 5

Метод	Суть метода	Автор / Разработчик	Пример реализации
Цифровой двойник (Digital Twin)	Интеграция потоковых данных ТК в динамическую 3D-модель объекта для моделирования процессов.	Michael Grieves [12]	Платформы Bentley iTwin, системы мониторинга ПС
3D-термокартирование	Наложение тепловизионного облака точек на геометрию объекта (лидар/фотограмметрия).	Leica Geosystems [16], В. П. Вавилов [4, 5]	Leica BLK2FLY, DJI Matrice 350 + ПО DJI Terra

Сравнительный анализ методов для предиктивного мониторинга.

На основании проведённой систематизации выполнен сравнительный анализ ключевых методов как потенциальных алгоритмических подходов для систем предиктивного мониторинга. Результат данного анализа представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнительный анализ методов тепловизионного контроля как алгоритмических подходов для предиктивного мониторинга.

Метод (подход)	Достоинства для предиктивного мониторинга	Недостатки для предиктивного мониторинга
Абсолютный температурный порог	<ul style="list-style-type: none"> • Простота и надёжность реализации. • Прямое соответствие нормативным требованиям. • Высокая скорость реакции на критические перегревы. 	<ul style="list-style-type: none"> • Не учитывает ток нагрузки, что является фундаментальным недостатком. • Риск ложных предупреждений при допустимых перегрузках оборудования. • Пропуск дефектов, не достигших порога при малой нагрузке.
Относительное сравнение (К _д , сравнение фаз)	<ul style="list-style-type: none"> • Повышенная точность за счет сравнения с эталоном. • Метод К_д частично независим от величины нагрузки. • Позволяет обнаруживать начальные стадии дефектов при неполной нагрузке. 	<ul style="list-style-type: none"> • Требуется наличие исправного однотипного элемента (эталона) для сравнения, что не всегда возможно. • Неэффективен при несимметричной нагрузке фаз. • Высокая сложность автоматизации для разнородного оборудования в составе одной системы.

Продолжение таблицы 6

Метод (подход)	Достоинства для предиктивного мониторинга	Недостатки для предиктивного мониторинга
Динамический адаптивный метод с учётом тока нагрузки	<ul style="list-style-type: none"> • Обеспечивает максимальную точность, адаптируясь к реальному режиму работы. • Учитывает зависимость допустимого нагрева от величины протекающего тока. • Обладает высоким предиктивным потенциалом за счет анализа трендов и адаптации. • Предотвращает ложные предупреждения при перегрузках. 	<ul style="list-style-type: none"> • Требуется установки датчика тока (трансформатора тока) и измерения этого параметра. • Алгоритм сложнее, чем при использовании фиксированного порога. • Требуется калибровки и настройки под конкретный тип оборудования.
Интеллектуальная сегментация (ИИ)	<ul style="list-style-type: none"> • Способна обнаруживать сложные и скрытые паттерны дефектов. • Высокая степень автоматизации анализа. • Эффективна при обработке больших массивов данных от систем мониторинга. 	<ul style="list-style-type: none"> • Требуется значительных объёмов размеченных данных для обучения моделей. • Высокие требования к вычислительным ресурсам. • Сложность интерпретации решений («чёрный ящик»), что может затруднять анализ причин срабатывания.
Интеграция с цифровыми двойниками	<ul style="list-style-type: none"> • Обеспечивает теоретически максимальную точность за счёт комплексного учёта множества факторов в виртуальной модели. • Полное соответствие современным трендам цифровизации и предиктивной аналитики. 	<ul style="list-style-type: none"> • Чрезвычайно высокая стоимость развёртывания и поддержки. • Сильная зависимость от точности вспомогательных систем и математических моделей. • Не является автономным решением.

Проведённый анализ показал, что современный тепловизионный контроль представляет собой развитую, многоуровневую систему методов, каждый из которых решает специфические задачи диагностики электрооборудования — от массового выявления перегретых контактов до прецизионного поиска микротрещин и прогнозирования остаточного ресурса.

Сравнительная оценка методов в контексте формирования алгоритма для предиктивного мониторинга продемонстрировала, что такие перспективные

направления, как методы относительного сравнения (K_d), ИИ-анализ и цифровые двойники, имеют ограничения для применения в качестве базового алгоритма из-за необходимости в эталоне, высоких требований к ресурсам или чрезмерной стоимости.

В результате проведённого анализа в качестве оптимального алгоритмического базиса для систем мониторинга нового поколения был определён динамический адаптивный метод с учётом тока нагрузки. Его ключевое преимущество заключается в устранении фундаментального ограничения систем, работающих по принципу абсолютного порога: данный метод, обеспечивает гибкую адаптацию критериев оценки к фактическому режиму эксплуатации оборудования. Объединяя строгость нормативных ограничений и гибкость адаптивного анализа, он позволяет не просто регистрировать факт перегрева, а достоверно разделять ситуации, вызванные развивающимся дефектом, от нормального рабочего нагрева под нагрузкой. Эта способность является основой для предиктивной диагностической системы.

Таким образом, исследование подтверждает существенный потенциал для эволюции алгоритмического ядра систем тепловизионного контроля. Внедрение динамических адаптивных методов находится в русле общих трендов цифровизации и интеллектуализации энергообъектов, прокладывая путь к созданию комплексных систем, ориентированных на прогнозирование отказов и снижение операционных рисков.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р. — Режим доступа: static.government.ru
2. РД 153-34.0-20.363-99. Методика инфракрасной диагностики электрооборудования и воздушных линий электропередачи. — Утв. РАО «ЕЭС России» 30.06.1999. — Режим доступа: docs.cntd.ru
3. ГОСТ Р 72289-2025. Устройства комплектные распределительные низковольтные. Автоматизированные системы мониторинга. — Введ. 2026-01-01. — М. : Стандартинформ, 2025. — Режим доступа: www.rst.gov.ru
4. Вавилов В. П. Тепловой контроль и диагностика: учебное пособие / В. П. Вавилов. — Томск : Изд-во ТПУ, 2021. — 210 с. — Режим доступа: portal.tpu.ru
5. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. — М. : Спектр, 2018. — 540 с. — Режим доступа: www.geospectrum.ru
6. Бугаева М. А., Кулинчик Д. В. Метод автоматического анализа тепловизионных изображений высоковольтного оборудования с помощью алгоритмов компьютерного зрения // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2025. — Т. 29, № 1(144). — С. 124–136. — Режим доступа: cyberleninka.ru

7. TensorFlow Lite for Microcontrollers [Электронный ресурс]. — Официальная документация Google. — Режим доступа: www.tensorflow.org
8. ГОСТ Р ИСО 17359-2020 (ISO 17359:2018). Контроль состояния и диагностика машин. Общие руководящие указания. — Введ. 2021-07-01. — М. : Стандартинформ, 2020. — Режим доступа: docs.cntd.ru
9. AWS IoT SiteWise User Guide [Электронный ресурс]. — Amazon Web Services, Inc., 2025. — Режим доступа: docs.aws.amazon.com
10. ISO 18434-1:2026. Condition monitoring and diagnostics of machine systems — Thermography — Part 1: General procedures. — Введ. 2026-01-01. — Geneva : ISO, 2026. — Режим доступа: www.iso.org
11. Busse G. Thermal Wave Imaging with Phase Sensitive Modulated Thermography // Journal of Applied Physics. — 1992. — Vol. 71, No. 8. — P. 3962–3965. — Режим доступа: pubs.aip.org
12. CIGRE Technical Brochure 831. Condition Monitoring and Analytics for High Voltage Equipment [Электронный ресурс]. — CIGRE, 2021. — Режим доступа: e-cigre.org
13. DJI Zenmuse H30T Series User Manual [Электронный ресурс]. — DJI Enterprise, 2025. — Режим доступа: www.dji.com
14. NVIDIA Jetson Orin Nano Developer Technical Specifications [Электронный ресурс]. — NVIDIA Corporation, 2025. — Режим доступа: www.nvidia.com
15. Infrasppection Institute. Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems and Rotating Equipment [Электронный ресурс]. — Infrasppection Institute, 2024. — Режим доступа: www.infrasppection.com
16. Leica BLK2FLY Autonomous Flying Laser Scanner Data Sheet [Электронный ресурс]. — Leica Geosystems, 2025. — Режим доступа: leica-geosystems.com
17. Microsoft Azure IoT Central. Architecture and Predictive Maintenance for Energy [Электронный ресурс]. — Microsoft Corporation, 2025. — Режим доступа: learn.microsoft.com.

ОРГАНИЗАЦИЯ ОБМЕНА ДАННЫМИ МЕЖДУ ПЛК OMRON И ВНЕШНИМИ УСТРОЙСТВАМИ ПО ИНТЕРФЕЙСУ MODBUS RTU

Смотрин В.А., Воронин Н.С., Сорокин В.А.

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Оренбургский государственный университет»

В современных системах промышленной автоматизации надёжная и помехоустойчивая передача данных между контроллерами, датчиками, исполнительными механизмами и человеко-машинными интерфейсами (HMI) играет ключевую роль. Одним из наиболее распространённых физических уровней связи в таких системах является интерфейс RS-485.

RS-485 — это стандарт последовательной дифференциальной передачи данных, разработанный для работы в условиях промышленных помех и на значительных расстояниях (до 1200 м при скорости до 100 кбит/с). В отличие от более простого интерфейса RS-232, RS-485 поддерживает многоточечное соединение (до 32 и более устройств на одной линии), что делает его идеальным для построения сетей управления, где центральный контроллер (мастер) обменивается данными с несколькими периферийными устройствами (слейвами).

К преимуществам RS-485 относятся высокая помехоустойчивость благодаря дифференциальному сигналу, возможность передачи данных на большие расстояния, поддержка многоточечной топологии шины, относительная простота аппаратной реализации. Недостатками же являются требование согласования окончания линии (терминаторы 120 Ом), необходимость строгого соблюдения правил монтажа (скрученная пара, отсутствие «звёзд» и длинных отводов), полудуплексный режим (в большинстве реализаций) — одновременная передача и приём невозможны.

Благодаря своей надёжности и совместимости с популярными промышленными протоколами, такими как Modbus RTU, интерфейс RS-485 широко применяется для связи программируемых логических контроллеров (ПЛК) с панелями оператора, частотными преобразователями, датчиками и другими устройствами.

В данной статье рассматривается практический пример организации обмена данными между ПЛК OMRON CP2E-N и ОВЕН СМН2-М трехцветный Modbus индикатор через интерфейс RS-485 с использованием протокола Modbus RTU. Решение демонстрирует, как устройства разных производителей могут быть успешно интегрированы в единую систему управления при условии соблюдения стандартов и корректной настройки аппаратной и программной части.

Подключение осуществляется по стандартной схеме RS-485 "два провода". На плате CP1W-CIF11 необходимо правильно установить DIP-переключатели (рисунок 1):

- 1 DIP-переключатель – off;
- 2 DIP-переключатель – on;
- 3 DIP-переключатель – on;
- 4 DIP-переключатель – off;
- 5 DIP-переключатель – on;
- 6 DIP-переключатель – on.

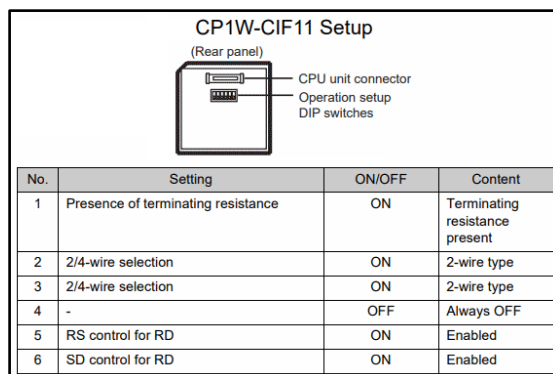


Рисунок 1 – Настройка DIP-переключателей на RS-485

После выставления все DIP-переключателей в нужное положение подключаются два провода в разъемы SDA- и SDB+. Далее подключается панель оператора ОВЕН СМІ2-М [2]. В первые два разъема подается постоянное напряжение 24 В от лабораторного блока питания (ЛБП), а к разъемам А и В соответственно SDB+ и SDA- (рисунок 3). Следом подается переменное напряжение 220В на ПЛК. Настройка панели оператора производится в OWEN Configurator.

Таблица 1 – Функции для настройки ОВЕН СМІ2-М

Режим работы	Slave (ожидает запросов от ПЛК)
Функция Modbus	(0x04) Read Input Registers — чтение входных регистров (часто используется для получения данных с датчиков/приводов) (0x03) Read Holding Registers — чтение регистров хранения (для управления, если будут кнопки) (0x06) Write Single Register / (0x10) Write Multiple Registers — запись (если нужен управляющий ввод с панели)
Адрес первого регистра	Например, 10 — начальный адрес в ПЛК, откуда читаются данные
Количество регистров	1...125 (ограничено длиной Modbus-пакета)
Таймаут ответа	10 ... 1000 мс — время ожидания ответа от ПЛК (если ПЛК не ответит — ошибка связи)
Контроль ошибок	CRC-16 (встроенный в Modbus RTU)

В CX-Program сначала настраивает порт для подключения по RS-485. Одним из важнейших параметров является скорость передачи данных. На всех

подключенных устройствах она должна быть одинаковой, в противном случае передачи данных не будет. Настройка порта изображена на рисунке 5.

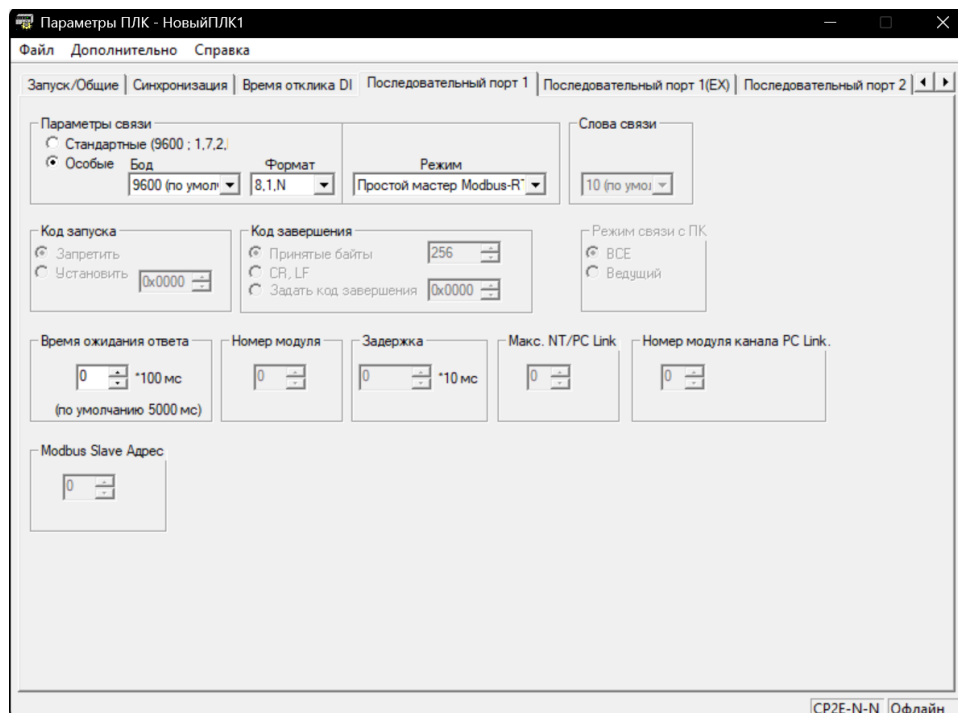


Рисунок 5 – Настройка порта в CX-Program

Передача данных в CX-Program [4] осуществляется с помощью специального функционального блока из библиотеки Modbus_RTU_master [1]. Для реализации надёжного взаимодействия между программируемым логическим контроллером OMRON CP2E и периферийными устройствами, такими как панели оператора, частотные преобразователи или датчики, компания OMRON предоставляет специализированные функциональные блоки (Function Blocks), реализующие протокол Modbus RTU в режиме мастера. Эти блоки значительно упрощают программирование, автоматизируя формирование запросов, обработку ответов, расчёт CRC и управление последовательностью передачи данных. Все блоки разработаны для работы в среде CX-Programmer версии 9.72 и выше и используют встроенные или расширяемые последовательные порты ПЛК (RS-232C, RS-485 или внешние модули, например, CP1W-CIF11).

Каждый функциональный блок соответствует одной из стандартных функций протокола Modbus и имеет три варианта исполнения в зависимости от используемого порта:

- P1 — встроенный RS-232C или первый порт расширения;
- P2 — встроенный RS-485 (в моделях CP2E-N/S) или второй порт расширения;
- P1EX — дополнительный порт при использовании двухпортового модуля CP2W-CIFD.

Все блоки подключаются к программе через команду Insert → Function Block → From File, а их работа управляется через единственный входной флаг Execute (Boot flag). Важно помнить, что вход EN должен быть постоянно подключён к системному сигналу P_On, а флаг Execute необходимо сбрасывать только после получения импульса на выходе FB_OK, иначе команда не будет отправлена.

Функциональный блок `_CP2E030_SendModRTU_F01_P` реализует функцию Read Coils (код Modbus 0x01) и предназначен для чтения состояния дискретных выходов (Coils) удалённого устройства — например, состояния кнопок или индикаторов на панели оператора. Блок позволяет считать до 16 бит за один запрос, начиная с заданного адреса. Полученные данные сохраняются в области Work Area (W), что удобно для временного хранения логических сигналов. Этот блок особенно полезен при необходимости опроса управляющих элементов НМІ без использования аналоговых каналов (рисунок 6).

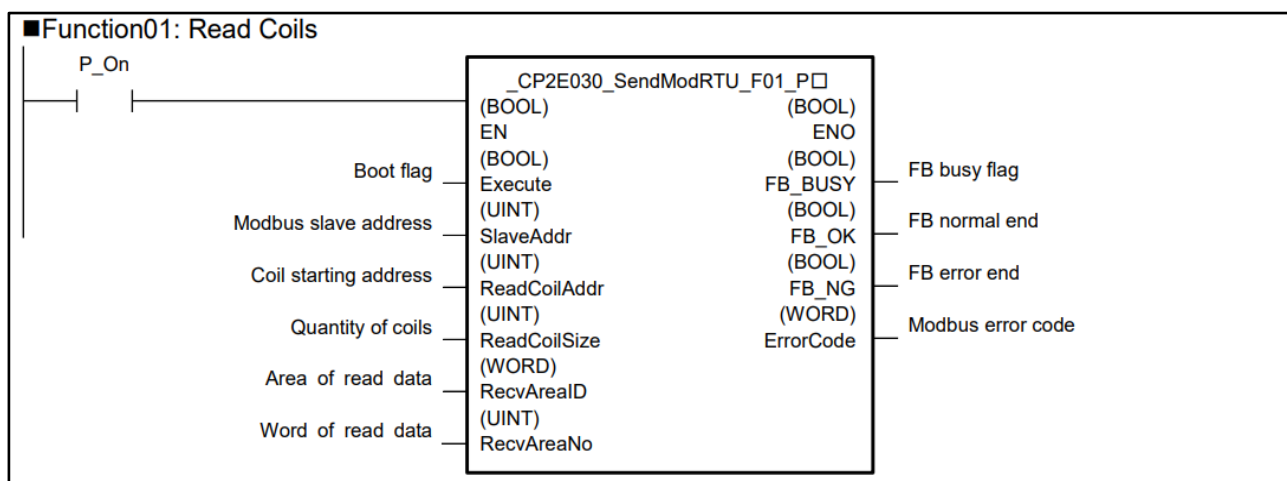


Рисунок 6 – Блок Read Coils

Наиболее часто используемый в практике — блок `_CP2E030_SendModRTU_F03_P`, реализующий функцию Read Holding Registers (0x03). Он позволяет считывать до 20 16-битных регистров из области Holding Registers слейва, что идеально подходит для получения технологических параметров: температуры, давления, скорости двигателя, уставок и т.д. Данные сохраняются в Data Memory (DM) ПЛК — например, в регистры D1000–D1019 (рисунок 7).

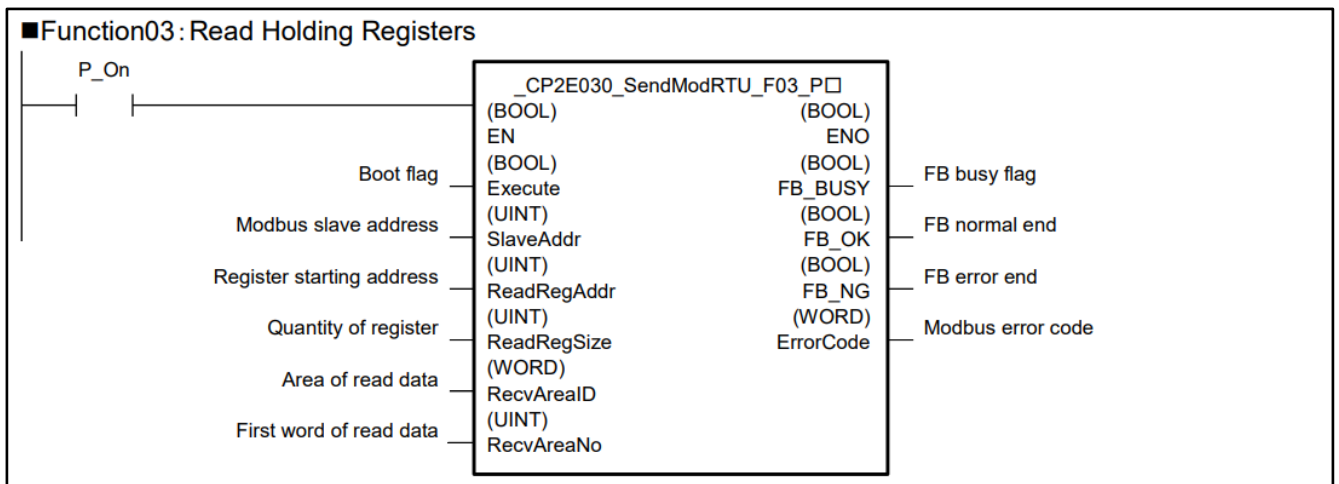


Рисунок 7 – Блок Read Holding Registers

Для дистанционного управления отдельными реле, светодиодами или командами «Пуск/Стоп» применяется блок `_CP2E030_SendModRTU_F05_P` (Write Single Coil, код 0x05). Он записывает один бит в указанный Coil слейва: значение #FF00 соответствует состоянию ON, а #0000 — OFF. Этот блок отличается простотой и минимальной нагрузкой на шину, что делает его предпочтительным для передачи управляющих команд с панели на ПЛК или наоборот. Например, отправка команды «Аварийный останов» на частотный преобразователь может быть реализована именно этим блоком (рисунок 8).

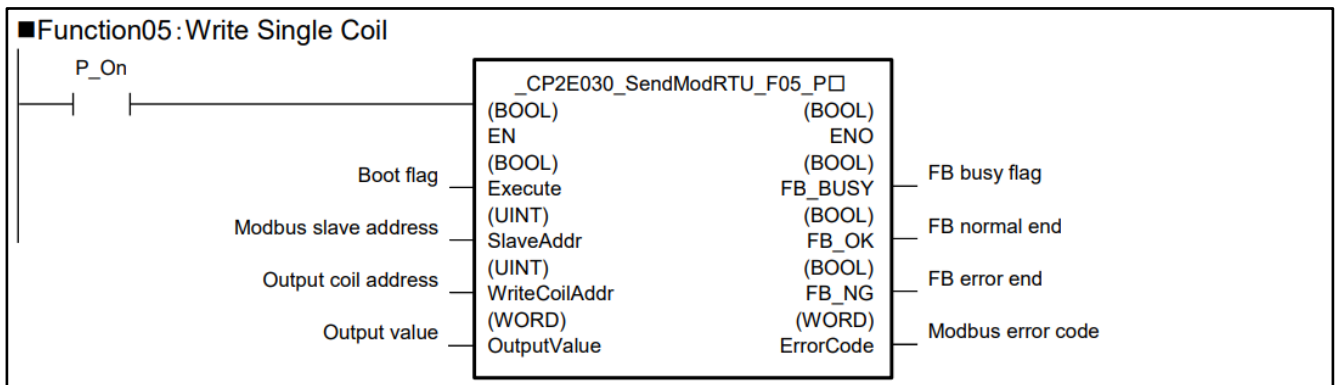


Рисунок 8 – Блок Write Single Coil

Когда требуется передать одно 16-битное значение — например, уставку температуры или частоты вращения — используется блок `_CP2E030_SendModRTU_F06_P` (Write Single Register, код 0x06). Источником данных служит любой регистр из области DM, указанный через параметры `SendAreaID = P_DM` и `SendAreaNo` (например, `&500 → D500`). Этот блок активно применяется при настройке параметров оборудования в реальном времени и является логическим продолжением F03 в обратном направлении — от ПЛК к слейву (рисунок 9).

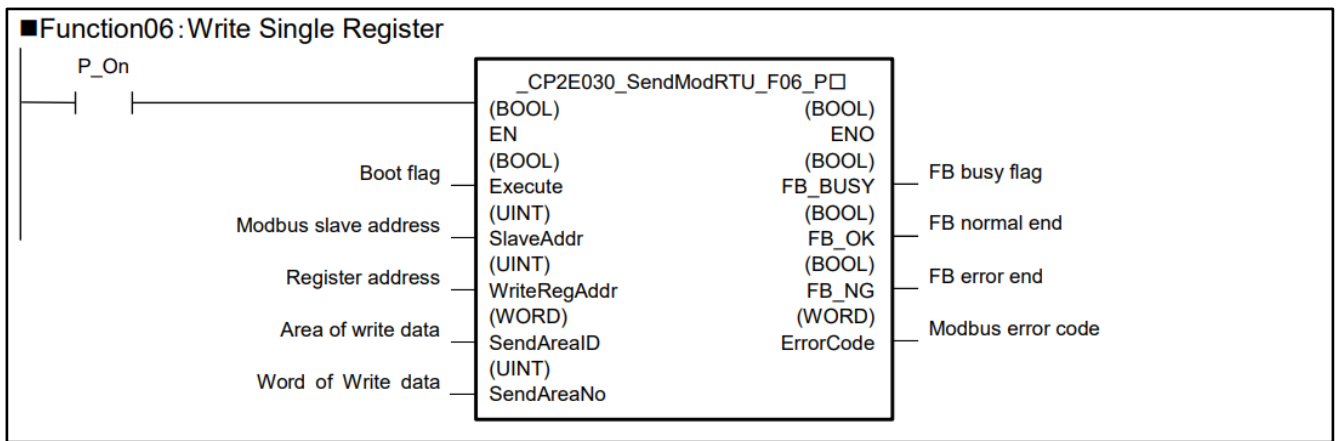


Рисунок 9 – Блок Write Single Register

Наиболее мощным инструментом является блок `_CP2E030_SendModRTU_F10_P` (Write Multiple Registers, код `0x10**`), позволяющий записать до 20 регистров за один запрос. Блок берёт данные из последовательных ячеек DM (например, D100–D119) и передаёт их слейву, начиная с указанного адреса. Это особенно эффективно при передаче массивов: текстовых сообщений, графиков, наборов уставок или состояний нескольких переменных одновременно. Благодаря этому минимизируется трафик на шине и снижается нагрузка на процессор ПЛК (рисунок 10).

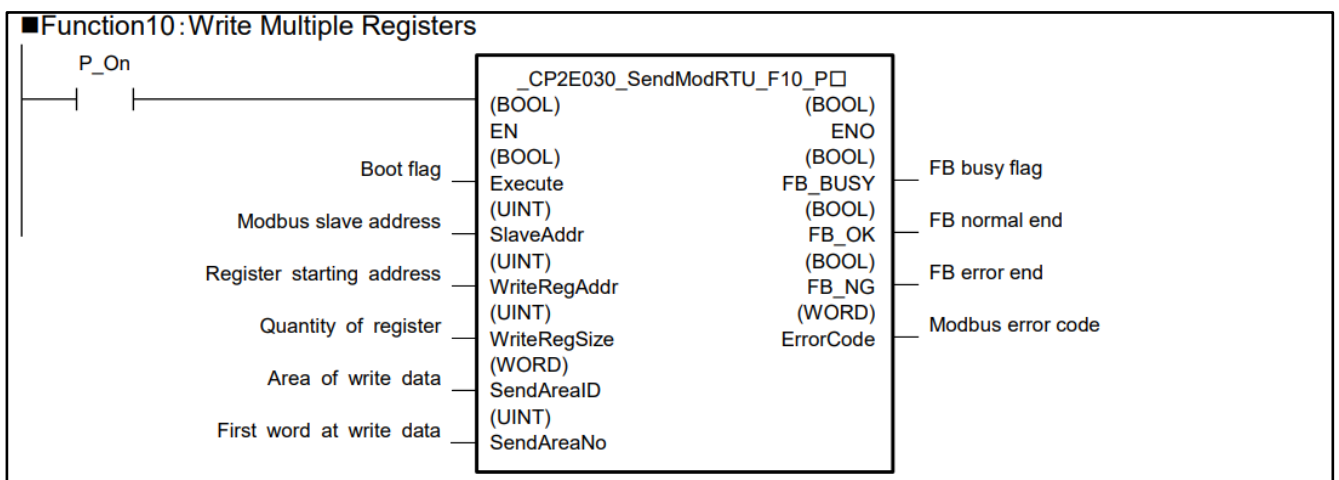


Рисунок 10 – Блок Write Multiple Registers

Рассмотрим применение FB на примере программы, выполненной на ПЛК Omron CP2E-N (рисунок 11).

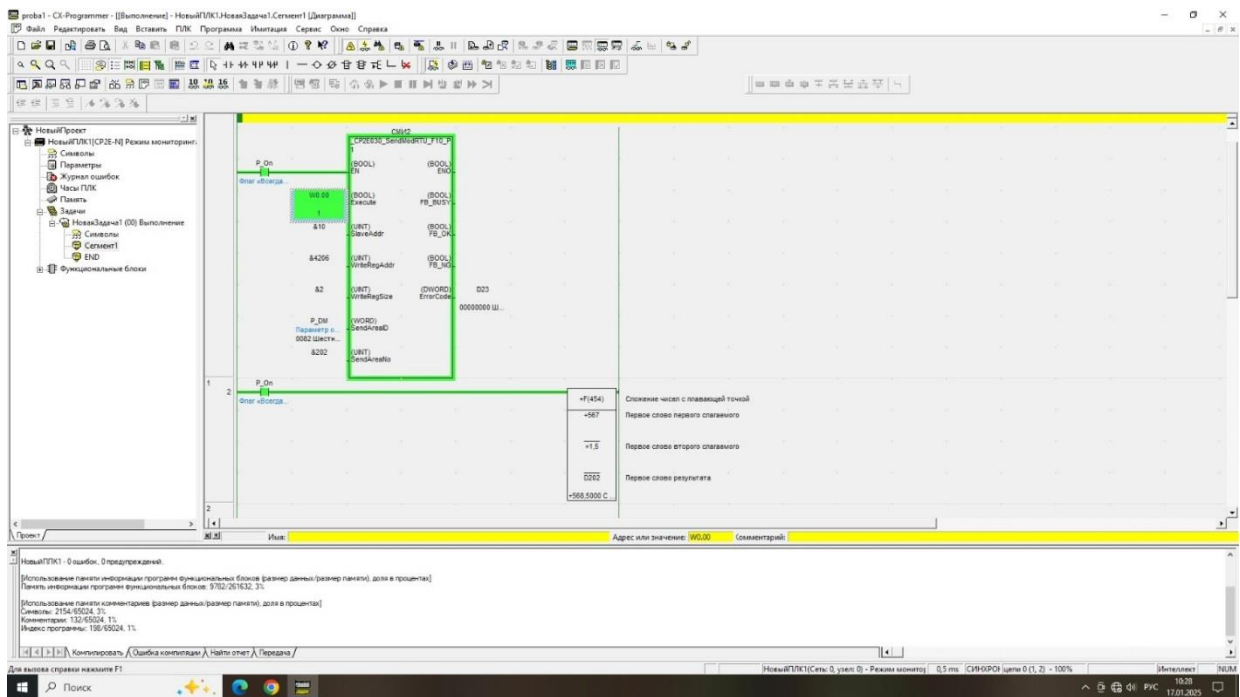


Рисунок 11 – Пример программы для реализации передачи данных по протоколу Modbus_RTU

В данном примере используется блок «_CP2E030_SendModRtu_F10_P1». Данный функциональный блок используется для записи данных в Slave устройства по протоколу RS-485 через порт 1. Параметр EN отвечает за работу блока, параметр Execute является флагов ручного включения и выключения блока, параметр SlaveAddr отвечает за уникальный адрес Slave устройства. В примере указан адрес панели оператора Овен. Параметр WriteRedAddr отвечает за регистр, к которому обращается ПЛК. Регистр 4206 в панели оператора используется для записи данных. Параметр WriteRegSize обозначает размер регистра Slave устройства. SendAreaID используется для обращения к областям памяти в ПЛК. В примере применяется параметр области памяти P_DM. ErrorCode используется для отслеживания ошибок во время работы программы. На рисунке 12 изображено физическое подключение и реализация программы на реальном оборудовании.

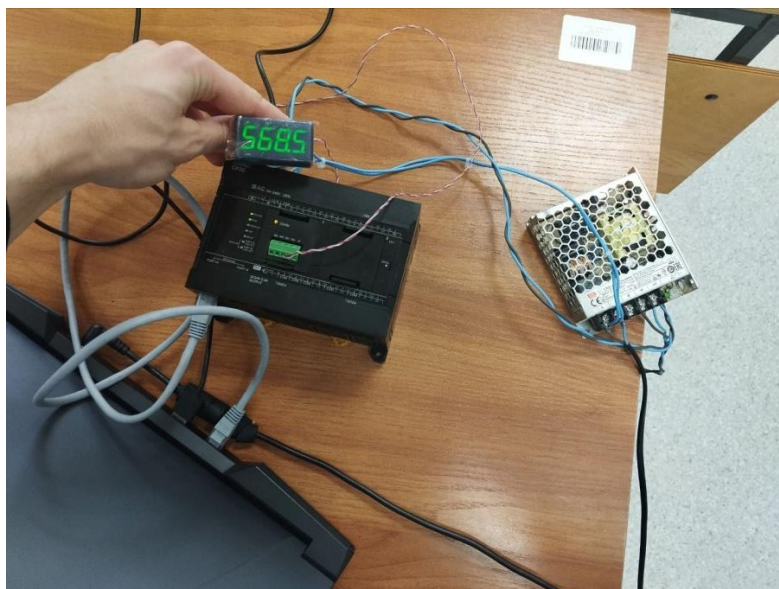


Рисунок 12 – Реализация передачи данных по протоколу Modbus_RTU

В статье представлен практический подход к организации обмена данными между программируемым логическим контроллером Omron CP2E и панелью оператора ОВЕН СМИ2-М через интерфейс RS-485 с использованием протокола Modbus RTU. Подробно рассмотрены аппаратные настройки модуля CP1W-CIF11, подключение оборудования и конфигурирование программного обеспечения с обеих сторон.

Показано, что интеграция устройств различных производителей возможна благодаря поддержке стандартизированного протокола Modbus RTU, что обеспечивает гибкость и масштабируемость решений в промышленной автоматизации. Приведённый пример программы на языке функциональных блоков демонстрирует работоспособность предложенной схемы и может служить типовым шаблоном для решения аналогичных задач.

Предложенная методика позволяет реализовать надёжный канал связи для визуализации технологических параметров в реальном времени, что является важным компонентом современных систем управления. Решение может быть адаптировано для более сложных конфигураций с увеличением числа передаваемых данных и добавлением функций управления с панели оператора.

Список литературы

1. Omron. CP-series Function Block. Practices Guide. Modbus RTU Master. – 30 с.
2. Панель оператора СМИ2-М. Руководство по эксплуатации. Версия 1.33. ОВЕН, 2023. 48 с.
3. SYSMAC CP Series CP2E CPU Unit Datasheet. Cat. No. P145-E1-06. OMRON Corporation, 2022. 48 p.
4. CX-Programmer Operation Manual. Version 9.x. OMRON Corporation.

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

Соколов В.Ю., канд. техн. наук, доцент, Новиков И.К.

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

В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Об Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» среди приоритетных направлений развития электроэнергетики выделяются повышение надёжности энергоснабжения, увеличение доли возобновляемых источников энергии и внедрение современных интеллектуальных систем управления.

Развитие солнечной генерации и её интеграция в существующие энергосистемы приводят к необходимости совместной работы традиционных теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) и солнечных электростанций, что усложняет задачи оперативного регулирования режимов и обеспечения баланса электрической и тепловой нагрузки. Существенные колебания выработки солнечной станции, обусловленные погодными условиями, требуют быстрого и согласованного перераспределения нагрузок между источниками, иначе возрастают риски снижения надёжности энергоснабжения, роста расхода топлива и износа оборудования ТЭЦ. Анализ научно-технической литературы показал, что существующие исследования не в полном объеме охватывают вопросы автоматизации управления совместной работы ТЭЦ и солнечной станции.

Поэтому разработка и исследование системы автоматизации управления совместной работой ТЭЦ и солнечной станции в современных условиях является актуальной и значимой задачей.

Цель работы: выбор оптимальной структуры и состава электротехнического комплекса, состоящего из тепло - солнечной электростанции и сравнение различных вариантов.

Для достижения поставленной цели необходимо провести анализ научно-технической литературы в области автоматизированного управления комбинированной энергосистемой в данной статье представлены результаты решения сформулированной задачи.

Проведенный анализ научно технической литературы позволил условно выделить четыре группы способов управления комбинированной энергосистемы:

- 1) плановое управление совместной работой ТЭЦ и СЭС на основе заранее рассчитанных режимов
- 2) автоматизированное диспетчерское управление на базе SCADA для ТЭЦ и подключенной СЭС

3) оптимизационно-прогнозное управление комплексом ТЭЦ и СЭС на основе математической модели

4) интеллектуальная система интеграции ВИЭ в энергосистему ТЭЦ

Рассмотрим кратко каждый из способов управления комбинированной энергосистемы.

Плановое управление совместной работой ТЭЦ и СЭС на основе заранее рассчитанных режимов – этот метод основан на заранее определённых графиках работы ТЭЦ и СЭС, что позволяет управлять энергоснабжением с высокой предсказуемостью и стабильностью. Его простота внедрения и высокая надёжность делают его удобным для анализа различных вариантов структуры комплекса. Однако у метода есть и серьёзные ограничения. Главным минусом является отсутствие учета фактических колебаний солнечной генерации и нагрузки, что снижает гибкость системы. Например, в случае непредсказуемых изменений в погодных условиях (например, облачность или изменение интенсивности солнечного света), система не может оперативно реагировать на изменения. Также отсутствие обратной связи означает, что система не способна адаптироваться к изменяющимся условиям в реальном времени, что повышает риски снижения надёжности энергоснабжения.

Автоматизированное диспетчерское управление на базе SCADA для ТЭЦ и подключенной СЭС – этот метод использует SCADA-систему для автоматизации управления работой ТЭЦ и подключенной СЭС. SCADA — это система, которая позволяет в реальном времени отслеживать состояние объектов и оперативно вмешиваться в процесс работы, если требуется изменить режимы работы для повышения эффективности или безопасности. Такая система обеспечивает важную обратную связь, что позволяет оперативно реагировать на изменения внешней среды, например, на колебания температуры, облачность или изменение нагрузки на сеть. Внедрение SCADA позволяет повысить управляемость системой и сделать её более безопасной, обеспечивая возможность удаленного контроля за работой объектов. Тем не менее, внедрение SCADA-системы требует значительных финансовых затрат на установку датчиков, разработку программного обеспечения и обеспечение надёжной связи между объектами. Это может быть дорогим процессом, особенно на стадии расширения комплекса. Кроме того, система требует наличия квалифицированного персонала для её эксплуатации, а при расширении комплекса необходимо дорабатывать алгоритмы и программное обеспечение SCADA.

Оптимизационно-прогнозное управление комплексом ТЭЦ и СЭС на основе математической модели – этот метод ориентирован на использование математических моделей для прогнозирования работы солнечных электростанций и потребления энергии, что позволяет более эффективно оптимизировать взаимодействие между ТЭЦ и СЭС. Одним из ключевых преимуществ этого метода является возможность значительного снижения расхода топлива на ТЭЦ. Это достигается за счет того, что система заранее

учитывает солнечную генерацию и корректирует работу ТЭЦ в зависимости от прогноза потребления энергии. Такой подход помогает уменьшить зависимость от традиционных источников энергии, что снижает затраты на топливо и повышает экономическую эффективность всей системы. Кроме того, этот метод отличается хорошей программной реализуемостью. Он легко интегрируется в существующие системы, что упрощает процесс внедрения и эксплуатации. Использование специализированных программных решений, таких как SimInTech, способствует быстрой настройке и оптимизации системы в реальных условиях. Также важным преимуществом является наличие единого критерия для сравнения различных вариантов структуры и состава оборудования, что делает процесс проектирования и модернизации более структурированным и обоснованным. Однако, несмотря на все преимущества, метод имеет и определенные недостатки. Его эффективность зависит от точности прогнозов инсоляции (солнечной генерации) и потребления энергии. Неправильные или неточные прогнозы могут привести к ошибкам в расчетах, что повлияет на оптимизацию работы системы и повысит риски неэффективного использования ресурсов. Еще одной проблемой является сложность интеграции метода в уже существующие системы управления ТЭЦ и СЭС. Этот процесс требует значительных усилий, в том числе по адаптации оборудования и обучению персонала, что может увеличить время и затраты на внедрение. Таким образом, успешное применение метода зависит от точности прогнозов, правильной интеграции в существующие системы и подготовки специалистов для работы с новыми алгоритмами.

Интеллектуальная система интеграции ВИЭ в энергосистему ТЭЦ – интеллектуальные системы интеграции возобновляемых источников энергии позволяют адаптировать систему под изменяющиеся условия, такие как изменения состава генерации, выбросов и стоимости топлива. Это перспективный метод для дальнейшей цифровизации энергетических комплексов, особенно для распределённых и изолированных объектов. Однако внедрение таких систем требует значительных инвестиций в IT-инфраструктуру, каналы связи и разработку программного обеспечения. Это также связано с организационными трудностями, поскольку системы требуют сложной настройки и постоянной поддержки. В России на данный момент внедрение таких систем ограничено, что делает их внедрение в условиях неопределенности более рискованным. Несмотря на это, интеллектуальные системы являются перспективным направлением для дальнейшего развития энергетических технологий, особенно для распределённых и изолированных объектов.

Изложенный материал выше приведен в таблицу 1.

Таблица 1 – достоинства и недостатки различных способов управления.

№	Способы управления	Ф.И.О. учёных	Достоинства	Недостатки
1	Плановое (графиковое) управление совместной работой ТЭЦ и СЭС на основе заранее рассчитанных режимов	Суслов К.В.; Дорошин А.Н.	Простота внедрения в существующие АСУ ТП ТЭЦ; Высокая предсказуемость и надёжность теплоснабжения; Удобно для сравнения вариантов структуры комплекса в ВКР.	Не учитывает фактические колебания солнечной генерации и нагрузки; Отсутствует обратная связь.
2	Автоматизированное диспетчерское управление на базе SCADA для ТЭЦ и подключённой СЭС	Гурьянов Л.В.; Угреватов А.Ю.; Куликов А.Н.	Наличие обратной связи с объектами; Возможность оперативного изменения режимов ТЭЦ и СЭС при изменении погоды; Повышение безопасности и управляемости; Подходит для схемы «ТЭЦ + удалённая СЭС».	Повышенная стоимость внедрения (датчики, связь, ПО); Потребность в квалифицированном персонале; При расширении комплекса требуется доработка алгоритмов и SCADA.
3	Оптимизационно-прогнозное управление комплексом ТЭЦ и СЭС на основе математической модели	Лукутин Б.В.; Моргоева А.Д.	Снижение расхода топлива ТЭЦ за счёт учёта прогноза по СЭС и потреблению; Хорошая программная реализуемость SimInTech; Единый критерий для сравнения вариантов структуры и состава оборудования.	Требуются точные прогнозы инсоляции и нагрузки; Сложнее включить в действующую АСУ ТП без подготовки персонала.

Продолжение таблицы 1

№	Способы управления	Ф.И.О. учёных	Достоинства	Недостатки
4	Интеллектуальная система / цифровая платформа интеграции ВИЭ в энергосистему ТЭЦ	Филиппов С. П. Опадчий Ф. С.	Адаптируется к изменению состава генерации и критериям (топливо, выбросы, стоимость); Пригодна для распределённых и изолированных объектов; перспективна для дальнейшей цифровизации комплекса.	Высокая стоимость и организационная сложность; Высокие требования к ИТ-инфраструктуре и каналам связи; Мало реально внедрённых в РФ примеров.

Таким образом, в выборе оптимальной структуры и состава электротехнического комплекса, состоящего из тепло - солнечной электростанции и сравнение различных вариантов, необходимо использовать оптимизационно-прогнозное управление комплексом ТЭЦ и СЭС на основе математической модели это является целесообразным по причине того, что он позволяет существенно снизить расход топлива ТЭЦ. Это достигается благодаря учету прогнозов солнечной генерации и потребления энергии, что снижает затраты на топливо и повышает экономическую эффективность работы системы. Математическая модель также дает возможность более точно прогнозировать потребности в энергии, что способствует оптимальному балансированию работы ТЭЦ и СЭС, повышая их эффективность и надежность. Кроме того, этот метод хорошо интегрируется в существующие системы благодаря высокой программной реализуемости, что облегчает его внедрение и настройку. Использование специализированных программных решений, таких как SimInTech, упрощает процесс анализа и оптимизации. Дополнительным преимуществом является то, что метод предоставляет единый критерий для сравнения различных вариантов структуры и состава оборудования, что помогает принять обоснованные решения при проектировании и модернизации комплекса. Эти особенности делают метод оптимизационно-прогнозного управления особенно подходящим для современных комбинированных энергосистем.

Список литературы

1. Жидков В.А. Сравнительный анализ SCADA систем, применяемых в диспетчерских службах Белгородской энергосистемы // Электроэнергетика и автоматизация. 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-scada-sistem-primenyaemyh-v-dispatcherskih-sluzhbah-belgorodskoy-energосистемы> (дата обращения: 04.12.2025).

2. Мясоедов Ю.В. Разработка автоматизированных систем управления в электроэнергетике // Электроэнергетика и автоматика. 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-avtomatizirovannyh-sistem-upravleniya-v-elektroenergetike> (дата обращения: 06.12.2025).

3. Марченко О.В., Соломин С.В., Лебедев А.В. Математическое моделирование энергосистем с возобновляемыми источниками энергии // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 2(6). С. 57–64. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://isem.irk.ru/publications/article2017000004124/> (дата обращения: 10.12.2025).

4. Ершов Р.В. Оптимизация режимов энергосистем и электростанций // Электроэнергетика и автоматизация. 2025. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-rezhimov-energосистем-i-elektrostantsiy> (дата обращения: 14.12.2025).

5. Плетнёв Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. 4-е изд. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. С. 14–16. ISBN 978-5-903072-85-9.

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

**Соколов В.Ю., канд. техн. наук, доцент, Мицура Д.И.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

В соответствии с Федеральным законом от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» одной из ключевых задач государственной энергетической политики является повышение эффективности использования тепловой энергии в коммунальном секторе и обеспечение стабильного температурного режима в населённых пунктах. Закон устанавливает необходимость внедрения автоматизированных систем контроля и регулирования параметров теплоснабжения.

Современная практика эксплуатации городских теплосетей показывает, что значительная часть отклонений в температурных графиках возникает из-за недостаточного уровня автоматизации управления, что приводит к неравномерному распределению тепловой энергии, увеличению теплотерь и снижению качества теплоснабжения для потребителей. Внедрение автоматизированных систем управления позволяет повысить точность регулирования, обеспечить оперативную корректировку режимов и повысить эффективность работы всей городской энергосистемы. Анализ научно-технической литературы показал, что существующие исследования не в полном объеме охватывают вопросы разработки автоматизированных систем контроля и регулирования параметров теплоснабжения.

Поэтому, разработка автоматизированной системы управления температурным режимом города является актуальной и значимой задачей.

Цель работы: повысить энергетическую эффективность системы теплоснабжения за счёт совершенствования автоматизированных средств диспетчерского контроля, обеспечивающих мониторинг, анализ и оптимизацию параметров работы тепловых сетей в режиме реального времени.

Для достижения поставленной цели необходимо провести анализ научно-технической литературы в области повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения и автоматизации диспетчерского контроля.

В данной статье представлены результаты решения поставленной задачи.

Анализ научно-технической литературы в области «Повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения и автоматизации диспетчерского контроля» позволил условно выделить четыре группы методов исследования:

- Частное регулирование насосов.
- Погодозависимая автоматика (коррекция по T_a).
- АСУ котельных / SCADA – решения для теплоснабжения.

- Автоматизированный учет тепловой энергии (дистанционный учет).

Рассмотрим кратко каждый из них.

Частное регулирование насосов.

Частотное регулирование насосов основано на применении частотно-регулируемых приводов, позволяющих изменять производительность насосного оборудования в зависимости от текущей потребности тепловой сети. Данный подход обеспечивает существенную экономию электроэнергии за счёт снижения избыточных расходов, а также способствует плавному пуску и остановке насосов, что уменьшает их механический износ и повышает гидравлическую устойчивость системы.

Дополнительно использование частотно-регулируемых приводов позволяет снизить уровень шума и вибраций насосного оборудования, что положительно сказывается на условиях эксплуатации и сроке службы агрегатов. Данный метод наиболее эффективен в системах с переменной нагрузкой, где наблюдаются значительные колебания расхода теплоносителя в течение отопительного периода.

К недостаткам метода относятся высокая первоначальная стоимость частотных преобразователей, необходимость квалифицированной наладки и повышенная чувствительность оборудования к качеству электропитания.

Погодозависимая автоматика (коррекция по T_a).

Погодозависимая автоматика основана на автоматической корректировке параметров теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха. Применение данного подхода позволяет снизить перерасход тепловой энергии в периоды тёплой погоды и обеспечить поддержание допустимого температурного режима у потребителей. Относительная простота алгоритмов регулирования обуславливает возможность локального применения данного метода на отдельных участках систем теплоснабжения.

Кроме того, погодозависимая автоматика может использоваться в качестве вспомогательного инструмента для стабилизации температурного графика при стандартных режимах эксплуатации. На практике данный метод часто применяется в сочетании с другими средствами автоматизации, однако его самостоятельное использование не позволяет учитывать влияние внутренних и гидравлических факторов системы.

Вместе с тем функциональные возможности погодозависимой автоматики ограничены, поскольку она не учитывает комплексное состояние тепловых сетей и параметры работы оборудования в реальном времени. Эффективность данного метода существенно зависит от корректности настроек и надёжности измерительных датчиков, а при резких изменениях погодных условий его применение может не обеспечивать требуемой точности регулирования.

Автоматизированный учет тепловой энергии (дистанционный учет).

Автоматизированный дистанционный учёт тепловой энергии направлен на получение точных данных о фактическом потреблении тепла. Его внедрение способствует формированию справедливой системы тарификации и создаёт стимулы для энергосбережения со стороны потребителей. Кроме того,

получаемые данные могут использоваться для анализа тепловых потерь и оптимизации режимов работы системы теплоснабжения.

Наличие достоверной информации о потреблении тепловой энергии позволяет повысить прозрачность функционирования системы теплоснабжения и обоснованность принимаемых управленческих решений. Вместе с тем данный подход носит преимущественно аналитический характер и не обеспечивает непосредственного регулирования технологических процессов.

К ограничениям данного метода относятся затраты на приобретение и поверку приборов учёта, необходимость их интеграции в информационную инфраструктуру оператора, а также проблемы совместимости оборудования и качества передаваемых данных.

АСУ котельных / SCADA – решения для теплоснабжения.

Автоматизированные системы управления котельными и SCADA-решения занимают особое место среди рассмотренных методов повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения. В отличие от частных технических решений, ориентированных на оптимизацию отдельных элементов (таких как частотное регулирование насосов или погодозависимая автоматика), SCADA-системы обеспечивают комплексный подход к управлению, охватывающий источники тепла, тепловые сети и конечных потребителей.

Применение SCADA-решений позволяет осуществлять централизованный диспетчерский контроль, непрерывный сбор и анализ технологических параметров в режиме реального времени, а также оперативное выявление и устранение отклонений в работе оборудования. В отличие от систем автоматизированного учёта, которые в основном выполняют информационно-измерительные функции, SCADA-системы обеспечивают активное управление технологическими процессами и формируют основу для оптимизации режимов теплоснабжения.

Дополнительным преимуществом SCADA-систем является возможность интеграции с различными подсистемами автоматизации, включая частотно-регулируемые приводы, погодозависимую автоматику и системы коммерческого учёта. Это позволяет реализовать многоуровневое управление и обеспечить согласованную работу всех элементов системы теплоснабжения. Кроме того, накопление и анализ архивных данных создают предпосылки для внедрения прогнозных и интеллектуальных алгоритмов управления.

Таким образом, SCADA-системы не только интегрируют в себе функциональные возможности других методов, но и создают условия для их совместного применения, расширения и последующего внедрения интеллектуальных алгоритмов управления. Это позволяет рассматривать данный подход как наиболее перспективный с точки зрения повышения энергетической эффективности и надёжности систем теплоснабжения в целом.

Изложенное выше нами сведено в таблицу 1.

Таблица 1 - Достоинства и недостатки различных подходов к повышению энергоэффективности систем теплоснабжения на основе совершенствования автоматизации диспетчерского контроля

	Подход к повышению энергоэффективности систем теплоснабжения	Ф.И.О. ученых	Достоинства	Недостатки
1	Частотное регулирование насосов	Б.С.Лезнов Крылов В. А. Карандаев А. С.	<ul style="list-style-type: none"> • плавный пуск/остановка и снижение механического износа; • улучшение гидравлической устойчивости системы. 	<ul style="list-style-type: none"> • Первоначальная стоимость ЧП; • требуется квалифицированная наладка; • чувствительность к качеству электропитания.
2	Погодозависимая автоматика (коррекция по T_a)	Д.А.Самойлова	<ul style="list-style-type: none"> • Экономия топлива/тепла при «мягкой» погоде; • поддержание комфортного режима; 	<ul style="list-style-type: none"> • Требует корректной настройки и надёжных датчиков; • менее эффективна при резких погодных изменениях; • возможны ошибки при неверных коррекциях.
3	АСУ котельных / SCADA-решения для теплоснабжения	Г.Г.Голубенцева	<ul style="list-style-type: none"> • Централизованный контроль, сбор телеметрии, оперативное реагирование, снижение аварий; • обеспечивает основу для дальнейших интеллектуальных алгоритмов. • точные данные для анализа потерь и оптимизаций. 	<ul style="list-style-type: none"> • Высокие CAPEX/OPEX на внедрение; • необходимость интеграции киберзащиты и обучение персонала

4	Автоматизированный учёт тепловой энергии (дистанционный учёт)	Е.В. Швайковский	<ul style="list-style-type: none"> • Справедливая тарификация и стимул к энергосбережению у потребителей; • точные данные для анализа потерь и оптимизаций. 	<ul style="list-style-type: none"> • Затраты на приборы и их поверку; • необходимость интеграции в ИТ-инфраструктуру оператора; • вопросы совместимости и качества данных.
---	---	------------------	---	---

Таким образом, для решения поставленной задачи наиболее целесообразным является использование автоматизированных систем управления на базе SCADA-решений, поскольку они обеспечивают централизованный диспетчерский контроль, сбор и анализ параметров работы системы теплоснабжения в режиме реального времени, а также оперативное реагирование на отклонения и аварийные ситуации. Применение SCADA-систем позволяет перейти от локальных и разрозненных средств автоматизации к комплексному управлению системой теплоснабжения в целом.

Проведённый анализ научно-технической литературы показал, что рассмотренные методы повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения существенно различаются по своим функциональным возможностям и области применения. Частотное регулирование насосов, погодозависимая автоматика и автоматизированный учёт тепловой энергии эффективно решают отдельные задачи оптимизации, однако их применение в изолированном виде не обеспечивает необходимого уровня управляемости и адаптивности системы в условиях изменяющихся эксплуатационных и климатических факторов.

SCADA-системы, в свою очередь, обладают возможностью интеграции различных подсистем автоматизации и обеспечивают единое информационно-управляющее пространство. Это позволяет реализовать непрерывный мониторинг технологических параметров, анализ текущих и архивных данных, а также формирование управляющих воздействий с учётом комплексного состояния тепловых сетей и источников теплоснабжения. Накопление статистической информации создаёт предпосылки для внедрения прогнозных и интеллектуальных алгоритмов управления, направленных на дальнейшее повышение энергетической эффективности.

Следует отметить, что внедрение SCADA-решений способствует не только снижению эксплуатационных затрат и повышению надёжности функционирования систем теплоснабжения, но и улучшению качества предоставляемых коммунальных услуг. Это особенно актуально для городских тепловых сетей с разветвлённой структурой, где требуется оперативная координация работы большого числа объектов и потребителей.

Список литературы

1. Голубенцева Г. Г. Наблюдение за процессами теплоснабжения с помощью программы SCADA // Инженерия–XXI : материалы науч.-практ. конф. — Новороссийск : БГТУ, 2025. — С. 103–104. — URL: <https://bgtu-nvrsk.ru/uploads/673b386e78968doc1771484591/682c3413c6fd6.pdf>
2. Модернизация системы управления объектом теплоснабжения на основе SCADA-технологий // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Сер. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2025. — № 2. — С. 46–58. — URL: https://pureportal.spbu.ru/files/137271596/_2025.pdf
3. Гуськов И. И., Кузнецов А. В., Литвинов Д. С. Современные системы автоматизации котельных // Вестник молодых ученых Брянского государственного технического университета. — 2021. — № 1. — С. 48–53. — URL: <https://rio-nb-bstu.science/ojs/index.php/vestnik-molod/article/view/297>
4. Самойлова Д. А. Использование погодозависимой автоматики для энергоресурсосбережения // Современные научные исследования и инновации. — 2019. — № 4. — URL: <https://web.snauka.ru/issues/2019/04/89093>
5. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках : учеб. пособие. — М. : Энергоатомиздат, 2006. — 296 с. — URL: <https://nashol.biz/20230909156462/energoberejenie-i-reguliruemii-privod-v-nasosnih-i-vozduhoduwnih-ustanovkah-leznov-b-s-2006.html>
6. Мезенцева А. В. Исследование регулирования подачи насоса электрическим способом // Культура и безопасность. — 2020. — № 2. — С. 519–524. — URL: https://journals.eco-vector.com/kultura_nvsu/article/view/110670/ru_RU
7. Крылов В. А., Карандаев А. С., и др. Частотно-регулируемые электроприводы : учеб. пособие. — Ставрополь : СтГАУ, 2018. — 156 с. — URL: <https://bibl-stgau.ru/index.php/component/sppagebuilder/page/64>

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Соколов В.Ю., канд. техн. наук, доцент, Коротков В.В.

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Оренбургский Государственный Университет»

В соответствии с Федеральным законом от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» одной из ключевых задач государственной энергетической политики является повышение эффективности использования тепловой энергии в коммунальном секторе и обеспечение стабильного температурного режима в населённых пунктах. Закон устанавливает необходимость внедрения автоматизированных систем контроля и регулирования параметров теплоснабжения.

Современная практика эксплуатации городских теплосетей показывает, что значительная часть отклонений в температурных графиках возникает из-за недостаточного уровня автоматизации управления, что приводит к неравномерному распределению тепловой энергии, увеличению теплопотерь и снижению качества теплоснабжения для потребителей. Внедрение автоматизированных систем управления позволяет повысить точность регулирования, обеспечить оперативную корректировку режимов и повысить эффективность работы всей городской энергосистемы. Поэтому целью исследования является разработка автоматизированной системы управления температурным режимом района города.

Для достижения поставленной цели необходимо провести анализ научно-технической литературы в области управления температурным режимом городской среды.

В данной статье представлены результаты решения поставленной задачи.

Анализ научно – технической литературы в области управления температурным режимом городской среды позволил условно выделить четыре способа (метода) исследования:

1. Градостроительные и архитектурно-планировочные методы;
2. Пассивные климатические системы;
3. Активные (инженерные) системы;
4. Автоматизированные системы управления (АСУ).

Рассмотрим кратко каждый из них.

Градостроительные и архитектурно-планировочные методы.

Градостроительные и архитектурно-планировочные методы ориентированы на использование градостроительных решений для регулирования температурного режима в городской среде. Они включают продуманное расположение зданий с учётом розы ветров и солнечной инсоляции, формирование открытых и закрытых пространств, создание зелёных зон (парков, скверов, бульваров), а также организацию естественной

вентиляции за счёт природных источников. Данный метод позволяет существенно снижать потребность в активных системах кондиционирования и отопления, создавая комфортные условия для проживания. Главные его преимущества — долговременный экологический эффект, снижение энергопотребления города и низкие эксплуатационные расходы. Однако метод требует значительных капитальных вложений на стадии проектирования и строительства, отличается длительными сроками реализации и не позволяет оперативно реагировать на изменения внешних климатических условий. Кроме того, его сложно применять в условиях уже сложившейся плотной городской застройки.

Пассивные климатические системы.

Пассивные климатические системы используют природные процессы и явления для регулирования температуры внутри зданий и городских пространств. К таким системам относятся эффективная теплоизоляция ограждающих конструкций, естественная вентиляция, использование солнечной энергии через пассивный солнечный обогрев или защиту от перегрева, а также элементы, использующие конвекцию и тепловую инерцию материалов. Эти системы минимизируют потребность в активных источниках энергии, что приводит к снижению эксплуатационных расходов и уменьшению негативного воздействия на окружающую среду. Пассивные системы особенно эффективны в регионах с умеренным климатом. Их ключевые достоинства — энергонезависимость и низкие эксплуатационные расходы. Однако в условиях экстремально высоких или низких температур их эффективность заметно снижается. К недостаткам также относятся высокая начальная стоимость проектирования и монтажа, а также сильная зависимость эффективности работы от конкретных климатических условий местности.

Активные (инженерные) системы.

Активные (инженерные) системы представляют собой технические комплексы, непосредственно производящие, транспортирующие и распределяющие тепловую энергию для поддержания стабильной температуры. К ним относятся системы центрального и автономного отопления, кондиционирования, чиллер-фанкойлы и другие инженерные решения. Эти системы обеспечивают точное и эффективное управление тепловым режимом, что особенно важно, когда необходимо быстро реагировать на изменения внешней температуры. Их главными преимуществами являются высокая мощность, точность поддержания заданных параметров, независимость от внешних климатических условий и относительная быстрота внедрения на объект. Основные недостатки связаны с высоким энергопотреблением, значительными эксплуатационными затратами и зависимостью от бесперебойного снабжения энергоресурсами.

Автоматизированные системы управления (АСУ).

Автоматизированные системы управления (АСУ) используют интеллектуальные технологии и средства автоматизации для контроля и регулирования температуры в зданиях и инженерных сетях. Эти системы на

основе данных от датчиков (температуры, влажности, освещённости и др.) автоматически управляют работой активного оборудования, оптимизируя его режимы. АСУ обеспечивают точное поддержание заданных параметров микроклимата, что способствует значительной экономии энергоресурсов и снижению затрат. Их достоинства включают точность поддержания заданных параметров, экономию энергоресурсов за счёт оптимизации и возможность дистанционного контроля и управления. Недостатками являются высокая сложность и стоимость оборудования, необходимость квалифицированного обслуживания, а также риски, связанные с возможными сбоями в программном обеспечении или аппаратной части, что может привести к снижению эффективности или нарушению работы всей системы.

Изложенное выше нами сведено в таблицу 1.

Таблица 1 – Анализ НТЛ в области управления температурным режимом городской среды

	Способы (методы) управления температурным режимом	Ф.И.О. ученых	Достоинства	Недостатки
1	Градостроительные и архитектурно-планировочные методы	Е.А. Сухина А.О. Сырдыкова	– Масштабность; – Снижение энергопотребления города.	– Высокая стоимость и длительные сроки реализации; – Невозможность быстрого изменения сложившейся застройки.
2	Пассивные климатические системы	В.В. Беляева С.В. Корниенко	– Энергонезависимость; – Низкие эксплуатационные расходы.	– Ограниченная эффективность в экстремальных условиях; – Высокая начальная стоимость; – Зависимость от климата.
3	Активные (инженерные) системы	О.Ю. Марьясин А.В. Карпенко	– Высокая мощность и точность; – Независимость от внешних условий; – Быстрота внедрения на объект.	– Высокое энергопотребление; – Эксплуатационные затраты

Продолжение таблицы 1

	Способы (методы) управления температурным режимом	Ф.И.О. ученых	Достоинства	Недостатки
4	Автоматизированные системы управления (АСУ)	Б.С. Лезнов В.А. Крылов	– Экономия энергоресурсов; – Возможность дистанционного контроля.	– Сложность и стоимость оборудования; – Риск сбоев.

Таким образом, активные (инженерные системы) представляют собой оптимальный метод управления температурным режимом в системах теплоснабжения, обеспечивая точный, стабильный и независимый от внешних условий контроль микроклимата. Несмотря на присущие им высокие эксплуатационные затраты и значительное энергопотребление, эти недостатки эффективно компенсируются при интеграции с автоматизированными системами управления (АСУ). Совместное использование активных систем и АСУ позволяет достичь максимальной энергоэффективности, гибкости и надёжности, что делает данный комплексный подход наиболее рациональным решением для обеспечения комфортной городской среды в условиях меняющегося климата.

Список литературы

1. Сухина Е.А. Формирование энергосберегающей архитектурно-градостроительной среды с учётом требований экологических стандартов // Архитектура и устойчивое строительство. 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-energoberegayuschey-arhitekturno-gradostroitelnoy-sredy-na-osnove-ekologicheskikh-standartov>
2. Сардыкова А.О. Особенности формирования архитектурной среды энергоэффективного пассивного жилья // Энергоэффективное строительство. 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-arhitekturnoy-sredy-energoeffektivnogo-passivnogo-zhilya>
3. Корниенко С. В., Попова Е. Д. «Зеленое» строительство в России и за рубежом // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2017. — № 4 (55). — С. 70–82. — [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://esg-library.mgimo.ru/upload/iblock/e2f/haqa5dnc36vyzj22lnkwwew3jli3ntw0/5_kornienko_55.pdf
4. Беляева Е. Л. Биоклиматическая комфортность и условия градостроительного развития, благоустройство и озеленение // Строительство и архитектура. — 2024. — [Электронный ресурс]. Режим доступа:

cyberleninka.ru/article/n/bioklimaticheskaya-komfortnost-i-usloviya-gradostroitel'nogo-razvitiya-blagoustroystva-i-ozeleneniya

5. Марьясин О.Ю. Управление тепловым режимом зданий с использованием прогнозирующих моделей // Энергосбережение и микроклимат. 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-teplovym-rezhimom-zdaniy-s-ispolzovaniem-prognoziruuyuschih-modeley>

6. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках : учеб. пособие. — М. : Энергоатомиздат, 2006. — 296 с. — URL: <https://nashol.biz/20230909156462/energoberejenie-i-reguliruemii-privod-v-nasosnih-i-vozduhoduwnih-ustanovkah-leznov-b-s-2006.html>

7. Крылов В. А., Карандаев А. С., и др. Частотно-регулируемые электроприводы : учеб. пособие. — Ставрополь : СтГАУ, 2018. — 156 с. — URL: <https://bibl-stgau.ru/index.php/component/sppagebuilder/page/64>

8. Карпенко А.В. Обзор моделей управления микроклиматом в помещении // Автоматизированные системы управления. 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-modeley-upravleniya-mikroklimate-v-pomeschenii>

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Сорокин М.А., Косенко А.Д. канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Разработка автоматизированной системы оценки состояния силовых трансформаторов

Надежность электроэнергетических систем в значительной степени определяется работоспособностью их наиболее критичных и уязвимых элементов. К таким элементам относятся вводы силовых трансформаторов - устройства, обеспечивающие электрическое соединение обмоток трансформатора с воздушными или кабельными линиями. Статистика отказов показывает, что вводы являются одной из основных причин аварийных отключений силовых трансформаторов, что приводит к масштабным перерывам электроснабжения, значительным экономическим убыткам и рискам для персонала. Актуальность разработки автоматизированной системы для их непрерывной диагностики обоснована жесткими требованиями современных нормативно-правовых и технических документов Российской Федерации. Во-первых, стратегическим драйвером является Федеральный закон от 13.07.2024 №185-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике»» [7]. Этот закон устанавливает правовую основу для перехода к интеллектуальной энергетике, предписывая внедрение цифровых технологий, систем дистанционного контроля и предиктивной аналитики для управления объектами электроэнергетики. Разработка автоматизированной системы мониторинга вводов, как критического узла, является прямым исполнением данного закона. Также в качестве второй правовой основы выступают «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей», утвержденные приказом Минэнерго России от 13 января 2003 г. Данные правила обязывают проводить диагностирование электрооборудования, включая его силовые части и изоляцию, для оценки состояния и выявления дефектов. Для вводов это подразумевает регулярный контроль частичных разрядов, тангенса угла диэлектрических потерь, емкости и тока утечки, нагрева их элементов и различный прочий контроль. Таким образом, автоматизированная система оценки состояния является эффективным способом выполнения этих требований, обеспечивая постоянный мониторинг. Внедрение подобной системы позволит улучшить диагностику вводов и уменьшить возможные ошибки при мониторинге их состояния. Однако такое направление как анализ термограмм является недостаточно изученной областью.

Изученная нормативная документация, научные публикации и коммерческие предложения показывают, что вопросы создания специализированного автоматизированного ПО остаются недостаточно проработанными, так как большинство существующих решений ориентировано на периодическую диагностику силами персонала. Существует множество способов диагностики вводов, но не все они способны предоставить оптимальные, точные и, что не маловажно, осуществимые в реальных условиях результаты. Таким образом, при изучении данной тематики были выбраны четыре основных способа для их сравнения и выбора оптимального способа.

1. Визуальный контроль. Является самым простым в реализации и самым «бюджетным». Суть данного метода заключается в том, что в дополнительные обязанности работника входят: обход и осмотр оборудования на предмет видимых повреждений, таких как трещины, сколы, следы копоти или утечки масла. Для его проведения требуется хорошее освещение, безопасный доступ к оборудованию и благоприятные погодные условия.

Достоинства:

- Возможность осмотра при любых погодных условиях.
- Невысокая стоимость.
- Возможность осмотра любым работником из числа оперативного персонала.
- Возможность проведения оценки состояния оборудования в процессе его эксплуатации.

Недостатки:

- Невозможно определить дефект на его ранней или промежуточной стадии развития.
- Сниженный уровень безопасности персонала.
- Наличие человеческого фактора. Возможность обнаружения дефектов сильно зависит от опыта работника.

2. Термографический контроль [4,5,6]. Более затратный метод, для его реализации требуется специально обученный персонал, а также специальное оборудование, однако в сравнении с простым визуальным осмотром способен определить большее количество дефектов на раннем или промежуточном этапе их развития. Является пассивным, основан на фиксации инфракрасного излучения для выявления аномальных температурных полей на поверхности ввода. Его работа состоит в регистрации тепловизором распределения температуры и анализе локальных перегревов. Условиями для успешного применения служат достаточная нагрузка на трансформаторе, стабильный режим работы до измерения, отсутствие прямых солнечных лучей и определенные температурные рамки. К нюансам можно отнести влияние излучательной способности поверхности на точность, необходимость корректировки данных, неспособность выявлять внутренние дефекты без их теплового проявления.

Достоинства:

- Возможность диагностики дефектов на раннем этапе;

- Возможность локализации дефектов;
- Возможность проведения оценки состояния оборудования в процессе его эксплуатации.

Недостатки:

- Высокая стоимость;
- Требуется наличие специально обученного персонала и специального оборудования;
- Сильное влияние погодных условий.

3. Акустический контроль [2]. Ультразвуковой метод представляет собой активный способ контроля, основанный на регистрации акустических сигналов, которые возникают при частичных разрядах и механических дефектах внутри изоляции ввода. Его принцип работы заключается в направлении ультразвукового датчика на диагностируемый объект с последующим анализом усиленных и преобразованных сигналов. Для применения этого метода необходимо наличие рабочего напряжения на оборудовании, определенные ограничения по влажности, отсутствие сильных осадков и ветра. Метод эффективен только для уже развивающихся повреждений.

Достоинства:

- Диагностирует внутренние дефекты. Может осуществлять прямое измерение толщины, обнаружение трещин, расслоений, коррозии внутри материала;
- Высокая точность;
- Возможность проведения оценки состояния оборудования в процессе его эксплуатации.

Недостатки:

- Требуется наличие специально обученного персонала и специального оборудования;
- Неустойчивость к помехам, которые препятствуют распространению ультразвука;
- Не определяет причину и степень дефекта.

4. Комплексный метод [3]. Метод, основанный на анализе данных искусственным интеллектом [1], объединяет нейросети для автоматического обнаружения вводов на изображениях, извлечения глубоких признаков из термограмм, классификации состояния и построения оптимальных «программ» обработки данных. Принцип его работы представляет собой последовательную цепочку от детекции объекта до выдачи заключения о техническом состоянии. Является самым дорогим в реализации, но в тоже время и самым точным. Позволяет автоматизировать процесс при помощи современных технологий, например таких как искусственный интеллект. При малом количестве входных данных возможно определить дефект более точно, при достаточном же количестве данных - спрогнозировать его развитие.

Достоинства:

- Возможность автоматизации процессов;
- Скорость обработки информации;

- Возможность прогнозирования развития дефектов;
- Независимость от погодных условий;
- Гибкость и простота модификации;
- Самая высокая точность;
- Безопасность.

Недостатки:

- Требуется наличие специально обученного персонала и специального оборудования;
- Самый затратный метод.

Для удобства методы и их преимущества и недостатки были сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Методы, их преимущества и недостатки

Метод	Преимущества	Недостатки
Визуальный контроль	<ul style="list-style-type: none"> - Возможность осмотра при любых погодных условиях. - Невысокая стоимость. - Возможность осмотра любым работником из числа оперативного персонала. - Возможность проведения оценки состояния оборудования в процессе его эксплуатации. 	<ul style="list-style-type: none"> - Невозможно определить дефект на его ранней или промежуточной стадии развития. - Сниженный уровень безопасности персонала. - Наличие человеческого фактора. Возможность обнаружения дефектов сильно зависит от опыта работника.
Термографический контроль	<ul style="list-style-type: none"> - Возможность диагностики дефектов на раннем этапе. - Возможность локализации дефектов. - Возможность проведения оценки состояния оборудования в процессе его эксплуатации. 	<ul style="list-style-type: none"> - Высокая стоимость - Требуется наличие специально обученного персонала и специального оборудования - Сильное влияние погодных условий.
Комплексный метод, основанный на анализе данных искусственным интеллектом	<ul style="list-style-type: none"> - Возможность автоматизации процессов - Скорость обработки информации - Возможность прогнозирования развития дефектов - Независимость от погодных условий - Гибкость и простота модификации - Самая высокая точность - Безопасность 	<ul style="list-style-type: none"> - Требуется наличие специально обученного персонала и специального оборудования - Самый затратный метод

<p>Акустический контроль</p>	<p>- Диагностирует внутренние дефекты. Может осуществлять прямое измерение толщины, обнаружение трещин, расслоений, коррозии внутри материала. - Высокая точность. - Возможность проведения оценки состояния оборудования в процессе его эксплуатации.</p>	<p>- Требуется наличие специально обученного персонала и специального оборудования - Неустойчивость к помехам, которые препятствуют распространению ультразвука. - Не определяет причину и степень дефекта</p>
------------------------------	--	--

Проведённый анализ методов диагностики выявил принципиальные недостатки стандартных подходов. Визуальный контроль - простой и дешёвый, но не способен выявить внутренние или развивающиеся дефекты, а его результаты полностью зависят от опыта персонала. Термографический контроль более информативен, однако требует специально обученных специалистов, а его точность критически зависит от внешних условий (нагрузки, погоды, излучательной способности поверхности). Акустический (ультразвуковой) метод также требует высокой квалификации оператора, подвержен помехам и эффективен лишь для уже сформировавшихся повреждений.

Комплексный метод лишен данных недостатков. Его основная цель - повышение точности диагностики за счёт интеллектуальной обработки данных, в первую очередь термограмм. Этот подход позволяет минимизировать субъективные погрешности при анализе тепловизионных снимков, исключить влияние человеческого фактора на этапе интерпретации результатов и сформировать объективную оценку состояния на основе комплексного анализа параметров. Таким образом, применение комплексного метода, сфокусированного на глубокой программной обработке тепловизионной информации, создаёт основу для разработки эффективного инструмента, обеспечивающего раннее и достоверное выявление дефектов вводов силовых трансформаторов.

Список литературы

1. Сухачев И. С., Шеломенцев В. А., Хмара Г. А., Сидоров С. В., Попов Е. И., Швецова А. А. Идентификация состояния силовых трансформаторов 110(35)/10 кВ на основе анализа данных тепловизионного обследования и методов искусственного интеллекта // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 2. Т. 20. С. 22-36. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-2-22-36>.

2. Рощупкин М.Д. Разработка методики акустической диагностики электрических разрядов в силовых и измерительных трансформаторах : диссертация кандидата технических наук : 05.14.12 / Рощупкин Михаил

Дмитриевич; [Место защиты: Нац. исслед. ун-т МЭИ].- Москва, 2011.- 159 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/3365

3. Косенко А. Д., Система автоматизированной обработки результатов тепловизионной диагностики электрооборудования / А. Д. Косенко, В. А. Величко, А. А. Косенко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 4. С. 324–342. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-324-342>

4. Бажанов С. А., Тепловизионный контроль электрооборудования в экс плуатации (Часть 1) М.: НТФ "Энергопрогресс", 2005. 80 с.; ил. [Библиотечка электротехника, приложениекжур налу "Энергетик". Вып. 5 (77)].

5. Zou, H., & Huang, F. A novel intelligent fault diagnosis method for electrical equipment using infrared thermography. *Infrared Phys. Technol.*, 73, 29–35. 2015

<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2015.08.006>

6. Ещенко Д.В., Никитин А.Т., Белов О.А. Практическое применение методов тепловизионного анализа и контроля // Вестник Камчатского государственного технического университета. –2020. – № 54. – С. 6–19.

7. Федеральный закон от 13.07.2024 №185-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон "Об электроэнергетике"». https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_480728/

АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОРИЕНТАЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ

**Токжанов Е.Е., Митрофанов С.В. канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Актуальность темы исследования обусловлена стратегическим курсом Российской Федерации на развитие возобновляемой энергетики, технологический суверенитет и соблюдение принципа энергосбережения, закреплённого в Федеральном законе № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» [1]. Этот закон устанавливает императив минимизации энергопотерь для всех участников рынка, включая генерирующее оборудование. В контексте солнечной энергетики системы ориентации (трекеры), повышающие выработку панелей, сами являются потребителями энергии, что зачастую снижает их общую эффективность. Глобальный энергетический переход к низкоуглеродной экономике и насущная необходимость обеспечения технологического суверенитета в сфере критической инфраструктуры формируют устойчивый запрос на развитие возобновляемой энергетики в Российской Федерации. В частности, солнечная генерация, обладающая значительным потенциалом в ряде регионов страны, является одним из стратегически важных направлений. Её развитие регулируется комплексом программных документов и законодательных актов, среди которых Постановление Правительства № 449 от 28.05.2013 «Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» [2] и программа поддержки ВИЭ на оптовом рынке (ДПМ ВИЭ). Помимо крупной генерации, государственная политика активно стимулирует развитие малой распределенной энергетики. Федеральный закон № 471-ФЗ от 27.12.2019 «О внесении изменений в Федеральный закон "Об электроэнергетике" в части развития микрогенерации» [3] создал правовые основы для «зеленого» тарифа и упрощенного подключения объектов микрогенерации к сетям. Для домохозяйств и малого бизнеса, устанавливающих солнечные панели на крышах, вопрос энергетической рентабельности и автономности является ключевым. Разрабатываемая система ориентации, обладающая минимальным собственным энергопотреблением, идеально вписывается в эту парадигму, позволяя владельцу получать максимум энергии без значительных дополнительных затрат на эксплуатацию системы слежения.

Таким образом, целью исследования является: разработка энергоэффективной системы слежения, обеспечивающей чистый прирост генерации, представляющей собой не только техническую задачу, но и прямое

соответствие требованиям государственной политики в области энергосбережения, экологии и внедрения микрогенерации.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить системный анализ различных типов трекеров и подходов к повышению энергоэффективности солнечных станций с помощью устройств слежения за солнцем. Этому и посвящена данная статья.

Анализ научно-технической литературы позволил выделить четыре типа трекеров и подходов к повышению энергоэффективности фотоэлектрических панелей:

1. Одноосные горизонтальные трекеры (HSAT). Это система слежения за солнцем, у которой ось вращения расположена горизонтально и параллельно земле (обычно в направлении север-юг). Панели, закрепленные на этой оси, вращаются с востока на запад в течение дня, постоянно поворачиваясь к солнцу.

Это самый распространенный тип трекеров в мире для крупных солнечных электростанций (СЭС) благодаря оптимальному балансу стоимости, производительности и надежности.

Принцип работы и ключевые особенности: ось вращения - горизонтальная, ориентирована с севера на юг. Бывает одна общая ось на длинный ряд панелей.

Независимые приводы на каждую стойку или группу. Движение: трекер следует за азимутом солнца (его положением вдоль горизонта). Угол наклона панелей относительно земли (угол наклона) обычно фиксирован (например, 0° для плоско-горизонтальных или заданный угол для повышения зимней выработки). В продвинутых моделях угол наклона может корректироваться сезонно (вручную или автоматически).

Привод: электрический линейный актуатор или мотор-редуктор, управляемый контроллером. Контроллер использует: алгоритмическое слежение (расчет положения солнца по времени, координатам, дате). Датчики освещенности (фотодиоды) для коррекции в пасмурную погоду или утром. Гибридный метод (алгоритм + датчики) — наиболее точный.

Конструкция: Длинные ряды (до 150-200 метров) панелей, смонтированных на металлической конструкции с центральной балкой-осью. Ряды расположены с достаточным интервалом, чтобы не затенять друг друга в утренние и вечерние часы.

Достоинства: простая и отработанная конструкция. Технология широко используется, надёжна и предсказуема; Высокая эффективность летом. В период высокого солнцестояния обеспечивают максимальный прирост генерации; Низкая стоимость установки и эксплуатации. Минимальные капитальные и операционные затраты по сравнению с другими типами.

Недостатки: требует идеально ровной площадки. Не подходит для сложного рельефа; Сильное накопление снега и грязи. Горизонтальное расположение способствует загрязнению поверхности; Низкая зимняя эффективность. Потеря до 40% выработки в зимний период из-за низкого угла

солнца; Высокие ветровые нагрузки. Большая парусность конструкции повышает риск повреждений.

Данный тип используют на крупных наземных солнечных электростанциях (СЭС) в регионах с низкими широтами (близких к экватору) или с высоким уровнем инсоляции и ровным рельефом.

2. Одноосные вертикальные трекары (VSAT). Это система слежения за солнцем, в которой ряды солнечных модулей вращаются вокруг вертикальной оси, установленной перпендикулярно земле. В отличие от распространенных горизонтальных одноосных трекаров (HSAT), которые наклоняют панели с востока на запад, VSAT поворачивает всю конструкцию, как карусель, следуя за азимутом солнца в течение дня.

Ключевая особенность: Ось вращения — вертикальная. Угол наклона модулей при этом фиксирован (обычно в пределах 5-15°) и оптимизирован под широту местности.

Конструкция: Основной элемент — это стальная колонна (столб), глубоко забетонированная в грунт. К этой колонне крепится балка (торсион), на которой рядами устанавливаются солнечные модули. Вся эта "вертушка" приводится в движение электродвигателем с редуктором.

Алгоритм работы: Контроллер, получающий данные от датчиков или по астрономическому алгоритму, дает команду двигателю поворачивать массив модулей так, чтобы они были перпендикулярны солнцу в проекции на горизонтальную плоскость. Утром панели смотрят на восток, в полдень — на юг (в Северном полушарии), вечером — на запад.

Угол наклона: Это фиксированный параметр, задаваемый при монтаже. Его выбирают для компромисса между прямой радиацией зимой (большой угол) и летом (меньший угол), а также для улучшения самоочищения от снега и пыли.

Достоинства: установка на сложном рельефе. Не требуют выравнивания площадки; Устойчивость к боковым ветрам. Конструкция менее подвержена ветровым нагрузкам; Простота обслуживания. Минимальные требования к техническому обслуживанию; Естественный сход осадков. Вертикальный наклон способствует очистке поверхности.

Недостатки: невысокий прирост эффективности. Всего 15–20% по сравнению со статичными панелями; Большая занимаемая площадь. Требуют на 30% больше места; Неэффективны в высоких широтах. Малоэффективны в полярных регионах.

Такой тип трекаров является доминирующим в регионах с неидеальным рельефом, сильными боковыми ветрами и обильными осадками (снегом, пылью), таких, как Оренбург.

3. Одноосные наклонные трекары (TSAT)– Это система слежения за солнцем, у которой ось вращения наклонена относительно горизонта (обычно под фиксированным углом, близким к широте местности). Панели, закрепленные на этой наклонной оси, вращаются, следуя за солнцем, что

позволяет эффективно отслеживать и азимут, и, в некоторой степени, высоту солнца в течение года.

TSAT часто называют "следующим поколением" классических горизонтальных трекеров (HSAT) и рассматривают как более совершенную и эффективную альтернативу для многих регионов.

Принцип работы и ключевые особенности: ось вращения - наклонная, ориентирована в направлении север-юг. Угол наклона оси является фиксированным параметром конструкции и оптимизируется под широту местности (часто равен или близок к ней). Это главное конструктивное отличие от HSAT.

Движение: аналогично HSAT, трекер вращается с востока на запад, следуя за азимутом солнца. Однако благодаря наклону оси, угол панелей к солнцу меняется не только в течение дня, но и эффективнее в течение года. Летом, когда солнце высоко, панели "видят" его под хорошим углом. Зимой, при низком солнце, наклон оси изначально более благоприятен для его захвата.

Конструкция: Более сложная, чем у HSAT. Наклонная ось требует: разновысоких опор: Северная стойка (в Северном полушарии) значительно выше южной, чтобы создать нужный угол; Усиленной механики - из-за асимметрии нагрузки и большего плеча рычага; более точного расчета нагрузок, особенно ветровых и снеговых.

Управление: использует такие же контроллеры и алгоритмы (время/координаты + датчики), что и HSAT.

Достоинства: равномерная годовая выработка. Эффективны как летом, так и зимой; Лучшее улавливание низкого зимнего солнца. Конструкция максимизирует генерацию в холодный период; Естественный сход снега. Наклон способствует самоочищению панелей.

Недостатки: высокая стоимость. На 15–20% дороже горизонтальных систем; Риск взаимного затенения. Требуется точный расчёт межрядного расстояния; Сложность монтажа. Необходима точная установка угла наклона; Ограниченная адаптивность. Наклон оси фиксирован и не регулируется в реальном времени.

Этот тип трекеров особо полезен в регионах с ярко выраженной сезонностью и умеренными широтами, где важно эффективно улавливать низкое зимнее солнце.

4. Двухосные трекеры – Это система, которая отслеживает положение солнца по двум осям вращения, обеспечивая перпендикулярность панелей солнечным лучам в каждый момент времени. Она следует как за азимутом (движением солнца по горизонту с востока на запад), так и за высотой (изменением угла подъема солнца над горизонтом в течение дня и года).

Это самый точный, но и самый сложный тип трекеров, обеспечивающий максимально возможную генерацию с единицы площади панелей.

Принцип работы и типы конструкций:

Существует две основные архитектуры двухосного слежения:
1. Азимутальная (Polar / Altitude-Azimuth): ось 1 (Высота / Altitude): Отвечает за

наклон панели вверх-вниз, чтобы следить за высотой солнца; ось 2 (Азимут / Azimuth): Отвечает за вращение всей конструкции по горизонтали (на 360°), следуя за азимутом солнца..

2. Наклонно-поворотная (Tilt-and-Roll): ось 1 (Наклон / Primary Tilt): Центральная опора или балка, вокруг которой вращается вся рама с панелями (слежение за высотой солнца); ось 2 (Поворот / Secondary Rotation): Вращение самих панелей или подрамников вокруг их продольной оси (слежение за азимутом).

По типу установки также делятся на: индивидуальные (штучные) - один трекер на одну или несколько панелей (до ~20 кВт). Чаще для домов, телекоммуникационных вышек.

Колонные (центральные): Большая группа панелей (десятки кВт) смонтирована на одной центральной опоре. Нужна большая свободная площадь.

Каркасные (многоопорные): Десятки панелей на одной раме, установленной на нескольких опорах. Для промышленных СЭС.

Достоинства: круглогодичная стабильность. Эффективны в любое время года и на любых широтах; Универсальность. Подходят для любых климатических и географических условий; Возможность работы с концентраторами. Могут использоваться в гибридных системах.

Недостатки: высокая стоимость. Капитальные затраты на 50–100% выше, чем у одноосных систем; Сложность обслуживания. Требуют регулярного технического обслуживания и ремонта; Большая занимаемая площадь. Требуют на 40% больше пространства, чем одноосные вертикальные трекеры (VSAT); Высокие эксплуатационные затраты. Энергопотребление и износ механизмов значительны.

Данный тип трекеров используется, где требуется максимальная генерация энергии и есть ограниченное пространство (дачи, частные дома, регионы с переменчивой инсоляцией), так как они обеспечивают наибольшую эффективность, следуя за солнцем по двум осям (азимуту и зениту), что оптимально для небольших, но высокоэффективных СЭС

Результаты проведенного анализа представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Достоинства и недостатки различных подходов к повышению энергоэффективности солнечных станций с помощью устройств слежения за солнцем.

Технология/ тип трекеров	Ф.И.О. ученых	Достоинства	Недостатки
Одноосные горизонтальные (HSAT)	Д. Принслоу, Р.Добсон	<ul style="list-style-type: none"> • Простая и отработанная конструкция • Высокая эффективность летом • Низкая стоимость установки 	<ul style="list-style-type: none"> • Требуется идеально ровной площадки • Сильное накопление снега и грязи • Потеря до 40% эффективности зимой

			<ul style="list-style-type: none"> • Высокие ветровые нагрузки
Одноосные наклонные (TSAT)	Т. Хатиб В. Эльменрайх	<ul style="list-style-type: none"> • Равномерная годовая выработка • Лучшее улавливание низкого зимнего солнца • Естественный сход снега 	<ul style="list-style-type: none"> • На 15-20% дороже HSAT • Сильный риск взаимного затенения • Сложная установка и выравнивание • Ограниченная регулировка угла
Одноосные вертикальные (VSAT)	С.В. Митрофанов	<ul style="list-style-type: none"> • Установка на склонах и неровном рельефе • Устойчивость к боковым ветрам • Простота обслуживания • Минимальная подготовка площадки 	<ul style="list-style-type: none"> • Прирост эффективности всего 15-20% • Требуется на 30% больше площади • Полная неэффективность в полярных регионах
Двухосные	Д. Даффи А. Бекман	<ul style="list-style-type: none"> • Стабильная генерация круглый год • Универсальность для любых широт • Возможность работы с концентраторами 	<ul style="list-style-type: none"> • Капитальные затраты на 50-100% выше одноосных • Эксплуатационные затраты в 2-3 раза выше • На 40% больше занимаемой площади • Сложный ремонт и обслуживание

Таким образом, для условий Оренбургской области обоснованным выбором являются одноосные вертикальные трекеры (VSAT), так как они наиболее адекватно соответствуют ключевым региональным особенностям — устойчивости к сильным ветрам, способности работать на неидеальном рельефе и обеспечению естественного схода снега. Однако для создания максимально энергоэффективной и адаптивной системы слежения её необходимо дополнить методами интеллектуального управления (на этапе эксплуатации) и оптимизации угла наклона (на этапе проектирования). Это позволяет преодолеть ключевой недостаток VSAT — относительно умеренный прирост эффективности, превращая систему в надежный, экономичный и низкочередной в обслуживании инструмент повышения выработки солнечной электростанции.

Список литературы

1. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 18.07.2024) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности».
2. Постановление Правительства РФ от 28.05.2013 № 449 «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года».

3. Федеральный закон от 27.12.2019 № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон "Об электроэнергетике" в части развития микрогенерации».
4. Даффи Д., Бекман А. Сравнительный анализ эффективности двухосных и одноосных солнечных трекеров // *Solar Energy*. – 2020. – Vol. 208. – P. 31–40.
5. Принслоу Д., Добсон Р. Эффективность горизонтальных одноосных трекеров в условиях умеренного климата // *Вестник возобновляемой энергетики*. – 2021. – № 4. – С. 45–52.
6. Хатиб Т., Эльменрайх В. Сезонная оптимизация выработки энергии с использованием наклонных одноосных систем слежения // *International Journal of Sustainable Energy*. – 2022. – Vol. 41, No. 3. – P. 210–225.
7. Митрофанов С.В. Определение оптимального положения солнечных панелей с целью снижения затрат на их поворот. – Оренбург: ОГУ, 2023.

ТЕХНОЦЕНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ СТРУКТУРНО-ВИДОВОЙ СБАЛАНСИРОВАННОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ЗАВОДА

Туктамышев Р.И., Влацкая Л.А., канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Современные промышленные предприятия представляют собой сложные энерготехнологические системы, основным оборудованием которых являются асинхронные электродвигатели (ЭД) – на их долю приходится до 70 % промышленного потребления электроэнергии. Вопросы рационального подбора, эксплуатации и обновления их парка имеют стратегическое значение для надёжности, энергоэффективности работы предприятия и снижения эксплуатационных затрат [1].

На практике структура парка электродвигателей часто не сбалансирована. Наблюдается избыточное дублирование моделей ЭД, приводящее к риску «группового» отказа, и как следствие увеличению затрат на их ремонт; использование устаревших двигателей с низким КПД, обуславливающее повышение потерь электроэнергии и снижение энергоэффективности работы предприятия в целом; а также отсутствие унификации, способствующее росту затрат на их обслуживание [2]. Традиционные методы анализа установленного и эксплуатируемого на предприятиях электрооборудования (по моделям, сроку службы) не позволяют выявлять структурно-видовые диспропорции. В отличие от них, техноценологический подход позволяет анализировать электрооборудование как целостную систему – техноценоз, где каждый элемент выполняет определённую функцию [2, 3].

В работе предложен алгоритм оценки структурно-видовой сбалансированности установленных на химическом заводе электродвигателей с применением теории техноценозов, одним из основных аспектов которой является построение ранговых Н-распределений. Алгоритм включает пять этапов:

- 1) Формирование базы данных электродвигателей.
- 2) Построение табулированного (ранжированного) распределения.
- 3) Проверка соответствия полученного распределения критериям Н-распределения.
- 4) Математическая обработка рангово-видового и видового распределений.
- 5) Оценка структурно-видовой сбалансированности парка электродвигателей.

Рассмотрим подробнее каждый из этапов.

Этап 1. Формирование базы данных электродвигателей. На этом этапе составляется полный перечень всех установленных на предприятии ЭД и выбирается видообразующий параметр.

Для кластера «электродвигатели» в качестве ключевого (видообразующего) параметра принимается номинальная мощность, выраженная в киловаттах (кВт). Именно мощность определяет функциональную принадлежность двигателя к тому или иному технологическому процессу, влияет на энергопотребление и эксплуатационные характеристики. В контексте рассматриваемой задачи под видом понимается совокупность двигателей с одинаковой номинальной мощностью (например, 5,5 кВт, 11 кВт, 30 кВт и т. д.).

Этап 2. Построение табулированного (ранжированного) распределения. На этом этапе все выявленные виды ЭД упорядочиваются по убыванию количества единиц каждого типа. Полученное распределение представляется в табличной форме (ранжированное распределение) и в графической – в виде точечного графика зависимости количества двигателей от ранга (рангово-видовое распределение). Также строится видовое распределение, описывающее, как количество видов с одинаковой численностью соотносится с самой численностью объектов в каждом виде.

В рамках выполнения первых двух этапов сформирован ранжированный массив данных об электродвигателях завода, представленный в таблице 1.

Таблица 1 – Фрагмент массива, ранжированного по количеству двигателей каждого вида

Ранг	Количество	Мощность, кВт
1	20	22
2	17	3
3	15	7,6
.....
21	1	1,1
22	1	0,25
Общее количество	139	

Этап 3 – это аналитическое доказательство того, что полученное распределение относится к классу Н-распределений и заключается оно в совместном выполнении двух гипотез:

1) несоответствие анализируемых данных нормальному распределению по критерию Пирсона:

$$\chi_{набл}^2 = \sum \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}, \quad (1)$$

где n_i, n'_i – эмпирические и теоретические частоты соответственно.

2) взаимосвязь данных, определяемая с помощью коэффициента конкордации:

$$K = \frac{12 \cdot \sum D}{m^2 \cdot (n^3 - n)}, \quad (2)$$

где D – отклонение суммы рангов объекта от их средней суммы для n объектов;

m – количество временных точек траектории движения показателя.

Результаты выполнения третьего этапа, позволили сделать вывод о возможности исследовать электродвигатели химического завода посредством техноценологического подхода, поскольку $\chi_{набл}^2 > \chi_{кр}^2$ и коэффициент конкордации значим (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты проверки гипотез

Наименование распределения	Критерий Пирсона		Коэффициент конкордации К
	$\chi_{набл}^2$	$\chi_{кр}^2$	
Рангово-видовое	18,154	5,991	1
Видовое	58,005		1

Этап 4. Математическая обработка рангово-видового и видового распределений.

Ранговое видовое H -распределение описывается выражением:

$$\Lambda(r) = \frac{B}{r^\beta}, \quad r = 1, \dots, S, \quad (3)$$

где $\Lambda(r)$ – количество объектов, которым представлен вид с указанным значением ранга (виды расположены в порядке уменьшения значения численности);

r – целочисленное значение ранга (ранг – номер по порядку при расположении видов по уменьшению численности);

B, β – константы распределения;

S – общее количество видов.

Видовое H -распределение описывается зависимостью:

$$\Omega(x) = \frac{W_0}{x^{1+\alpha}}, \quad \gamma = 1 + \alpha, \quad (4)$$

где $\Omega(x)$ – число видов с равным количеством объектов в виде;

$x \in [1, \infty)$ – непрерывный аналог численности популяций (если N_0 – численность вида, представленного наибольшим количеством объектов, то $x = 1, \dots, N_0$);

$W_0, \alpha (\alpha > 0)$ – константы распределения.

Аппроксимация осуществляется методом наименьших квадратов, минимизирующим сумму квадратов отклонений точек, рассчитанных по

моделям (3) и (4) от соответствующих эмпирических значений, представленных в таблице 2:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - y(x_i))^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

где y_i – эмпирические значения ежемесячного электропотребления;
 $y(x_i)$ – гиперболические зависимости в соответствии с (3) и (4).

Результаты выполненной аппроксимации представлены на рисунке 1: сплошными линиями показаны аппроксимирующие кривые, полученные на этапе 4 в результате подбора параметров гиперболических моделей, а маркерами (точками) – эмпирические распределения, построенные на этапе 2. Такое совмещённое изображение наглядно демонстрирует степень согласия теоретической модели с фактическими данными и служит визуальным подтверждением адекватности аппроксимации.

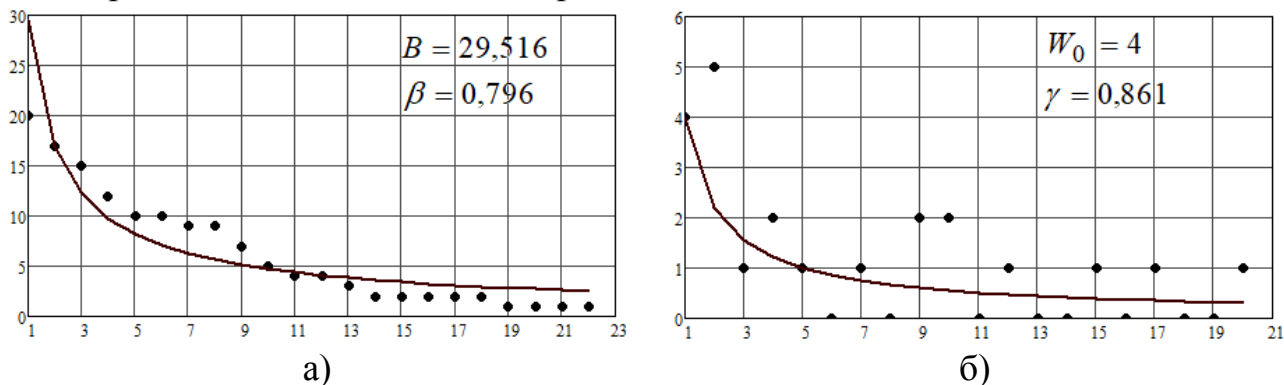


Рисунок 1 – Рангово-видовое (а) и видовое (б) распределения двигателей завода

Этап 5. Оценка структурно-видовой сбалансированности парка электродвигателей осуществляется по результатам анализа статистических показателей (коэффициентов H -распределений) β и γ , определенных в соответствии с выражениями (3) и (4).

Руководствуясь законом оптимального построения техноценозов [2], согласно которому оптимальным можно считать техноценоз с параметрами статистических показателей, лежащих в интервале от 0,5 до 1,5, а идеальным при равенстве коэффициентов 1, авторами предложено при оценке структурно-видовой сбалансированности парка ЭД использовать следующие показатели:

$$\Delta\beta = |\beta_{ид} - \beta|; \quad (6)$$

$$\Delta\gamma = |\gamma_{ид} - \gamma|. \quad (7)$$

При таком подходе, если полученные по (6) и (7) показатели лежат в диапазоне $[0; 0,5]$, то структурно-видовой состав электродвигателей следует считать сбалансированным (оптимальным). В противном случае – необходимы меры по его корректировке, с целью постепенного приближения к сбалансированному состоянию.

В таблице 3 приведены определенные по (6) и (7) показатели отклонения, анализируемого парка электродвигателей от идеальных значений.

Таблица 3 – Результаты аппроксимации

$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	$\beta_{ид}$	$\gamma_{ид}$
0,204	0,139	1	

Анализ таблицы 3 показал, что структурно-видовой состав асинхронных электродвигателей химического завода является сбалансированным, поскольку показатели отклонения построенных H -распределений от идеальных лежат в интервале от 0 до 0,5. Это свидетельствует о гармоничном сочетании массовых и редких типов двигателей без признаков фрагментации или чрезмерной унификации, что обеспечивает высокую надёжность и энергоэффективность работы химического завода в целом.

Список литературы

1 Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». – Режим доступа : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/. – дата обращения: 10.01.2026.

2 Гнатюк, В. И. Закон оптимального построения техноценозов: монография / В. И. Гнатюк. – 3-е изд., перераб. и доп. – Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2019. – 991 с.

3 Влацкая, Л. А. Алгоритм анализа технического состояния электрооборудования / Л. А. Влацкая, А. М. Семенов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 12. – С. 200-204.

ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ СТЕНДЫ, КАК ДОПОЛНЕНИЕ К ТРАДИЦИОННЫМ ФОРМАМ АУДИТОРНОЙ РАБОТЫ

Филяк М.М., канд. техн. наук, доцент, Шаршнев К. В.

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Оренбургский государственный университет»

Современное образование в области систем связи и электроники требует не только глубокого теоретического понимания изучаемого материала, но и практических навыков работы с электронными устройствами. В образовательной деятельности вуза при формировании у обучающихся по техническим специальностям различных компетенций особое внимание уделяется формированию именно профессиональных компетенций в соответствии с видами профессиональной деятельности в зависимости от направления и профиля подготовки [1].

Согласно требований Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования по направлениям подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» профиля «Промышленная электроника» и 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» профиля «Электронные средства телекоммуникаций» у выпускника должна формироваться среди прочих компетенций такая, как «ОПК-1 – Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности», индикатором достижения которой является «ОПК-1-В-17 – Владеет навыками использования знаний физики и математики при выборе материалов электронной техники». Компетенция, которая формируется при изучении дисциплины «Материалы электронной техники».

ФГОС ВО устанавливает такую составляющую учебной дисциплины «Материалы электронной техники», как лабораторный практикум. Выполнение лабораторных работ способствует приобретению у обучающихся знаний в области физических основ материаловедения и формированию теоретической базы для изучения последующих дисциплин профессионального цикла.

Однако проведение экспериментов при изучении свойств материалов, применяющихся в электронных устройствах, связано со сложностью и дороговизной современного лабораторного оборудования. В связи с этим становится актуальной задача разработки виртуальных лабораторных стендов, обеспечивающих гибкость, безопасность и доступность обучения. Виртуальные лабораторные стенды позволяют увеличить разнообразие параметров исследуемых материалов, вариантов при выполнении экспериментов, позволяют выполнять работы фронтально без затрат на создание дополнительных рабочих мест [1].

Виртуальный лабораторный практикум не является абсолютной заменой реальным лабораторным работам. Тем не менее, в условиях развития

дистанционного образования (онлайн курсы), для обучения людей с ограниченными возможностями здоровья, а так же в чрезвычайных ситуациях (какой была, например, пандемия COVID-19) виртуальные лабораторные работы могут быть полезным дополнением к традиционным формам аудиторной работы [2].

В данной статье приведен пример виртуального лабораторного стенда «Диэлектрические потери», который позволяет с высокой достоверностью моделировать процесс измерения угла диэлектрических потерь при выполнении лабораторной работы по дисциплине базовой части блока Б1.Д «Материалы электронной техники» для направлений подготовки 11.03.04 и 11.03.02.

Прикладное программное обеспечение виртуального лабораторного стенда было разработано с использованием языка программирования Python [3], выбранного за возможность быстрой разработки приложений, включая графические интерфейсы. Разработка проводилась в интегрированной среде разработки (IDE) PyCharm Community Edition под управлением Windows 11. Данная среда обеспечила удобную работу с кодом, отладку и управление. Для создания графического пользовательского интерфейса (GUI), имитирующего реальное лабораторное оборудование, использовался фреймворк PyQt5. Визуальная часть интерфейса была создана путем фотографирования приборов (осциллографа, блока питания (ИП) и блок ФПЭ-02), обработанных в графическом редакторе. Интерактивные элементы управления, такие как кнопки включения питания и ручка переменного сопротивления, были реализованы с использованием стандартных виджетов PyQt5 [3].

Разработанная программа обеспечивает возможность проведения лабораторной работы в условиях, максимально приближенных к реальному эксперименту. Выполняя данную работу, учащиеся могут освоить процесс измерения на электронном осциллографе угла диэлектрических потерь и определения его тангенса.

При запуске программы открывается основное окно, представляющее внешний вид лабораторного стенда и содержащее электронный осциллограф, блок питания (ИП) и блок (ФПЭ-02) (рисунок 1).

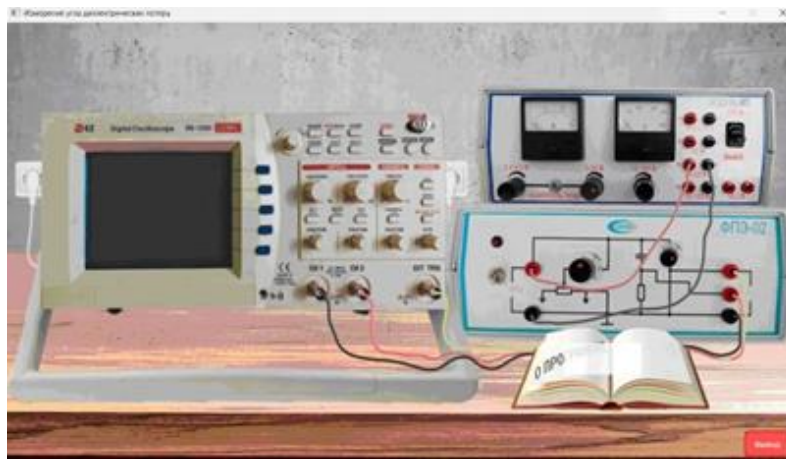


Рисунок 1 – Внешний вид стенда

В основном окне имеются: кнопки для подключения составных частей стенда к сети переменного напряжения 220 В. При нажатии кнопки загорается зелёная сигнальная лампа. Ручка переменного сопротивления на панели блока ФПЭ-02 позволяет регулировать величину напряжения на конденсаторе. С помощью осциллографа фиксируются сигналы, подаваемые с исследуемого конденсатора и постоянного сопротивления.

Перед началом измерений необходимо нажать кнопку «О ПРОГРАММЕ» в нижней правой части экрана и изучить методические указания. Материал в них изложен в удобном для восприятия виде, что позволит учащимся выполнить лабораторную работу самостоятельно, в том числе и в режиме удаленного доступа.

После включения стенда без переменного сопротивления (ручка в крайнем левом положении) на экране осциллографа появляется окружность (рисунок 2).



Рисунок 2 – Окно программы без переменного сопротивления

Учащийся может повернуть ручку переменного сопротивления вправо, имитируя потери в конденсаторе, и снять несколько диаграмм (рисунок 3).



Рисунок 3 – Окно программы при переменном сопротивлении отличном от нуля

Разложив полученные диаграммы на синусоиды, можно определить угол диэлектрических потерь и его тангенс (рисунок 4).

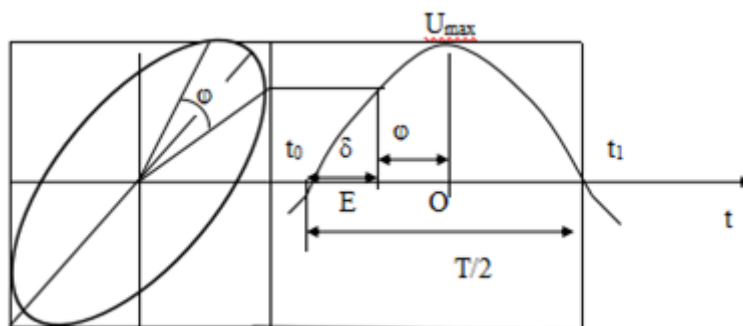


Рисунок 4 – Определение угла диэлектрических потерь

Сдвиг фаз между током и напряжением φ определяется величиной отрезка OE на изображении синусоиды (рисунок 4). Угол потерь равен по определению $\delta = 90^\circ - \varphi$.

Разработанный виртуальный лабораторный стенд позволяет: снизить затраты на оборудование и обслуживание физических лабораторий; обеспечить безопасность и доступность обучения, включая дистанционные форматы; предоставить студентам возможность наглядного изучения сложных физических процессов; упростить проведение лабораторных работ за счёт автоматизации измерений и расчётов.

Достоверность результатов обеспечивается использованием проверенных математических моделей и методов анализа; сравнением полученных данных с теоретическими расчётами и данными, полученными измерением на реальных стендах.

Список литературы

1. Саданова, Б. М. Применение возможностей виртуальных лабораторий в учебном процессе технического вуза [Электронный ресурс] / Б. М. Саданова, А. В. Олейникова, И. В. Альберти [и др.] // Молодой ученый. – 2016. – № 4 (108). – С. 71-74. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/108/25945> (дата обращения: 07.01.2026).

2. Золотов, Д.А., Коваленко А.Н., Петина М.А., Путивцева Н.П. Об использовании виртуальных лабораторных работ в онлайн-образовании / Д.А. Золотов, А.Н. Коваленко, М.А. Петина, Н.П. Путивцева // Научный результат. Информационные технологии. – 2020. – Т.5, №4. – С. 26-30.

3. PyQt5 Tutorial [Электронный ресурс] // Tutorialspoint. – Режим доступа: <https://www.tutorialspoint.com/pyqt5/index.htm> (дата обращения: 07.01.2026).

ПЛАТА СОПРЯЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ ТОКА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С МОДУЛЕМ АЦП

Фролов С.С., канд. техн. наук, Иов К.С.,

Лукьянчиков А.А., Сохибназаров Х.А.,

Ямансарин И.И., канд. техн. наук, доцент

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Оренбургский государственный университет»

В последнее время для науки особый интерес стали представлять электромагнитные спектрометрические методы диагностики асинхронных двигателей, являющиеся альтернативой виброакустическим методам. К электромагнитным методам авторы относят диагностику с помощью бесконтактных датчиков тока питающих фаз (трансформаторов тока или датчиков на основе эффекта Холла), индукционных и холловских датчиков магнитного поля.

При изучении спектров сигналов указанных датчиков установлено влияние дефектов в конструкции ротора на гармоники, кратные частоте вращения [1 - 4].

Так, при исследовании спектра токов питающих фаз [1] установлено влияние дефектов в обмотке статора на 2-ю гармонику вращения, перегрева обмотки статора – на 3-ю гармонику. Обнаружена корреляция между дефектами подшипников качения и возмущениями спектра в окрестностях 3-й и 4-й гармоники, дисбалансом ротора и изменениями в спектре в окрестностях 7-й и 8-й гармоник.

Установлено влияние эксцентриситета ротора [3] на спектр магнитного поля в окрестностях зубцовых гармоник (24-й, 48-й и 72-й на рисунке 1).

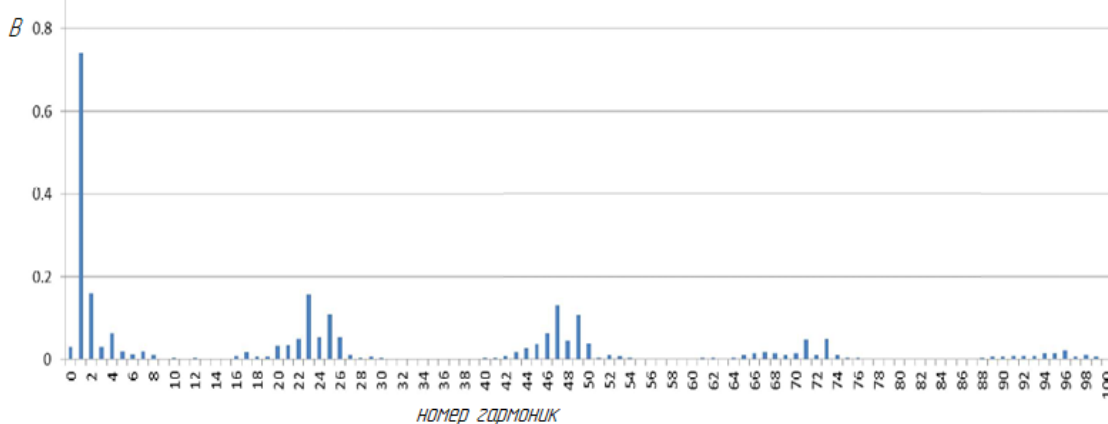


Рисунок 1 – Спектр в окрестности первой и зубцовых гармоник магнитного поля в воздушном зазоре ротора двигателя АИР100S2 при эксцентриситете ротора $\varepsilon = 0,95$

Также обнаружена связь между дефектами крепления двигателя или люфтом муфты и спектром тока в окрестности 1 Гц.

Упомянутые выше бесконтактные датчики – трансформаторы тока, датчики Холла, индукционные датчики магнитного поля – более экономичны по отношению к виброакустическим. А трансформаторы тока возможно стационарно фиксировать на питающий кабель.

Так как для надёжного диагностирования неисправностей асинхронных двигателей ещё недостаточно информации о количественной зависимости параметров дефектов и амплитудами чувствительных к ним гармоник, необходимы более скрупулёзные исследования. Также информация о многих видах дефектов более достоверна, если сигналы о магнитном поле статора получены из нескольких точек двигателя. И ещё достоверней, если исследователю доступны данные и о магнитном поле статора, и о токе статора.

Поэтому, авторы считают целесообразным получение информации о магнитном поле асинхронного электродвигателя с разных точек корпуса. Для чего пригодны выпускаемые сейчас многоканальные модули АЦП, сопрягаемые с персональным компьютером (ПК). На начальных этапах исследований актуальна информация о магнитном поле, полученная по сигналам разных датчиков: Холла, индукционным. Сигналы тока обмотки статора можем получать также с двух видов датчиков – трансформаторов тока и датчиков тока на эффекте Холла.

Поэтому разрабатываемая плата сопряжения датчиков и модуля АЦП должна позволять оперативно менять схему согласования канала АЦП с подключаемым сенсором.

В качестве модуля АЦП авторам был доступен блок 32-х канального 14-ти разрядного АЦП LA-2USB.

Большинство микросхем датчиков магнитного поля на основе эффекта Холла с приемлемым соотношением стоимости и точности измерения (например, SE496, SS39, SS49, SS59) требуют однополярного питания 5 В (элемент DA1 на схеме рисунка 2), а при отсутствии магнитного поля на выходе их оконечного усилителя имеет место напряжение $U_{X,0}$ не 0 В, а 2,5 В.

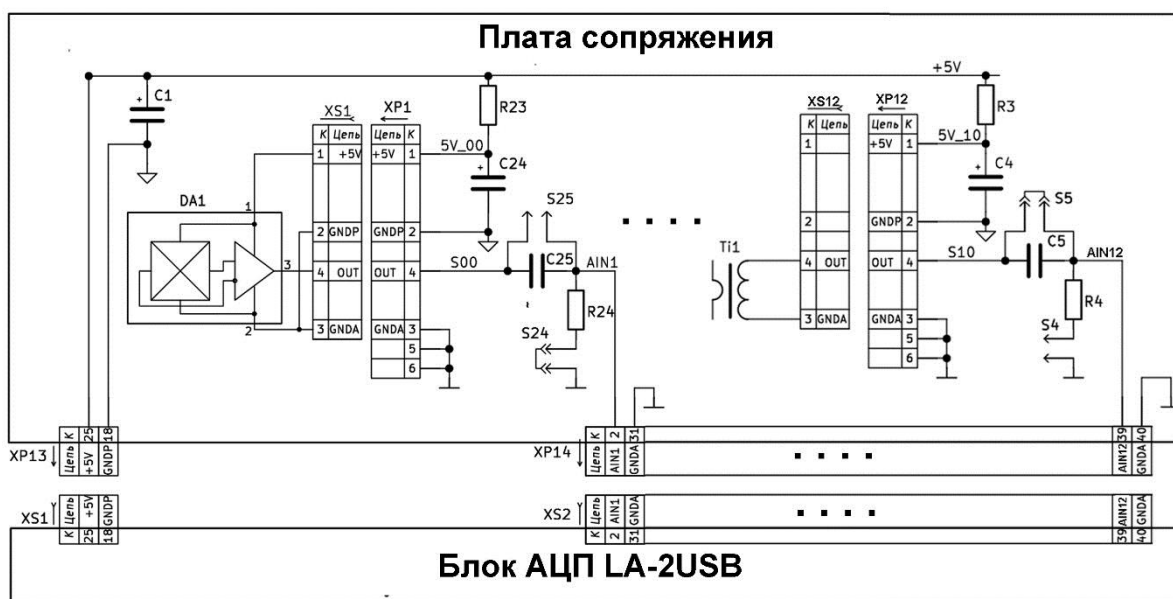


Рисунок 2 – Схема соединений блока АЦП, датчиков и платы сопряжения

При разработке схемы подключения для питания датчика решено было использовать собственный источник +5 В блока LA-2USB с контактов 25 и 18 26-контактного разъёма XS1 (рисунок 2).

Так как, по результатам экспериментов изменения магнитного поля вне корпуса двигателя вызывали амплитуду колебаний датчика DA1 не более 100 мВ, что на порядок меньше постоянной составляющей $U_{X,0} = 2,5$, последнее целесообразно перед АЦП удалить. Эту операцию реализовали с помощью ФВЧ в виде RC-цепи первого порядка (примеры – цепи C5-R4 или C25-R24 на рисунке 2). Перемычка-джампик S24 (или S4) при использовании похожих микросхем должна быть включена, замкнута, а S25 (или S5) разомкнута.

Аналогично функционируют многие датчики тока на эффекте Холла, которые требуют того же питания +5 В, а при отсутствии тока на выходе то же напряжение $U_{X,0} = 2,5$. Поэтому к каналу АЦП они могут подключаться через аналогичную схему сопряжения.

На зажимах индукционного датчика магнитного поля (многовитковая катушка на стальном сердечнике) или вторичной обмотки трансформатора тока (T11 на схеме рисунка 2) напряжение переменное и без постоянной составляющей. Поэтому при подключении индукционных датчиков через такие же разъёмы, что и для холловских, используется не 4, а только 2 сигнальных контакта. Развязывающие ёмкости ФВЧ (например, C5 или C25) замыкаются упомянутыми ранее перемычками (S5 или S25), резисторы ФВЧ отключаются (перемычки S4 или S24 разомкнуты).

Для уменьшения влияния каналов друг на друга для каждого канала применён резистивно-ёмкостной фильтр по питанию, примеры – низкоомный резистор R23 с электролитом C24 на рисунке 2 (или аналогичная цепь R3-C4).

В результате опытно-конструкторских работ разработана и изготовлена плата устройства сопряжения рисунка 2. Схема сопряжения упомянутых в начале статьи датчиков на элементах XP1, R23, C24, S25, C25, R24, S24 растражирована соответствующее число раз для 12 каналов. При включенной перемычке S24 и отключенной S25 к каналу АЦП AIN1 подключается ФВЧ, канал «настроен» на работу с датчиком Холла. При обратно переключении джампиков канал АЦП напрямую подключается к сигнальным контактам OUT и GNDA разъёма XP1, к каналу можно подключать индукционный датчик или вторичную обмотку трансформатора тока.

Изготовленный опытный экземпляр платы сопряжения используется для получения спектров сигналов с указанных датчиков, установленных на асинхронный двигатель.

Список литературы

1 Голубев К. Диагностика промышленных электродвигателей и генераторов по спектру потребляемого тока и предотвращение аварий [Электронный ресурс] / Блог компании КРОК, Data Mining, IT-инфраструктура. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/croc/articles/343000/> (дата обращения 04.10.2024).

2 Саликов М.П. О способах определения неисправностей электрических машин / М.П. Саликов, И.И. Ямансарин. – Труды XI Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы»; Оренбург. гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2020. – с. 150 - 153.

3 Сурков Д.В. Электромагнитные способы определения эксцентриситета и несимметрии короткозамкнутой клетки ротора асинхронных двигателей: автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.09.01 [Электронный ресурс] / Сурков Дмитрий Вячеславович // Оренбургский государственный университет. – Оренбург, 2008. - 21 с. – режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/elektromagnitnye-sposoby-opredeleniya-ekstsentrismeteta-i-nesimmetrii-korotkozamknutoi-kletki> (дата обращения 19.01.2026).

4 Устинов М.А. Обзор существующих методов диагностирования электродвигателей [Электронный ресурс] / ООО "Институт управления и социально-экономического развития". Саратов. Форум молодых учёных. 2020. – №5 (45). – с. 481 - 486. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43813123_73541848.pdf (дата обращения 04.10.2024).

ПРОМТИНГ В ПРЕПОДАВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН: ОПЫТ ИНТЕГРАЦИИ НА ОСНОВЕ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ «СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА»

Ханжин С.В., Ханжина Н.В.

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

Современный этап развития высшего образования характеризуется усилением внимания к цифровым технологиям и методам искусственного интеллекта (ИИ) как в содержании учебных дисциплин, так и в организации педагогического процесса. Внедрение дисциплины «Системы искусственного интеллекта» в учебные планы инженерных направлений, включая 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», отражает общемировой тренд на подготовку специалистов, владеющих не только профильными, но и сквозными цифровыми компетенциями [1, 2]. Однако сам процесс преподавания подобных дисциплин зачастую сопряжен с необходимостью постоянного обновления контента, поиска актуальных профессионально-ориентированных примеров и разработки разнообразных оценочных средств.

В этих условиях на первый план выходит технология промтинга – искусство составления эффективных запросов к большим языковым моделям (LLM). Если в предыдущих исследованиях [3] были рассмотрены общие принципы промтинга, то настоящая статья фокусируется на его практическом применении в конкретном образовательном контексте. Мы исходим из гипотезы, что рабочая программа (РП) дисциплины является не просто формальным документом, а ключевым источником структурированного контекста, позволяющим превратить генеративный ИИ из инструмента создания общего контента в точный механизм разработки специализированных учебно-методических материалов.

Цель данной работы – представить и проанализировать опыт использования промтинга на основе рабочей программы дисциплины «Системы искусственного интеллекта» для решения двух типовых задач преподавателя: проектирования лекционного занятия и формирования фонда оценочных средств.

1. Рабочая программа как семантическое ядро для образовательного промтинга

Рабочая программа дисциплины «ФДТ.3 Системы искусственного интеллекта», разработанная для направления «Электроэнергетика и электротехника», представляет собой комплексный документ, содержащий не только перечень тем, но и систему дидактических координат. Именно эти координаты – цели, планируемые результаты (в формате

«знать/уметь/владеть»), код и формулировка компетенции (ОПК-1), содержание каждого раздела – формируют семантическое поле, необходимое для качественного промтинга.

Без использования этого контекста запрос к языковой модели, например, «создай план лекции по введению в ИИ», приведет к генерации абстрактного, деконтекстуализированного материала. Однако при интеграции элементов РП в промт, ИИ получает четкие ориентиры: для кого создается материал (студенты-энергетики), какова конечная цель (формирование понимания принципов работы ИТ), какие аспекты темы являются обязательными (например, функциональная структура систем ИИ). Это позволяет преодолеть главный барьер в использовании генеративных моделей в образовании – разрыв между общими возможностями ИИ и специфическими требованиями конкретного учебного курса.

Таким образом, подготовительным и наиболее важным этапом образовательного промтинга становится не составление запроса как такового, а аналитическая работа с РП по выделению и формализации ключевых дидактических единиц, которые затем будут встроены в структуру промта.

2. Практика применения: от контекста к конкретному результату

2.1. Генерация плана лекционного занятия

В качестве примера рассмотрим задачу подготовки плана лекции по теме «Введение», которой в РП отводится 2 академических часа. Содержание темы включает: основные понятия и определения, область применения, историю развития интеллектуальных систем, функциональную структуру использования систем ИИ.

Для решения этой задачи был разработан и применен следующий шаблон промта:

Ты – опытный преподаватель-методист инженерного вуза с экспертизой в области цифровых технологий и энергетики.

КОНТЕКСТ ЗАДАЧИ:

1. Дисциплина: «Системы искусственного интеллекта».
2. Направление подготовки: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение».
3. Код и формулировка формируемой компетенции: ОПК-1 «Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности».
4. Тема занятия: «Введение» (2 академических часа, 90 минут).
5. Содержание темы (согласно РП): основные понятия и определения, область применения, история развития интеллектуальных систем, функциональная структура использования систем ИИ.
6. Цель занятия (согласно РП): знакомство с основными общеметодологическими положениями систем ИИ.

ИНСТРУКЦИЯ:

Разработай детальный по минутам план лекционного занятия. План должен:

1. Быть строго рассчитан на 90 минут.
2. Включать логические этапы: организационный момент, актуализация опорных знаний и мотивация, изложение нового материала, первичное закрепление, подведение итогов, задание на самостоятельную работу.
3. Содержать профессиональный контекст: акцент на применение ИИ в сфере электроэнергетики и электроснабжения (Smart Grid, прогноз нагрузок, диагностическое оборудование).
4. Раскрывать все элементы содержания темы, указанные в РП.
5. Учитывать деятельность как преподавателя (объяснение, вопросы, демонстрация), так и студентов (слушание, ответы, конспектирование, обсуждение).
6. Быть представлен в виде структурированной таблицы с колонками: «Время (мин)», «Этап занятия», «Содержание этапа (ключевые тезисы)», «Деятельность преподавателя», «Деятельность студентов», «Связь с элементом компетенции/содержанием РП».

Результат применения промта (фрагмент сгенерированного плана):

Время (мин)	Этап занятия	Содержание этапа (ключевые тезисы)	Деятельность преподавателя	Деятельность студентов	Связь с РП
1-3	Организационный момент	Представление темы, её значимости для будущей профессии инженера-энергетика. Формулировка цели.	Объявление темы, демонстрация первого слайда с ключевыми вопросам и лекции.	Восприятие, конспектирование темы и цели.	Цель занятия: знакомство с общеметодологическими положениями.
3-15	Актуализация и мотивация	Обсуждение: что студенты понимают под ИИ? Примеры из жизни. Профессиональный кейс: Системы интеллектуального анализа данных в диспетчерском	Ведущая беседа, задавание наводящих вопросов, показ короткой схемы	Активное обсуждение, предложение своих примеров, ответы на вопросы.	Связь с компетенцией ОПК-1: понимание принципов работы ИТ. Область применения ИИ.

Время (мин)	Этап занятия	Содержание этапа (ключевые тезисы)	Деятельность преподавателя	Деятельность студентов	Связь с РП
		управлении электросетями (Smart Grid).	Smart Grid.		
15-45	Изложение. Блок 1: Понятия и определения	<p>1. Определение ИИ: от кибернетического подхода к агентно-ориентированному.</p> <p>2. Ключевые термины: интеллектуальная система, агент, среда, рациональность. Пример для энергетики: Автономный дрон-инспектор ЛЭП как интеллектуальный агент.</p>	<p>Лекционное изложение с опорой на презентацию. Вопрос для аудитории: «Чем «умный» агент отличается от простой программы управления?».</p>	<p>Конспектирование определений, осмысление примера, попытка ответить на вопрос.</p>	<p>Содержание темы: «Основные понятия определения».</p>

Данный результат демонстрирует, как промт, насыщенный контекстом из РП, позволяет получить не абстрактную структуру, а профессионально-ориентированный, детализированный план. Каждый этап явно соотнесен с элементами РП, а в содержание встроены примеры из предметной области студентов (энергетика), что повышает мотивацию и практическую значимость материала.

2.2. Создание фонда оценочных средств

Второй типовой задачей является разработка средств контроля знаний. Используя аналогичный подход контекстуализации через РП, был составлен следующий промт для генерации тестовых заданий по теме «Введение»:

Ты – специалист по педагогическим измерениям и тестологии в высшем техническом образовании.

КОНТЕКСТ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕСТА:

1. Дисциплина и тема: «Системы искусственного интеллекта», тема «Введение».

2. Проверяемый элемент компетенции (ОПК-1): «Знает основные направления научных исследований в области искусственного интеллекта; модели представления задач в интеллектуальных системах».

3. Содержательные элементы для проверки (из РП): основные понятия/определения ИИ, область применения, исторические вехи, функциональная структура систем ИИ.

4. Профессиональный контекст: электроэнергетика и электроснабжение.

ИНСТРУКЦИЯ:

Создай 10 тестовых заданий для проведения входного или выходного контроля знаний по указанной теме. Соблуди следующие требования:

1. ****Разнообразие форматов:**** Используй 5-6 заданий с выбором одного правильного ответа (ОВО), 2-3 задания на установление соответствия, 1-2 задания открытого типа с кратким конструктивным ответом.

2. ****Контекстуализация:**** Не менее 30% заданий (3-4 вопроса) должны содержать примеры, формулировки или выборки, связанные с областью электроэнергетики.

3. ****Содержательный охват:**** Задания должны равномерно проверять усвоение всех перечисленных содержательных элементов.

4. ****Качество дистракторов:**** В заданиях ОВО дистракторы (неправильные ответы) должны быть правдоподобными и отражать типичные ошибки в понимании.

5. ****Методическое сопровождение:**** После каждого задания в отдельной строке в скобках укажи правильный ответ и дай краткое методическое пояснение (на что направлен вопрос, какой элемент содержания проверяет).

Представь результат в виде нумерованного списка. Для каждого задания четко укажи его тип.

Результат применения промта (примеры сгенерированных заданий):

Тип: Выбор одного правильного ответа (ОВО). Какое из приведенных определений наиболее точно отражает современное агентно-ориентированное понимание искусственного интеллекта?

а) Технология создания компьютерных программ, полностью копирующих человеческое мышление.

б) Наука и технология создания интеллектуальных агентов, способных воспринимать среду, действовать в ней и достигать поставленных целей.

в) Раздел кибернетики, занимающийся разработкой алгоритмов для игровых программ.

г) Исключительно область машинного обучения и нейронных сетей.
(Правильный ответ: б. Пояснение: Проверяется усвоение базового понятийного аппарата (определение ИИ), отсекаются устаревшие или слишком узкие трактовки.)

Тип: Выбор одного правильного ответа (ОВО) с профессиональным контекстом. Система прогнозирования суточной нагрузки на электрическую подстанцию с использованием алгоритмов машинного обучения является примером:

а) Экспертной системы, работающей с символьными знаниями.

б) Интеллектуального агента, взаимодействующего с динамической средой.

в) Нейросетевой модели распознавания образов.

г) Системы, основанной на продукционных правилах логического вывода.

(Правильный ответ: б. Пояснение: Проверяется умение применять понятие «интеллектуальный агент» к конкретной профессиональной задаче в энергетике, связь с содержательным элементом «функциональная структура».)

Тип: Установление соответствия. Установите соответствие между этапом истории развития ИИ и его характерной чертой:

Этапы:

1950-е – 1960-е гг. (эпоха зарождения).

1970-е – 1980-е гг. (эпоха экспертных систем).

1990-е гг. – по настоящее время (эпоха агентов и машинного обучения).

Черты:

А. Доминирование логических моделей, теорема Геделя, игры.

Б. Создание коммерческих систем, кодирующих знания узких экспертов (MYCIN, DENDRAL).

В. Прагматический подход, развитие интернет-агентов, робототехники, глубокого обучения.

(Правильное соответствие: 1-А, 2-Б, 3-В. Пояснение: Проверяется знание ключевых исторических вех развития ИИ как научного направления.)

Представленные примеры показывают, что шаблонный промт с контекстом РП позволяет генерировать не случайный набор вопросов, а целенаправленный инструмент оценки, валидный по отношению к заявленным результатам обучения. Наличие профессионального контекста в заданиях повышает их содержательную ценность для студентов-энергетиков.

3. Критический анализ и методические рекомендации

Применение описанной методики не является полностью автоматизированным процессом и требует от преподавателя критической рефлексии. На основе проведенного эксперимента можно сформулировать ряд выводов и рекомендаций.

Эффективность и экономия времени. Использование промтов на основе РП позволяет сократить время на первоначальное структурирование учебного материала и создание каркаса оценочных средств на 60-70%. Преподаватель получает готовую, логичную основу, которую можно наполнять конкретикой, углублять и адаптировать под свой стиль.

Необходимость фактчекинга и экспертной проверки. Языковые модели могут допускать фактологические ошибки, особенно в специфичных технических областях (например, в деталях архитектуры Smart Grid) или в исторических справках. Обязательным этапом является перепроверка всех генерируемых данных, дат, имен и технических описаний по авторитетным источникам.

Итеративность как норма. Редко удается получить идеальный результат с первого запроса. Эффективная стратегия – это диалог с моделью. Например, после получения общего плана можно дать уточняющий промт: «Детализируй этап 15-35 минут из предыдущего плана: предложи 2 конкретных примера применения ИИ в диагностике трансформаторного оборудования». Такой подход позволяет постепенно наращивать детализацию и качество материала.

Риск «синдрома среднего промта». Если промт составлен слишком общо или без учета специфики РП, ИИ выдаст усредненный, шаблонный результат, лишенный педагогической ценности. Ключ к успеху – в максимально плотной интеграции конкретных параметров из РП (кодов компетенций, точных формулировок тем) в тело запроса.

Педагогический дизайн – прерогатива преподавателя. ИИ эффективно генерирует контент и структуру, но не может заменить педагогическое мастерство в выборе методов взаимодействия, организации групповой работы или реагировании на динамику аудитории. Сгенерированный план – это сценарий, который оживает только в исполнении педагога.

Практический опыт, изложенный в статье, демонстрирует, что рабочая программа дисциплины, будучи семантически обогащенной и формализованной, становится эффективным интерфейсом между преподавателем и генеративным искусственным интеллектом. Методика промтинга, основанная на глубокой интеграции элементов РП в структуру запроса, позволяет решать конкретные задачи педагогического дизайна – от проектирования занятий до разработки контрольно-измерительных материалов – с существенной экономией временных ресурсов и сохранением высокого уровня соответствия образовательным стандартам.

Список литературы

1. Рекомендации к преподаванию дисциплины «Системы искусственного интеллекта» для различных направлений бакалавриата [Электронный ресурс] / С. В. Ханжин, Н. В. Ханжина // 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. 3727-3733. . - 7 с.

2. Эффективное использование промтинга в образовательной деятельности: методология и практическое применение [Электронный ресурс] / С. В. Ханжин, Н. В. Ханжина / Оренбург. гос. ун-т ; ред. А. В. Зайцев. - Оренбург : ОГУ, 2026. - 6 с.

3. Artificial Intelligence Index Report 2024 – Stanford University. – URL: https://www.researchgate.net/publication/381006727_Artificial_Intelligence_Index_Report_2024 (дата обращения: 15.12.2025)

4. Prompt Engineering Guide – OpenAI Documentation. – URL: <https://help.openai.com/en/articles/6654000-best-practices-for-prompt-engineering-with-the-openai-api> (дата обращения: 15.12.2025)

5. Лучшие практики промпт-инжиниринга – Microsoft Learn. – URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/azure/ai-services/openai/concepts/prompt-engineering> (дата обращения: 15.12.2025)

Федеральный проект «Искусственный интеллект». – URL: <https://ai.gov.ru/> (дата обращения: 15.12.2025)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ УСТРОЙСТВА ЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛОГО ДОМА

Шлейников В.Б., канд. техн. наук, Викторова Е.В.

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Оренбургский государственный университет»

Исследования, проводимые в области повышения эффективности децентрализованного электроснабжения, неизменно сопровождаются построением имитационной модели, сочетающей несколько источников электрической энергии. Наиболее распространены модели, построенные на основе алгоритма Монте-Карло [1], метода роя частиц [2], генетического алгоритма [3], а также модели, разработанные другими авторами [4].

В моделях имеются различные источники электроэнергии, соединенные с универсальным электроприемником, который обобщает в себе все электроприемники исследуемого объекта. Рассмотрим режимы работы моделей таких систем с точки зрения удобства управления их параметрами.

Словесный алгоритм. Идеология потребления электроэнергии от ВИЭ, в т.ч. фото- и ветроэлектрических принимается всегда одинаковой – вся выработанная ими электроэнергия должна быть израсходована. На данном этапе задача электроснабжения трансформируется в задачу расходования выработанной электроэнергии, т.е. требуется согласовать величину потребления электроэнергии для определенного объема ее выработки. Такое согласование выработки и потребления возможно благодаря буферной емкости - накопителю электроэнергии.

Аккумулятор, который чаще всего используется в качестве буферной емкости и представляется в таких моделях в качестве приемника и источника электроэнергии попеременно. Особенностью аккумулятора, используемого в качестве накопительного устройства, является трансформация в нем стоимости электроэнергии, т.е. аккумулятор принимает от внешних источников электроэнергию по цене ее производства, а возвращает по цене ее накопления, хранения и потерь.

Потребление энергии электроприемниками в существующих моделях происходит под лозунгом «энергия нужна немедленно». Данный подход формирует существующий график электропотребления домовладений, представленный на рисунке 1 [5].

Анализ этого и аналогичных графиков электрической нагрузки позволил выявить два характерных периода, приходящихся на утренний и вечерний максимум, превышающих среднесуточное электропотребление.

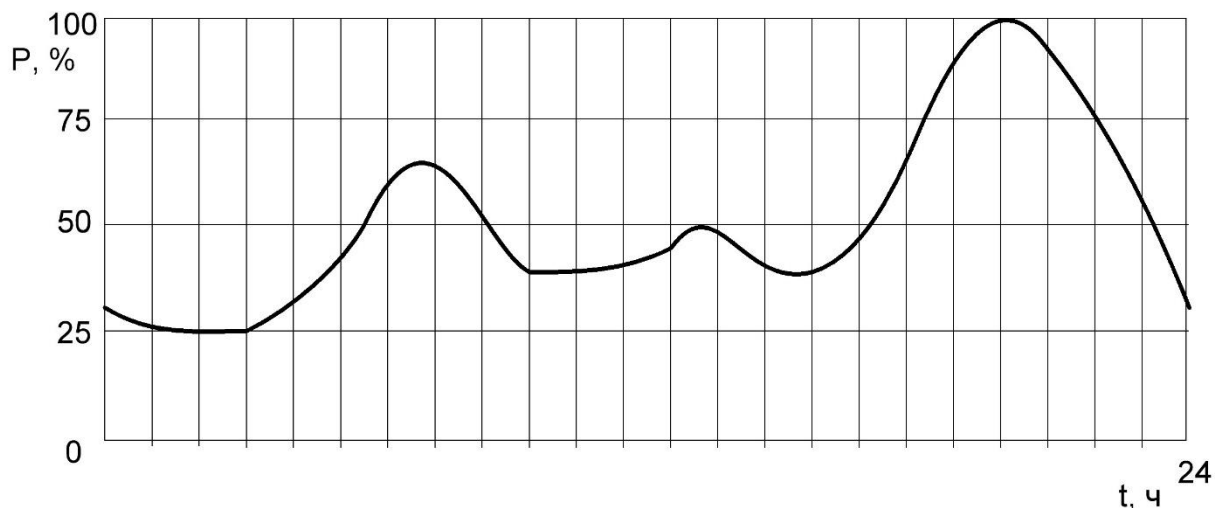


Рисунок 1 – Суточный график нагрузки коммунально-бытовых потребителей

Как можно увидеть на рисунке 2 [6] эти периоды не совпадают с периодом выработки электроэнергии ФЭУ, поэтому питание электроприемников происходит электроэнергией, сохраненной в накопителе. Мощность накопителя, в этом случае, рассчитывается из необходимости обеспечения электроприемников в максимумы, что неизбежно приведет к завышению емкости накопителя или сокращению его эффективного срока службы.

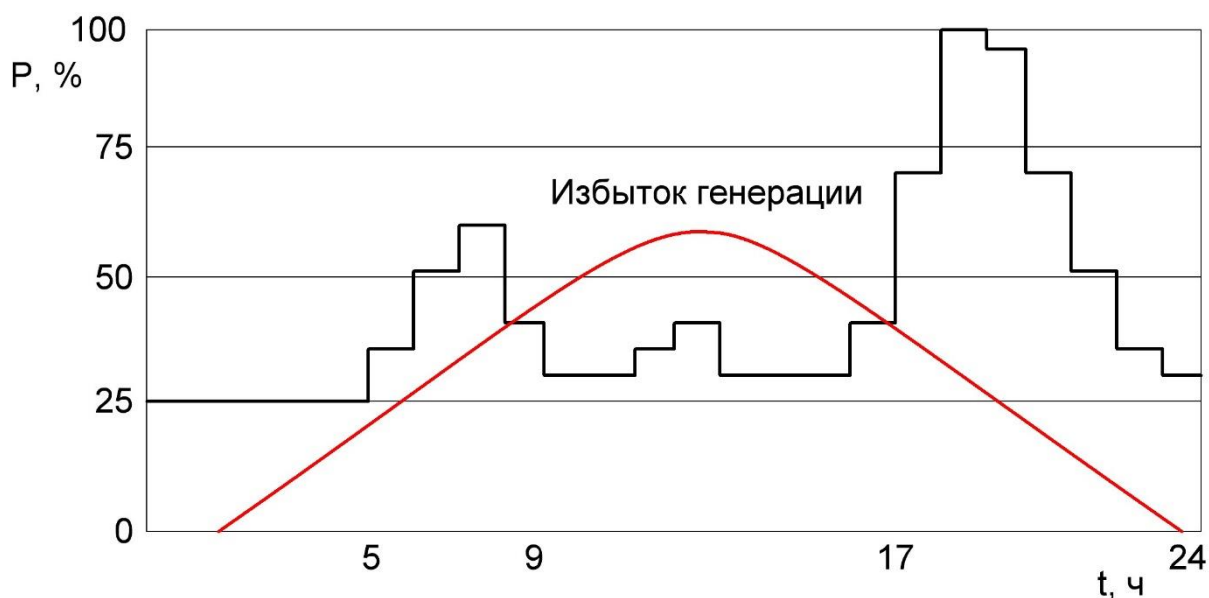


Рисунок 2 - Суточный график нагрузки и генерации ВИЭ

Логически верное решение – переместить работу части электроприемников из периодов максимума нагрузки в периоды избыточной

генерации оказывается невозможным по причине неразрывной связи работы некоторых электроприемников с жизненными ритмами человека

На данном этапе возникает обоснование неизбежности использования аккумулятора, а точнее нескольких аккумуляторов, кратно увеличивающих стоимость всей системы накопления электроэнергии.

Уменьшить стоимость системы накопления электроэнергии возможно отказавшись на данном этапе развития таких систем, от питания мощных электроприемников от аккумуляторов, оставив их подключенными к централизованной сети электроснабжения.

Сформулируем рабочую гипотезу: электроснабжение будем осуществлять от двух источников, первый – централизованная электросеть, обеспечивающая силовые электроприемники большой мощности; второй – ВИЭ с накопителем для электроприемников малой и средней мощности. Решается такая задача путем организации двух независимых электросетей – т.н. системы двух розеток.

Алгоритм работы системы двух розеток будем разрабатывать относительно возможностей генерации и потребностей нагрузки трех групп:

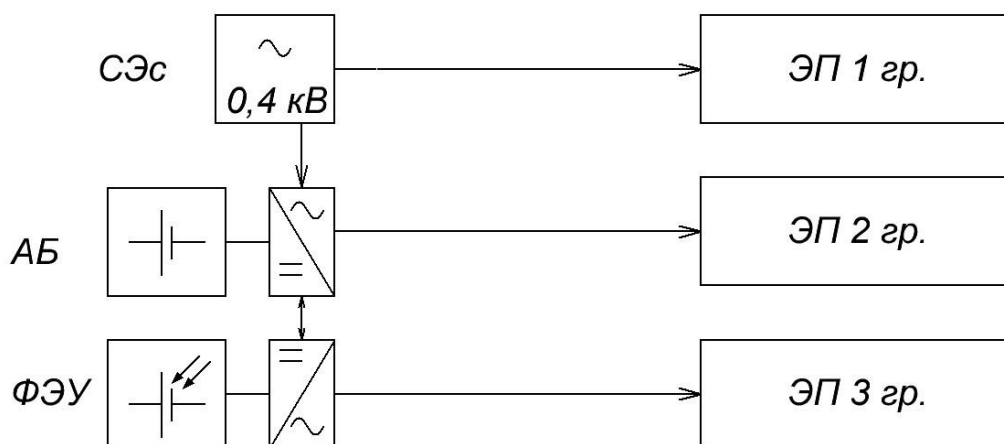
1 силовые электроприемники, работа которых жестко связана с жизненным циклом человека;

2 электроприемники переменной мощности;

3 электроприемники малой мощности.

Электроприемники представленного списка могут иметь еще несколько уровней классификации.

Для электроснабжения групп нагрузки согласно приведенного списка, воспользуемся моделью, показанной на рисунке 3.



ФЭУ – фотоэлектрическая установка, АБ – аккумулятор, СЭс – централизованная электросеть

Рисунок 3 – Схема модели электроснабжения жилого дома

Основная особенность работы данной модели заключается в разделении электроприемников условно на удобные и неудобные для работы в качестве нагрузки для конкретного типа аккумулятора. Концептуально выполняется не

удаление сетевого источника электроснабжения, а включение дополнительного источника, в рассматриваемом случае накопителя электроэнергии на основе аккумулятора, заряжаемого от фотоэлектрической панели. Удаление электроприемников, дающих значительное увеличение нагрузки в пиковые часы из системы электроснабжения с накопителем электроэнергии сделает график электрической нагрузки более равномерным. Коэффициент формы будет значительно приближен к единице, что обеспечит работу аккумулятора в наиболее эффективном режиме.

Блок-схема алгоритма системы «двух розеток» показана на рисунке 4.

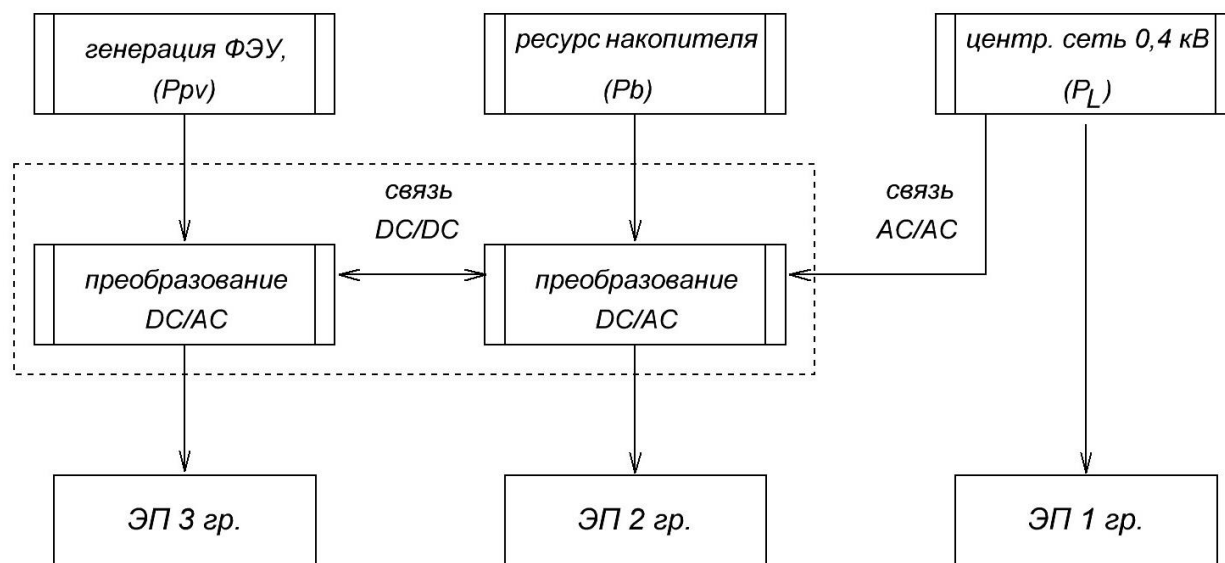


Рисунок 4 Блок-схема алгоритма работы системы ЭСн

Описание работы. В данной блок-схеме выделим правую часть, к которой относятся электроприемники первой группы, получающие гарантированно электроэнергию от сетевого источника. К данной группе отнесем «неудобные» с т.з. работы с накопителем электроэнергии электроприемники, например, электрический духовой шкаф, мультиварка, электрокаменка или другой мощный электроприемник, как правило нециклического режима работы.

Левая часть блок-схемы включает две группы электроприемников: ЭП 2 гр. и ЭП 3 гр., способных по своим параметрам работать в системе с накопителем электроэнергии. Различие между этими группами состоит в том, что для ЭП 3 гр. приоритетным источником электроэнергии является фотоэлектрический модуль, а для ЭП 2 гр. приоритетный источник – аккумулятор. Пример электроприемника, входящего в ЭП 2 гр. – освещение, а пример ЭП 3 гр. – стиральная машина и т.п. Принадлежность ЭП ко второй или третьей группам условная и может динамически изменяться.

Основным элементом управляющим электропитанием является контроллер, управляющий фотоэлектрическим модулем, а также процессом заряда и разряда аккумулятора. Благодаря DC/DC связи происходит поддержание уровня заряда аккумулятора, а также плавное подключения электропотребления запасенной в аккумуляторе энергии. В то же время, при

питании электроприемников группы ЭП 3, не происходит «лишнего» преобразования энергии, получаемой от фотоэлектрического модуля, а в случае недостатка мощности фотоэлектрических панелей, подключается ресурс аккумулятора. Так же происходит питание электроприемников группы ЭП 2, в которой приоритетным источником является аккумулятор, а в случае недостатка мощности выполняется ее дополнение из электросети.

Внедрение систем электроснабжения с накопителями электроэнергии в бытовой сектор испытывает значительные трудности, связанные с высокой стоимостью оборудования, в частности аккумулятора. Предлагается, на данном этапе использовать компромиссное решение, выбрав заведомо «удобные» электроприемники для работы с аккумулятором, а остальную нагрузку по-прежнему питать от централизованной электрической сети. Такая схема имеет положительный опыт внедрения в охранных системах и видеонаблюдении. Резервирование накопителя также будет обеспечиваться двумя источниками.

Список литературы

1. Доброго, К. В. Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло / К. В. Доброго // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 2. С. 160–170.
2. Белов В.Ф., Буткина А.А., Шамаев А.В., Модификация метода роя частиц для решения задачи оптимального управления накопителем электрической энергии в микросети. XLV Огаревские чтения: материалы науч. конф.: в 3 ч. Ч 2: Естественные науки. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017 – С. 103-109.
3. Лукутин Б. В., Муравьев Д. И. Имитационная модель фотодизельной системы электроснабжения с интеллектуальным управлением в Matlab/Simulink // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 52–62.
4. Викторова, Е. В. Выбор источника электроэнергии для индивидуального жилого дома [Электронный ресурс] / Е. В. Викторова, В. Б. Шлейников // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всерос. науч.-метод. конф., посвящ. 70-летию Оренбург. гос. ун-та, Оренбург, 30 янв. - 1 февр. 2025 г. / Оренбург. гос. ун-т ; ред. А. В. Зайцев. - Оренбург : ОГУ, 2025. - С. 1081-1085.
5. Бастрон А. В., и др. К вопросу о повышении эффективности проектных решений при разработке внутренних электрических сетей сельских домовладений // Вестник НГИЭИ. 2022. № 2 (129). С. 41–55.
6. Определение оптимальных параметров совместно устанавливаемых объекта возобновляемой генерации и накопителя энергии Малькова Я.Ю., Уфа Р.А. В сборнике: Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. Материалы V Международной научно-технической конференции. Чебоксары, 2021. С. 277-282.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

**Шустиков А.А., Влацкая Л.А., канд. техн. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»**

Федеральный закон №35-ФЗ «Об электроэнергетике» [1] устанавливает необходимость эффективного планирования и реализации мероприятий по развитию объектов электроэнергетики, направленных на улучшение качества и снижение стоимости услуг по передаче электроэнергии.

Распределительные электрические сети (РЭС), классом напряжения ниже 35 кВ, являются основой системы электроснабжения (СЭС), обеспечивая надёжную и качественную передачу электрической энергии конечным потребителям. В условиях роста объёмов потребления, увеличения доли распределённой генерации и старения инфраструктуры СЭС возникает необходимость в системном подходе к проектированию, реконструкции и управлению такими сетями.

Одной из важнейших задач при проектировании РЭС является выбор ее оптимальной конфигурации, обеспечивающий максимальную технико-экономическую эффективность проектных решений. Оптимальная схема сети позволяет минимизировать приведённые затраты, снизить потери активной мощности, повысить надёжность электроснабжения и упростить эксплуатацию. В то же время неоптимальный выбор может привести к необоснованному увеличению капитальных вложений, перегрузке отдельных элементов сети, росту удельных потерь электроэнергии и снижению коэффициента надёжности, что в перспективе потребует дорогостоящих реконструкций.

В условиях ограниченных инвестиционных ресурсов и ужесточения требований к энергоэффективности проектирования, разработка алгоритмов выбора оптимальной схемы РЭС остается актуальной задачей.

Задача выбора оптимальной конфигурации распределительной сети сводится к формированию нескольких альтернативных схем подключения узлов (например, схемы подключения трансформаторных подстанций, линий электропередач и др.) с последующей оценкой этих вариантов по принятым критериям и выбором наилучшего решения.

Поскольку каждый из разрабатываемых вариантов РЭС характеризуется различными параметрами, такими как протяженность линий, мощность оборудования, количество промежуточных пунктов и т.п., влияющими на общие капитальные вложения и эксплуатационные расходы, то основным критерием выбора наилучшего решения является экономический критерий, а именно совокупные затраты на создание и поддержание работоспособности сети.

Ввиду этого в работе представлен системный анализ методов, которые могут быть использованы для разработки алгоритма выбора оптимальной конфигурации РЭС по однокритериальной модели. Кратко охарактеризуем каждый из методов.

1. *Метод потенциалов* [2] – это специализированный алгоритм решения классической транспортной задачи линейного программирования (минимизация стоимости перевозок при заданных запасах поставщиков и спросе потребителей).

Основные преимущества метода применительно к задаче выбора оптимальной РЭС:

- эффективность – метод позволяет находить оптимальное решение достаточно быстро даже для больших размеров задач благодаря алгоритму простого итерационного улучшения решений;

- четкая логика – алгоритм обладает ясностью шагов и легко реализуется как вручную, так и средствами вычислительной техники;

- универсальность – подходит для широкого спектра задач оптимизации распределения ресурсов, включая электрические сети;

- минимизация затрат – основной целью метода является минимизация общих расходов на транспортировку электроэнергии, обеспечивая баланс между мощностью генераторов и потребителями нагрузки;

- простота проверки оптимальности – через вычисление потенциалов узлов легко проверить, достигнуто ли оптимальное решение.

К недостаткам следует отнести:

- ограничение на вид целевой функции – метод предполагает линейные зависимости между потоками мощности и стоимостью транспортировки. Однако, многие критерии принятия решения имеют нелинейные зависимости в записанных целевых функциях, например потери в линиях электропередач квадратично зависят от тока. Это ограничение снижает точность модели;

- ограниченность учета ограничений системы – например, при проектировании РЭС необходимо учитывать надежность поставок, уровень напряжения и устойчивость режимов работы, однако классический метод потенциалов часто игнорирует подобные факторы;

- отсутствие глобального оптимума – несмотря на достижение локально оптимального результата, гарантирующего минимальное значение целевой функции, существует вероятность нахождения лишь субоптимальных схем распределения нагрузок.

- итеративность процесса – иногда требует большого количества итераций для достижения точного решения, особенно в сложных сетях.

2. *Симплекс метод* [3] представляет собой последовательное улучшение найденного решения путем перехода от одной вершины многогранного множества к другой с лучшим значением целевой функции.

Достоинства метода:

- гарантированное получение оптимального решения – если задача имеет оптимальное решение, симплекс-метод обязательно найдет его;

– алгоритмическая простота реализации – этапы симплекс-метода четко определены и легко реализуемы как вручную, так и с использованием компьютерных программ;

– высокое быстродействие – для многих реальных задач симплекс-метода сходится довольно быстро.

– адаптивность – возможность изменения начальных значений коэффициентов матрицы ограничений и целевой функции позволяют оперативно адаптироваться к изменению конфигурации сети или спроса потребителей;

– устойчивость – наличие четких критериев останова и прозрачность расчета позволяют отслеживать возможные аномалии в процессе решения задач.

Недостатки симплекс-метода:

– высокая чувствительность к размерности задачи – для реальных электрических сетей с большим числом узлов и различными ограничениями симплекс-метод может стать ресурсоемким процессом;

– необходимость преобразований задачи – требуется предварительная подготовка задачи, такая как приведение неравенств к равенствам путем введения искусственных переменных, что увеличивает сложность вычислений;

– игнорирование особенностей энергетической инфраструктуры – классический симплекс-метод не учитывает особенности электроэнергетических сетей, что сужает область его применимости.

– потеря точности – итерации симплекс-методом могут приводить к накоплению ошибок округления, особенно в системах с большой числовой точностью, что влияет на качество конечного решения;

– проблема начальной базисной точки – необходимо выбирать начальное базисное решение, которое удовлетворяло бы всем ограничениям задачи, что иногда бывает затруднительным.

3. *Метод Дейкстры* [4] решает задачу поиска кратчайшего пути от источника до всех узлов в графе с неотрицательными весами. Сам по себе Дейкстра не решает классическую транспортную задачу, но является ключевым блоком в сетевых задачах потоков и маршрутизации, которые часто возникают при проектировании РЭС.

К достоинствам метода относятся:

– эффективность и скорость – благодаря простоте реализации и небольшой временной сложности, метод способен быстро решать задачи поиска кратчайшего пути даже для крупных графов, представляющих электрические сети;

– оптимальность найденного решения – алгоритм гарантирует нахождение кратчайшего пути между заданными узлами графа;

– учет стоимости соединений – методу присуща гибкость относительно назначения весов дуг графа, позволяя использовать такие критерии оценки как длина трассы, тип кабеля, условия эксплуатации и прочие экономические показатели;

– применение в динамических ситуациях – метод может использоваться для поиска кратчайших путей в режиме реального времени, адаптируясь к изменениям топологии сети (добавление новых точек подключения, отключение старых).

– масштабируемость – даже для крупных электрических сетей с тысячами объектов метод сохраняет свою работоспособность и обеспечивает разумное время расчета.

К недостаткам относятся:

– невозможность обработки отрицательных весов – метод не эффективно работает в ситуациях, когда веса некоторых рёбер графа являются отрицательными. В электроэнергетике такое редко встречается, но теоретически возможно, например, в случаях субсидирования определённых участков сети;

– ориентация исключительно на длину маршрута – поскольку алгоритм метода направлен на минимизацию длины пути, он не принимает во внимание ряд важных факторов, характерных для РЭС: потери энергии; надёжность линий связи; перегрузочные способности отдельных элементов сети.

– зависимость от структуры графа – если структура сети сильно неоднородна или отличается сложной геометрией размещения узлов, алгоритм может давать неоптимальные результаты, приводящие к повышенному износу или потере ресурса отдельных элементов сети.

4. *Метод роя частиц* [5] работает, поддерживая популяцию возможных решений (частиц) и перемещая их в пространстве решений. Перемещения подчиняются принципу наилучшего найденного в этом пространстве положения, которое постоянно изменяется при нахождении частицами более выгодных положений.

К достоинствам метода относятся:

– простота реализации – не требует специальных знаний о структуре функций или матриц;

– параллельная обработка – возможность одновременного исследования различных участков пространства решений, что ускоряет процесс поиска наилучшей конфигурации сети;

– устойчивость к локальным минимумам – способность метода избегать попадания в локальные экстремумы;

– соотношение качества решения и временных затрат – несмотря на то, что метод может требовать больше времени на поиск решения по сравнению с некоторыми традиционными методами, зачастую он показывает высокую производительность при работе с большими наборами данных и сложных пространственных структурах;

– возможность применения в условиях неопределенности – метод допускает работу с плохо структурированными данными и случайными изменениями параметров, что полезно при наличии неполных сведений о нагрузках, потерях и ресурсах сети.

Недостатки метода:

– чувствительность к начальному положению частиц – начальная инициализация положения частиц может значительно повлиять на итоговое решение (замедлить или ухудшить результаты).

– медленная сходимость – иногда алгоритм демонстрирует низкую скорость сходимости, особенно при обработке больших или сложных сетевых структур, что затрудняет своевременное принятие инженерных решений;

– отсутствие гарантии нахождения глобального минимума – метод не гарантирует, что найденное решение действительно оптимально среди всех возможных вариантов. Особенно остро эта проблема проявляется при большом числе альтернативных схем;

– проблемы масштабируемости – при увеличении размера задачи количество необходимых вычислений растет быстрее, чем у традиционных методов, что повышает требования к вычислительным ресурсам.

– требует настройки параметров – эффективность метода зависит от правильного подбора скорости перемещения частиц, параметра притяжения, когнитивного фактора и социального взаимодействия. Настройка этих параметров требует опыта и экспериментов.

– возможность повторных результатов – из-за стохастического характера метода возможны случаи, когда одна и та же схема выбирается повторно или не обнаруживаются новые перспективные варианты, что приводит к неэффективному расходованию вычислительных ресурсов.

5. *Метод коммивояжера* [6] заключается в поиске оптимального маршрута, проходящего через все заданные точки (пункты, города) по одному разу и возвращающегося в исходную точку.

Достоинствами метода являются:

– простота постановки задачи, что облегчает понимание проблемы инженерами-проектировщиками и персоналом эксплуатационной службы;

– универсальность применения – метод может быть использован для различных задач в области электроэнергетики, таких как размещение подстанций, организация трассировки кабельных каналов, расчет схем резервирования и перераспределения мощностей.

– поддержка взвешивания дуг – графовая природа решения задачи позволяет назначать каждому ребру свой вес, что позволяет включить в анализ такие факторы, как расстояние, стоимость материалов, наличие препятствий, тип грунта и т.п.;

– адаптивность – варьирование структуры графа путем добавления или удаления вершин и дуг позволяет быстро модифицировать существующие решения при изменении проектной документации или появлении новых потребителей.

Недостатками метода являются:

– вычислительная сложность – проблема относится к классу NP-трудных задач, что означает экспоненциальный рост времени расчётов с увеличением количества городов (узлов сети). Поэтому точное решение становится невозможным для больших сетей;

– выбор подходящего критерия оптимальности – традиционный критерий задачи (длина пути) не всегда адекватно отражает потребности реальных распределительных сетей, где важны также равномерность загрузки устройств, минимальные потери энергии, обеспечение бесперебойности подачи электроэнергии;

– отсутствие гарантий поиска оптимального решения, иногда по результатам решения возможны предложения компромиссных вариантов;

– избыточность полноты перебора – точное решение задачи требует рассмотрения всех возможных перестановок узлов графа, что неприменимо для большинства практических случаев из-за огромного объема вычислений;

– отсутствие встроенного механизма устранения циклических маршрутов – в классическом подходе отсутствует автоматическое исключение дублирования или избыточности в маршрутах, что создает трудности при применении метода для реальной электроэнергетической инфраструктуры.

Краткие результаты проведенного сравнительного анализа методов выбора оптимальной конфигурации распределительной электрической сети представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Системный анализ методов выбора оптимальной конфигурации распределительной электрической сети

<i>Методы</i>	<i>Достоинства</i>	<i>Недостатки</i>
<i>Метод потенциалов</i>	<ul style="list-style-type: none"> – эффективность; – четкая логика; – универсальность; – минимизация затрат; – простота проверки оптимальности. 	<ul style="list-style-type: none"> – ограничение на вид целевой функции; – ограниченность учета ограничений системы; – отсутствие глобального оптимума; – итеративность процесса.
<i>Симплекс метод</i>	<ul style="list-style-type: none"> – гарантированное получение оптимального решения; – алгоритмическая простота реализации; – высокое быстродействие; – адаптивность; – устойчивость расчетов. 	<ul style="list-style-type: none"> – высокая чувствительность к размерности задачи; – необходимость преобразований задачи; – игнорирование особенностей энергетической инфраструктуры; – потеря точности; – проблема начальной базисной точки.
<i>Метод Дейкстры</i>	<ul style="list-style-type: none"> – эффективность и скорость; – оптимальность найденного решения; – учет стоимости соединений; – применение в динамических ситуациях; – масштабируемость. 	<ul style="list-style-type: none"> – невозможность обработки отрицательных весов; – ориентация исключительно на длину маршрута; – зависимость от структуры графа.
<i>Метод роя частиц</i>	<ul style="list-style-type: none"> – простота реализации; – параллельная обработка; – устойчивость к локальным минимумам; – соотношение качества решения и временных затрат; – возможность применения в 	<ul style="list-style-type: none"> – чувствительность к начальному положению частиц; – медленная сходимость; – проблемы масштабируемости; – требует настройки параметров; – возможность повторных результатов.

	условиях неопределенности.	
<i>Метод коммивояжера</i>	<ul style="list-style-type: none"> – простота постановки задачи; – универсальность применения; – поддержка взвешивания дуг; – адаптивность. 	<ul style="list-style-type: none"> – вычислительная сложность; – выбор подходящего критерия оптимальности; – отсутствие гарантий оптимального решения; – избыточность полноты перебора; – отсутствие встроенного механизма устранения циклических маршрутов.

Проведенный сравнительный анализ методов позволил заключить, что наиболее перспективным является метод потенциалов, потому что он простой в плане программной реализации и обеспечивает сокращение вычислительного времени. Однако программных ресурсов, осуществляющих выбор оптимального варианта распределительной сети на базе метода потенциалов с использованием новых вычислительных технологий, не выявлено.

Список литературы

1 Федеральный закон «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 № 35-ФЗ. – Режим доступа : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/. – дата обращения 05.01.26.

2 Семенова, Л.А. Методика выбора оптимальной логистической схемы электроснабжения промышленного предприятия / Л.А. Семенова, Р.Р. Аглуллин // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы : труды IX Всероссийской научно-технической конференции. – Оренбург: ОГУ, 2018. – С. 340-344.

3 Источников, Р.О. Решение транспортной задачи на основе симплекс-метода / Р.О. Источников // Новое время – новые исследования. – Петрозаводск: МЦНП МЦНП «Новая наука», 2023. – С. 57-61.

4 Влацкая, Л.А. Выбор оптимальной трассы ВЛ 0,4-10 кВ на основе алгоритма Дейкстры // Л.А. Влацкая, Д.А. Швидок // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы : материалы XV Всерос. науч.-техн. конф. – Оренбург : ОГУ, 2024. – С. 209-212.

5 Зарипов, Е.А. Моделирование и оптимизация характеристик интеллектуальной транспортной системы «умного города» с использованием гибридных эволюционных алгоритмов / Е.А. Зарипов, А.С. Акопов // Бизнес-информатика. – 2025. – Т. 19. – № 1. – С. 34-39.

6 Каримов, Р.А. Решение задачи коммивояжера двумя различными способами: «Венгерский метод» и «Метод ветвей и границ» / Р.А. Каримов // Международный студенческий научный вестник. – 2019. – № 1. – С. 41-48.

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Ямансарин И.И., канд. техн. наук, доцент,

Падеев А.С., канд. техн. наук, доцент,

Сурков Д.В., канд. техн. наук

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Оренбургский государственный университет»

Непременным условием работы асинхронного электродвигателя является наличие вращающегося магнитного поля. Магнитное поле создается обмоткой статора и проходит как по участкам стального магнитопровода, так и через воздушный зазор между статором и ротором. Воздушный зазор необходимый для вращения ротора стараются сделать как можно меньше. При этом минимальная величина ограничивается технологическими трудностями при изготовлении двигателя. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше величина намагничивающего тока, так как большая часть МДС создаваемой обмоткой статора приходится на воздушный зазор.

В реальных двигателях воздушный зазор между статором и ротором неравномерный. Это обусловлено зубчатостью внутренней поверхности статора и внешней поверхности ротора. Неравномерность воздушного зазора и пазовость магнитопровода приводят к неравномерности распределения магнитной индукции в воздушном зазоре. В учебной литературе для упрощения понимания процессов, происходящих в электрических машинах, воздушный зазор считают равномерным. Принято считать распределение индукции в виде синусоиды либо трапеции, что незначительно искажает расчеты.

При идеальном случае, т.е. при равномерном воздушном зазоре, отсутствии дефектов обмотки статора и ротора, распределение индукции в воздушном зазоре симметрично. Кривая распределения индукции разложенная в ряд Фурье содержит основную гармонику и нечетные гармоники зубцового порядка. Наличие межвитковых замыканий в обмотке статора, обрыве стержней обмотки ротора, эксцентриситете ротора приводит к искажению кривой распределения индукции в воздушном зазоре.

В данной работе приведены результаты моделирования магнитной индукции в воздушном зазоре асинхронного электродвигателя 100S2. Геометрические размеры магнитной системы, обмоточные данные электродвигателя взяты из справочной литературы. Численные расчеты проводилось в программе для инженерного анализа и двумерного моделирования методом конечных элементов Elcut 7. Расчеты проводились при исправном электродвигателе, при межвитковых замыканиях обмотки статора, эксцентриситете ротора, обрыве одного из стержней обмотки ротора.

На рисунке 1 показана геометрическая модель асинхронного электродвигателя 100S2 и картина магнитного поля в окне программы Elcut 7.

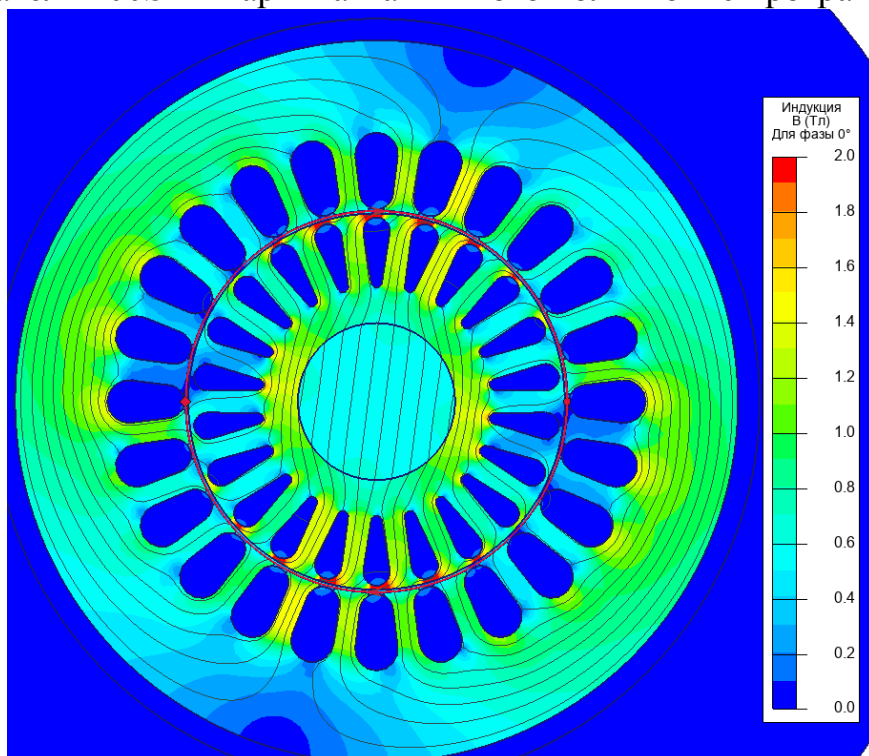
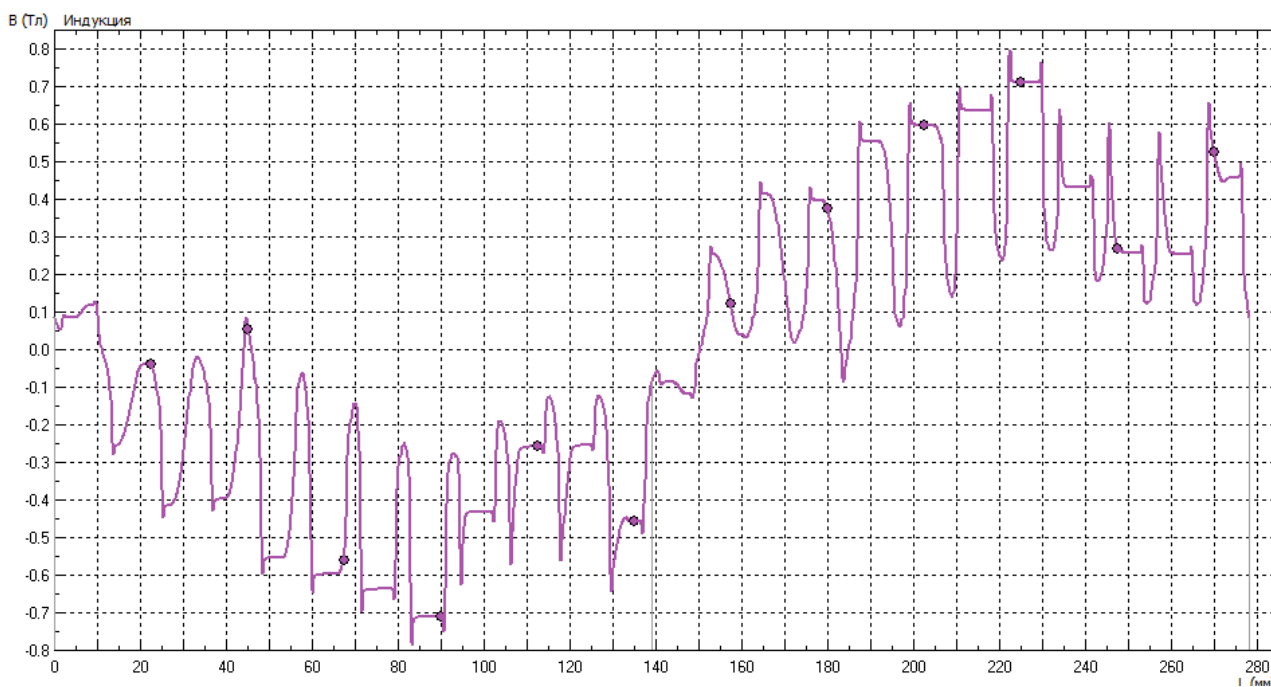


Рисунок 1 - Геометрическая модель асинхронного электродвигателя 100S2 и картина поля в окне программы Elcut 7.

На рисунке 2 показано распределение магнитной индукции в воздушном зазоре электродвигателя. На рисунке 2 можно отметить наличие первой гармоники поля и наличие зубцовых гармоник. Определение порядка зубцовых гармоник на основе распределения магнитного поля представлено в [1].



2 Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре электродвигателя.

Гармонический анализатор встроенный в программу Elcut 7 позволяет разложить в ряд Фурье кривую распределения индукции в воздушном зазоре. Результаты разложения в ряд Фурье нормальной составляющей индукции магнитного поля в воздушном зазоре представлены на рисунке 3.

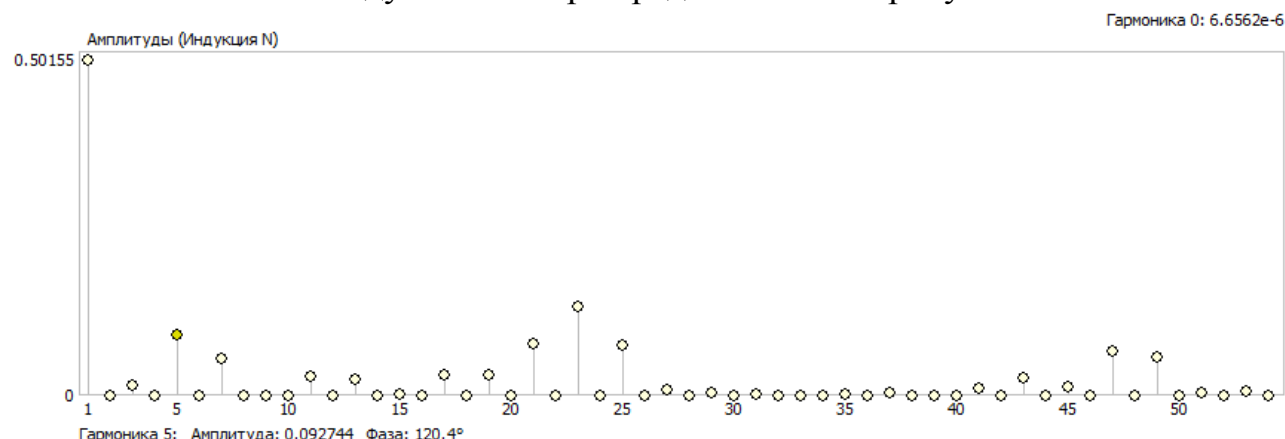


Рисунок 3 - Гистограмма гармонического состава индукции магнитного поля в воздушном зазоре.

По данным представленным на рисунках 1 - 3 можно сделать следующие выводы:

- индукция на участках магнитопровода соответствует расчетным данным, направление и величина индукции соответствует двухполюсной машине;

- в составе индукции в воздушном зазоре кроме основной гармоники поля присутствуют гармоники № 3, 5, 7, зубцовые гармоники первого порядка №21, 23, 25, а также гармоники второго порядка №43, 47, 49.

- четные гармоники отсутствуют.

В реальности таких идеальных электродвигателей в природе не существует. В процессе производства возникают неточности обработки, приводящие к эксцентриситету ротора и неравномерности воздушного зазора. Могут появиться неисправности в виде межвитковых замыканий обмотки статора и обрыва стержней ротора. Приведенные выше неисправности приводят к искажению источника магнитного поля, к неравномерности сопротивления магнитной цепи, что в свою очередь отражается на форме распределения индукции магнитного поля в воздушном зазоре. Результаты моделирования в программе Elcut 7 приведены на рисунке 4.

Предварительно, по рисунку 4 видно, что в кривой распределения индукции в воздушном зазоре имеется первая гармоника и зубцовые гармоники. Но при различных неисправностях зубцовые гармоники поля значительно отличаются от гармоник исправного двигателя. Отдельные зубцы на гармониках становятся больше либо меньше по амплитуде, а также изменяют свою форму.

Более подробный анализ позволяет выполнить преобразование полученных кривых поля в ряд Фурье. Результаты преобразования сведены в таблицу 1. В первом столбце записаны номера гармоник, указаны наиболее интересные с точки зрения авторов. Во втором столбце показаны абсолютные

значения амплитуд соответствующих гармоник индукции в воздушном зазоре исправного асинхронного электродвигателя. В третьем, пятом и седьмом столбце указаны амплитуды соответствующих гармоник индукции в воздушном зазоре при наличии различных дефектов. В столбцах четыре, шесть и восемь указаны амплитуды соответствующих гармоник в процентном соотношении к индукции второго столбца. На рисунке 4 может быть оси подписать?

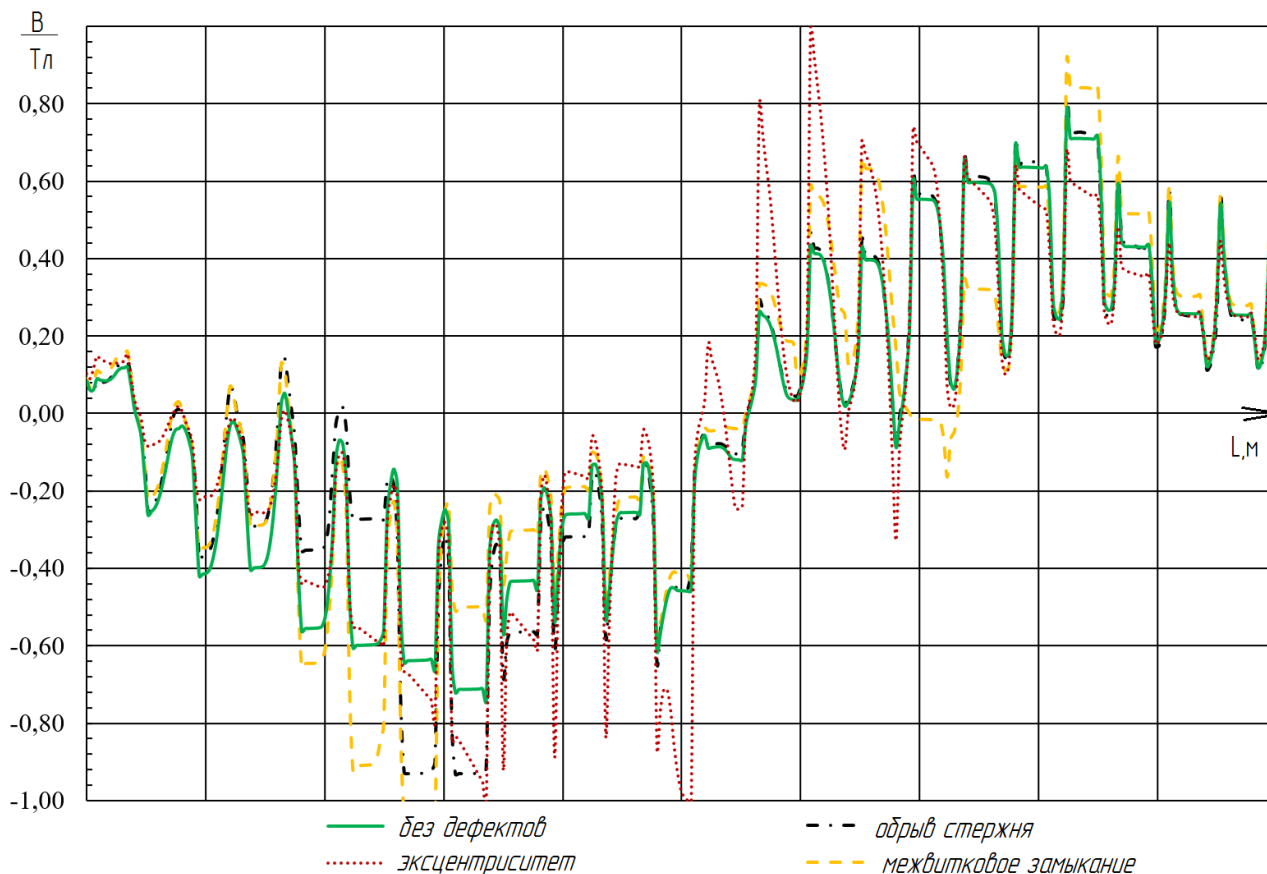


Рисунок 4 – Распределение индукции в воздушном зазоре асинхронного электродвигателя при отсутствии дефектов, при эксцентриситете ротора, обрыве стержня обмотки ротора, межвитковом замыкании обмотки ротора.

По данным таблицы 1 видно, что амплитуда 1-й гармоники при появлении смоделированных дефектов изменяется не значительно. Амплитуда 3-й гармоники значительно изменяется при обрыве стержня обмотки ротора (рост на 186%). Амплитуда 5-й гармоники увеличивается на 56% при межвитковых замыканиях обмотки статора. При эксцентриситете ротора амплитуды гармоник с 1 по 10-ю изменяются меньше чем при межвитковых замыканиях и обрыве стержня обмотки ротора. Характерной чертой для всех трех неисправностей является многократное увеличение (на 2997-61778%) амплитуд четных гармоник 2, 4, 6, 8. Например амплитуда 4-й гармоники увеличивается на 61778% при межвитковых замыканиях обмотки ротора.

Амплитуды зубцовых гармоник первого порядка 21, 23, 25 изменяются не значительно от 1 до 23%. При этом кратно увеличиваются амплитуды четных гармоник 20, 22, 24, 26 от 48 до 7030%.

Амплитуды гармоник второго порядка 45 - 50 имеют такой же характер, как и амплитуды зубцовых гармоник первого порядка.

Данные таблицы 1 согласуются с основными положениями теории электрических машин. Любой дефект в конструкции приводит к нарушению симметрии магнитного поля асинхронного электродвигателя, что выражается в появлении в гармоническом составе магнитного поля четных гармоник. В нормальном режиме работы электрической машины, четные гармоники на уровне погрешности вычисления.

Таблица 1 Гармонический состав индукции магнитного поля в воздушном зазоре асинхронного двигателя без дефектов и с наличием различных дефектов

№ гармоник	Отсутствие дефектов	Межвитковое замыкание		Эксцентриситет ротора		Обрыв стержня ротора	
	V_i , Тл	$V_{мвз1}$, Тл	$V_{мвз1}$, %	$V_{эр}$, Тл	$V_{эр}$, %	$V_{ос}$, Тл	$V_{ос}$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,5016	0,4977	-1	0,4997	0	0,5148	3
2	0,0005	0,0984	18151	0,0904	16661	0,0620	11396
3	0,0177	0,0160	-10	0,0115	-35	0,0507	186
4	0,0002	0,1265	61778	0,0405	19707	0,0457	22253
5	0,0927	0,1450	56	0,1192	28	0,1256	35
6	0,0001	0,0652	48183	0,0584	43151	0,0330	24312
7	0,0555	0,0017	-97	0,0806	45	0,0465	-16
8	0,0003	0,0094	2997	0,0300	9786	0,0240	7799
9	0,0019	0,0368	1866	0,0128	584	0,0219	1069
10	0,0002	0,0362	18756	0,0164	8449	0,0199	10257
11	0,0297	0,0206	-31	0,0419	41	0,0312	5
-	-	-	-	-	-	-	-
17	0,0330	0,0053	-84	0,0543	64	0,0317	-4
18	0,0002	0,0344	14607	0,0358	15226	0,0170	7177
19	0,0325	0,0556	71	0,0539	66	0,0489	51
20	0,0006	0,0458	7030	0,0439	6734	0,0204	3079
21	0,0779	0,0693	-11	0,0961	23	0,0640	-18
22	0,0020	0,0347	1612	0,0603	2872	0,0065	220
23	0,1349	0,1311	-3	0,1648	22	0,1397	4
24	0,0016	0,0102	556	0,0558	3492	0,0023	48
25	0,0775	0,0784	1	0,0709	-9	0,0756	-3
26	0,0007	0,0111	1444	0,0348	4752	0,0058	709
-	-	-	-	-	-	-	-
45	0,0146	0,0109	-26	0,0113	-22	0,0122	-17
46	0,0019	0,0166	770	0,0135	607	0,0033	72
47	0,0668	0,0651	-3	0,0700	5	0,0702	5
48	0,0012	0,0020	65	0,0106	767	0,0048	291
49	0,0585	0,0601	3	0,0657	12	0,0593	1
50	0,0004	0,0083	2232	0,0256	7081	0,0066	1758

По гармоническому составу магнитной индукции в воздушном зазоре

вполне можно определить наличие неисправностей: межвитковые замыкания обмотки статора, эксцентриситет ротора, обрыв стержней ротора. Трудность в диагностировании заключается в сложности непосредственного измерения магнитной индукции в воздушном зазоре. Магнитное поле вне корпуса машины является отголоском магнитного поля в воздушном зазоре. Поэтому при должном обосновании есть перспектива диагностирования неисправностей по внешнему магнитному полю представленному в работах [3,4].

Список литературы

1. Ямансарин, И. И. Особенности определения амплитуд гармоник внешнего магнитного поля асинхронного двигателя [Электронный ресурс] / И. И. Ямансарин, М. П. Саликов, А. С. Падеев // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : сб. материалов Всерос. науч.-метод. конф., Оренбург, 26-27 янв. 2023 г. / Оренбург. гос. ун-т ; ред. А. В. Пыхтин. - Оренбург : ОГУ, 2023. - . - С. 1211-1213. . - 3 с.

2. Ток обмотки статора и внешнее магнитное поле асинхронного электродвигателя [Электронный ресурс] / И. И. Ямансарин, М. П. Саликов, А. С. Падеев, Д. В. Сурков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2023. - Т. 66, № 1. - С. 55-61. . - 7 с.

3 Падеев, А. С. Высшие гармоники магнитного поля в асинхронной машине при нарушении равномерности воздушного зазора [Электронный ресурс] / А. С. Падеев, И. И. Ямансарин, Д. В. Сурков // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы : материалы XII Всерос. науч.-техн. конф., 28-30 окт. 2021 г., Оренбург / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбург. гос. ун-т". - Электрон. дан. - Оренбург : ОГУ, 2021. - . - С. 104-109. . - 6 с.