

Министерство образования Республики Беларусь
Белорусский национальный технический университет
Энергетический факультет



ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
Материалы 81 – й научно – технической конференции сту-
дентов и аспирантов
«Актуальные проблемы энергетики»
(Апрель 2025г.)

Минск БНТУ 2025

УДК 621.311(06)

ББК 31.2я43

Э 45

Редакционная коллегия:

Пономаренко Евгений Геннадьевич – декан энергетического факультета БНТУ, кандидат технических наук, доцент;

Новаш Иван Владимирович – к.т.н., доцент, профессор кафедры «Электротехника и электроника»;

Дерюгина Елена Александровна – к.т.н., доцент, заведующая кафедрой «Электроснабжение».

Составитель:

Жуковская Т.Е. – старший преподаватель кафедры «Электротехника и электроника» БНТУ

В сборник включены материалы секции «Электроэнергетика и электротехника». 81 – й научно-технической конференции студентов и аспирантов БНТУ «Актуальные проблемы энергетики» (Апрель 2025 г.).

Статьи печатаются в авторской редакции

Белорусский национальный технический университет.

Энергетический факультет.

пр - т Независимости, 65/2, г. Минск, Республика Беларусь

Тел.: (017) 292-42-32 Факс: 292-71-73

E-mail: ef@bntu.by

<http://www.bntu.by/ef.html>

© Жуковская Т.Е. редак., комп. дизайн.

© БНТУ ЭФ, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....	7
П.А. ЧИБИСОВА, Д.В. БЕРДОВСКИЙ.....	7
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – С.В. КОНСТАНТИНОВА, К.Т.Н., ДОЦЕНТ,	7
ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОТЛОВ НА ТЭЦ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕПЛООВОГО ГРАФИКА НАГРУЗКИ	13
И.В. ПРИЛУЦКИЙ.....	13
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – В.П. СЧАСТНЫЙ, К.Т.Н., ДОЦЕНТ.....	13
МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	17
А.А. МАРТИНЧИК, Д.И. РЫШКЕЛЬ	17
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – С.В. КОНСТАНТИНОВА, К.Т.Н., ДОЦЕНТ,	17
НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗРАБОТКЕ И ПРОИЗВОДСТВЕ КАБЕЛЕЙ.....	22
Е.Д. МИХАЛЫЦЕВИЧ, Е.Р. МЕДОВСКИЙ, А.И. НОВИК	22
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – С.В. КОНСТАНТИНОВА, К.Т.Н., ДОЦЕНТ,	22
ИЗМЕРЕНИЕ ЯРКОСТИ	26
П.А. ЧИБИСОВА, Д.В. БЕРДОВСКИЙ.....	26
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – В.Б. КОЗЛОВСКАЯ, К.Т.Н., ДОЦЕНТ,	26
СВЕТОВОДЫ. ЧТО СОБОЙ ПРЕДСТАВЛЯЮТ И ГДЕ ПРИМЕНЯЮТСЯ	31
А.А. МАРТИНЧИК, Д.И. РЫШКЕЛЬ	31
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – В.Б. КОЗЛОВСКАЯ, К.Т.Н., ДОЦЕНТ,	31
СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННО-ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	38
А.А. КОТ, К.В. ГАЙКОВ.....	38
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – СЧАСТНЫЙ В.П., К.Т.Н., ДОЦЕНТ.....	38
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	45
Е. И. КАШКЕВИЧ, Н.Д. ШИБЕКО	45
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – С. В. КОНСТАНТИНОВА, К.Т.Н., ДОЦЕНТ	45
АРХИТЕКТУРНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ.....	53
Е.Д. МИХАЛЫЦЕВИЧ, Е.Р. МЕДОВСКИЙ, А.И. НОВИК	53
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – В.Б. КОЗЛОВСКАЯ, К.Т.Н., ДОЦЕНТ,	53
ИНДУКЦИОННЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ С ЧАСТОТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ.....	56
И.И. КИРИЛЮК	56
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – СЧАСТНЫЙ В.П., К.Т.Н., ДОЦЕНТ.....	56
РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПЕРЕГРУЗКОЙ	61
И.С. ШМАНАЙ, М.Г. СЕНЬКО.....	61
НАУЧНЫЙ ПРЕПОДАВАТЕЛЬ – С. В. КОНСТАНТИНОВА, К.Т.Н., ДОЦЕНТ	61
ДВИГАТЕЛИ С ДВОЙНЫМ РОТОРОМ СЕС МОТОР КОЛЕСО	67
Д.В. КУХНОВЕЦ, М.С. МАРЦИНКЕВИЧ.....	67
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – С.В. КОНСТАНТИНОВА, К.Т.Н., ДОЦЕНТ	67
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИНХРОННЫХ МАШИН НА АТОМНЫХ СТАНЦИЯХ.....	72
И.А. ЧЕРНИК, Д.А. ДАВЫДОВИЧ	72
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – СЧАСТНЫЙ В.П., К.Т.Н., ДОЦЕНТ.....	72
СОВМЕЩЕННАЯ ОБМОТКА АСИНХРОННЫХ МАШИН	75
А.А. КРЕЧКО	75
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – С.В. КОНСТАНТИНОВА, К.Т.Н., ДОЦЕНТ	75
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ	81
Е.С. БОНДАРЧУК	81
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – Т.М. ЖУКОВСКАЯ, СТАРШИЙ ПРЕПОДАВАТЕЛЬ.....	81

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ DALI НА ПРИМЕРЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА...	87
Е.С. Бондарчук	87
Научный руководитель – Т.М. Жуковская, преподаватель	87
КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ	97
Е. О. ЛУГАВЦОВ, А.Д. БОБКО	97
Научный преподаватель – С.В. КОНСТАНТИНОВА, К.Т.Н., ДОЦЕНТ	97
АНАЛИЗ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ СВЕТА ВО ВНУТРЕННЕМ ОСВЕЩЕНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	101
П.А. ЧИБИСОВА, Д.В. БЕРДОВСКИЙ	101
Научный руководитель – В.Н. КАЛЕЧИЦ, К.Т.Н.,	101
ВЫБОР КОНФИГУРАЦИИ ЛИНИИ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СРАВНИТЕЛЬНЫХ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ СВЕТИЛЬНИКОВ	107
А.Д. БОБКО, Е.О. ЛУГАВЦОВ	107
Научный руководитель – КАЛЕЧИЦ В. Н., К.Т.Н.	107
РАЗВИТИЕ МИНСКОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	111
Я.В.ТИБЕЖ	111
Научный руководитель – Е.А. ДЕРЮГИНА, К.Т.Н., ДОЦЕНТ	111
СОВРЕМЕННЫЕ КИТАЙСКИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ	115
Чжан Чжэнь	115
Научный руководитель – Е. А. ДЕРЮГИНА, К.Т.Н., ДОЦЕНТ	115
ПИКОВО-РЕЗЕРВНЫЙ ЭНЕРГОИСТОЧНИК	119
Н.А. ПОПОВ	119
Научный руководитель – КЛИМКОВИЧ П.И., СТАРШИЙ ПРЕПОДАВАТЕЛЬ	119
СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ	124
В.И. ГЛУШИЦ, Д.А. ВЛАСОВЕЦ	124
Научный руководитель – АРТЁМЕНКО К.И., СТАРШИЙ ПРЕПОДАВАТЕЛЬ	124
ПРОИЗВОДСТВО И ВЫДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ВЕТРЯНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ	127
К. Д. ДЕНИСЕНКОВ, А. М. МАЛАЙЧУК	127
Научный руководитель – В. А. БУЛАТ, К.Т.Н., ДОЦЕНТ	127
НОВЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ	131
К.И. КУРИЛОВИЧ, Д.С. АНТОНОВИЧ	131
Научный руководитель – АРТЁМЕНКО Е.А., АССИСТЕНТ	131
РЕЗИСТИВНО ЗАЗЕМЛЁННАЯ НЕЙТРАЛЬ В ВОЗДУШНЫХ И КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ	135
М.В. УЛАСЕВИЧ, А.С. МИСУНО	135
Научный руководитель – А.Г. ГУБАНОВИЧ, К.Т.Н., ДОЦЕНТ	135
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ	140
И.С. ЯСКОВЕЦ, Д.С. ЧУРКО	140
Научный руководитель – В.Ю. РУМЯНЦЕВ, К.Т.Н., ДОЦЕНТ	140
СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	144
Д.Г. ЯЦУХНО	144
Научный руководитель – Я.В. ПОТАЧИЦ, К.Т.Н., ДОЦЕНТ	144
СРАВНЕНИЕ КОМПАКТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПЛОСКИМ ВЕРТИКАЛЬНЫМ И ПАРАБОЛИЧЕСКИМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПРОВОДОВ В ФАЗЕ	147
С.Ю. ПАНШИН, Д.В. ТЕЛИЦА	147
Научный руководитель – А.Л. СТАРЖИНСКИЙ, К.Т.Н., ДОЦЕНТ	147
СРАВНЕНИЕ ОДНОЦЕПНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 220 КВ С ТРЕХКОАКСИАЛЬНЫМИ РАДИАЛЬНЫМИ СХЕМАМИ С ТРЕМЯ И ШЕСТЬЮ ПРОВОДАМИ В ФАЗЕ	151
И.Н. АДАМОВИЧ, К.Д. СЫРЦОВ	151
Научный руководитель – А.Л. СТАРЖИНСКИЙ, К.Т.Н., ДОЦЕНТ	151

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМПАКТНОЙ ЛИНИИ НА ИТОГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	154
К.В. РАЙСКАЯ	154
Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент	154
СОВРЕМЕННЫЕ И ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ.....	158
Э.Д. МАЦУЛЕВИЧ, А.М. ТАРАСОВА	158
Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент	158
ВЛИЯНИЕ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НА КОРОНУ.....	162
И.В. Прилуцкий	162
Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к. т. н., доцент.....	162
РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ С ВОЗНОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ	165
Э.В. ШЕКОЛАЙТ	165
Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент	165
НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ И ПУТИ ЕЕ СНИЖЕНИЯ	170
В.В. Смоленский, Д.В. Полонский	170
Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент	170
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ	173
К.И. Курилович, Д.Г. Яцухно	173
Научный руководитель – Ю. В. Суходолов, доцент	173
ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛА НАГРУЗКИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ DQ/DE	177
А.А. Кандыбович	177
Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель	177
ВЛИЯНИЕ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА РЕЖИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ.....	181
Е.Д. БАЛАНЮК	181
Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель	181
АНАЛИЗ РАСЧЕТА РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ, НЕОБРАЩЕННОЙ И ОБРАЩЕННОЙ ФОРМ УРАВНЕНИЙ УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ	186
А.А. СТАШЕВСКИЙ	186
Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель	186
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НЬЮТОНА ДЛЯ РАСЧЕТА УТЯЖЕЛЕННЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ. АНАЛИЗ МАТРИЦ ЯКОБИ В ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМАХ.....	190
К.Е. ЛАТЫШЕНКО	190
Научный руководитель - А.А. Волков, старший преподаватель	190
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АККУМУЛЯТОРАХ. ЗАЩИТА ОТ СКАЧКОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ АККУМУЛЯТОРА.....	194
Д.А. СТЕПАНОВ, Д.С. ЧУРКО	194
Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель	194
ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ	199
Сидоренко И.С.	199
Научный руководитель – Ринговский И.А., ассистент	199
НАУЧНЫЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ НИКОЛЫ ТЕСЛЫ	203
Д.Р. ЛУПАЧ	203
Научный руководитель - В.В. Зеленко, старший преподаватель	203
ИСТОРИЯ МАЙКЛА ФАРАДЕЯ И ЕГО НЕЗАМЕНИМЫЙ ВКЛАД В РАЗВИТИЕ НАУКИ	207
Н. Г. ЮРКЕВИЧ	207
Научный руководитель – В.В. Зеленко, старший преподаватель	207
ИННОВАЦИОННЫЕ ФЕРРОМАГНЕТИКИ	211
И.В. Прилуцкий	211
Научный руководитель – Е.В. Бондарёнок, старший преподаватель	211

СХЕМЫ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ОГРАНИЧИТЕЛЯМИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ	215
А.И. Чечет, Д.А. Сиваков.....	215
Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель.....	215
ДВУМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ	220
А.К. Мартынов	220
Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель.....	220
ИНВЕРТОРЫ В ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ	225
Д.А. Карпейчик, В.В. Ляхович.....	225
Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель.....	225
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВЕТОДИОДОВ.....	233
П.С. Барщевская, В.А. Зарецкая	233
Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель.....	233
ДАТЧИКИ ДВИЖЕНИЯ И ФОТОДАТЧИКИ. ФОТОДИОД.	240
Р.С. Молчан, Н.Ю. Кратик.....	240
Научный руководитель – Жуковской Т.Е, старший преподаватель.....	240
ТИРИСТОРНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ МОЩНОСТИ.....	249
П.А. Пашкевич	249
Научный руководитель – Жуковской Т.Е, старший преподаватель.....	249
ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ.....	263
Н.С. Макаренко, Я.А. Субоч	263
Научный руководитель – Т.Е. Жуковская,.....	263
КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРОВ И СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ.....	269
А.Д. Чубукова	269
Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель.....	269
ДИАГНОСТИКА И УСТРАНЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ	275
А.Н. Лесота, А.Д. Котов	275
Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель.....	275

УДК 621.311

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ CONDITION MONITORING OF ELECTRICAL EQUIPMENT

П.А. Чибисова, Д.В. Бердовский

Научный руководитель – С.В. Константинова, к.т.н., доцент,
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

P. Chibisova, D. Berdovskiy

Supervisor – S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в данной статье описываются методы контроля состояния электрооборудования, рассматриваются приборы.

Abstract: This article explores methods for monitoring the condition of electrical equipment, as well as the instrumentation involved.

Ключевые слова: контроль, методы, электрооборудования.

Keywords: monitoring, methods, electrical equipment

Введение

Современное электрооборудование является ключевым элементом бытовых и промышленных систем. Контроль технического состояния электрооборудования – это проверка параметров электрооборудования на соответствия требованиям нормативной и конструкторской документации. Эффективный контроль состояния электрооборудования позволяет снизить эксплуатационные расходы, повысить надёжность работы электрооборудования, предотвратить аварии.

Основная часть

Контроль состояния электрооборудования включает в себя мониторинг основных параметров и диагностику на наличие неисправностей и причин их возникновения. Своевременный контроль состояния электрооборудования позволяет избежать сбоев в работе электрооборудования, предотвратить аварии, снизить эксплуатационные расходы.

Согласно классификации методы контроля состояния электрооборудования можно разделить на две группы: методы разрушающего контроля состояния и методы неразрушающего контроля состояния электрооборудования. Разрушающие методы контроля состояния электрооборудования предполагает проверку путём повреждения или разрушения, что позволяет получить очень точные данные, но его применение крайне ограничено, так как может приводить к повреждению компонентов. Разрушающий контроль обычно применяется в лабораторных условиях и с крайне малым количеством образцов из-за своей дороговизны и опасности.

Неразрушающие методы контроля состояния электрооборудования обеспечивает возможность диагностики без их разрушения или повреждения, сохраняя целостность и работоспособность объекта. Основной целью данного контроля является своевременное выявление дефектов и повреждений, ухудшающих экс-

платационные характеристики, и предотвращение аварийных ситуаций. Данные методы контроля являются наиболее распространёнными, экономичными и безопасными.

Рассмотрим основные методов неразрушающего контроля состояния электрооборудования:

1. Визуальный осмотр.

Является одним из наиболее простых и эффективных методов контроля состояния электрооборудования, и основан на визуальном осмотре внешнего состояния оборудования без применения сложных измерительных приборов (рисунок 1). Проведение осмотров позволяет выявить неисправности (коррозия, трещины, повреждение изоляции и т.д.) на ранних стадиях и предотвратить их развитие. Данный метод часто применяется с другими неразрушающими методами контроля состояния с помощью специализированного оборудования для более точного исследования [1].



Рисунок 1 — Визуальный осмотр

2. Термография.

Данный метод основывается на измерении теплового излучения поверхности электрооборудования с помощью датчиков, тепловизоров или ультрафиолетовых камер (рисунок 2). Инфракрасные камеры фиксируют тепловое излучение объектов, преобразуя его в видимое изображение. Температура отображается в различных цветах, что позволяет быстро выявить проблемные участки. Этот метод позволяет своевременно обнаружить изоляционные повреждения, перегрев, несбалансированность фаз, короткое замыкание.



Рисунок 2 —Ультрафиолетовая камера SogoCAM 8

3.Электрическая диагностика.

Данный метод основывается на измерении электрических характеристик оборудования (утечка тока, сопротивление изоляции, потери мощности, диэлектрическая проницаемость, и т.д.). Измерение параметров производится с помощью мультиметров (рисунок 3), осциллографов и иных приборов. Метод электрической диагностики позволяет проверить качество контактов, проводников, изоляции и других элементов [2, 3].



Рисунок 3 —Мультиметр цифровой с индуктивностью MULTICONM52H

4.Вибрационная диагностика.

Данный метод основывается на измерении колебаний оборудования при помощи виброметров (рисунок 4) или акселерометров. Этот метод позволяет выявлять наличие износов, несоосности, зазоров, несбалансированности или другие неисправности. Главной целью данного метода является обеспечение надёжности и безопасности работы электрооборудования, снижение вероятности его поломки и увеличение срока службы [4].



Рисунок 4 —Виброметр К1

5.Ультразвуковая дефектоскопия.

Данный метод основывается на измерении преломления и отражения ультразвуковых волн с помощью ультразвуковых дефектоскопов (рисунок 5) от внутренних компонентов электрооборудования для оценки состояния и надёжности. Этот метод позволяет обнаружить(не всегда возможно применять на сложных или очень мелких деталях)недостатки сварных и паечных соединениях, механические повреждения, а также оценить состояние изоляционных материалов.



Рисунок 5 —Ультразвуковой дефектоскоп УД2-70

6.Радиографическая диагностика.

Данный метод основывается на использовании рентгеновского излучения для получения изображения внутренних структур электрооборудования. Этот метод позволяет на ранних стадиях выявить дефекты (повреждения в изоляционных материалах, сварных соединениях и т.д.) в электрооборудовании и его компонентах. Для получения изображения используются рентгенографические аппараты (рисунок 6).



Рисунок 6 — Рентгенографический аппарат РПД 250

Заключение

Контроль состояния электрооборудования— это важнейшая часть эксплуатационного обслуживания, существенно повышающая надёжность, безопасность, срок службы оборудования.

В промышленности предпочтения отдаются неразрушающим методам (ультразвуковым, радиографическим, магнитным и т.д.), которые позволяют проводить мониторинг состояния оборудования без его повреждения.

Развитие технологий позволяет открывать новые методы контроля, что помогает более подробно анализировать текущее состояние электрооборудования и предотвращать аварийные ситуации. Правильная реализация технологий в долгосрочной перспективе может существенно сократить затраты на обслуживание и увеличить срок службы электрооборудования.

Литература

1. Эксплуатация электрооборудования [сайт]. - / Методы технической диагностики электрооборудования – URL: <https://electricalschool.info/main/ekspluat/1735-tekhnicheskaja-diagnostika-i-metody.html> (дата обращения: 06.03.2025).

2. Школа электрика [сайт]. - /Методы диагностирования электроэнергетического оборудования: основные понятия и методы. – URL: <https://electricalschool.info/main/ekspluat/2921-metody-diagnostirovaniya-elektrooborudovaniya.html> (дата обращения: 09.03.2025).

3.ЕСИН Центр [сайт]. - /Разрушающие и неразрушающие методы контроля - URL: <https://esin-expert.ru/expertiza/stati-po-teme/chto-takoe-metody-razrushayushchego-i-nerazrushayushchego-kontrolya> (дата обращения: 12.03.2025).

4.TEST-energy [сайт]. - /Диагностика электротехнического оборудования – URL: <https://test-energy.ru/diagnostika-elektrotehnicheskogo-oborudovaniya-metody-nerazrushayushchego-kontrolya/> (дата обращения: 14.03.2025).

5.Строительная компания «СК ОЛИМП» [сайт]. - / Электротехническая лаборатория. – URL: <https://olimpekspert.ru/baza-znaniy/elektrotehnicheskaya-laboratoriya/kontrol-t-ehtnicheskogo-sostoyaniya-elektrooborudovaniya> (дата обращения: 16.03.2025).

УДК 621.181.253

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОТЛОВ НА ТЭЦ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВОГО ГРАФИКА НАГРУЗКИ
USE OF ELECTRIC BOILERS AT THERMAL POWER PLANTS TO STABILIZE THE THERMAL LOAD SCHEDULE

И.В. Прилуцкий

Научный руководитель – В.П. Счастный, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
schastniy@bntu.by

I.V. Prilutsky

Supervisor – V. Schastny, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Аннотация: данная работа представлено установки применяемые на ТЭЦ для решения проблемы с нестабильностью графика нагрузки.

Abstract: this paper presents installations used at a thermal power plant to solve the problem of load schedule instability.

Ключевые слова: электрокотёл, индукционный котёл, индукционный нагреватель.

Keywords: electric boiler, induction boiler, induction heater.

Введение

В настоящее время общая мощность Белорусской энергосистемы около 10 ГВт, из которых более 4 ГВт приходится на ТЭЦ.

В связи с появлением на территории Республики Беларусь АЭС, появилась проблема с регулированием нагрузки в ночной период, когда происходит наибольший спад потребления электрической энергии. Вся проблема заключается в большой выработке электроэнергии и временном спаде её потребления. Выходом из этой ситуации является понижение генерации АЭС, однако на небольшой период времени это экономически нецелесообразно и остаётся уменьшать генерацию других станций, в нашем случае это ТЭЦ. Если уменьшить генерацию станции, могут возникнуть проблемы с передачей тепла потребителю в отопительный период. Выходом из этой ситуации является электрический котёл, он в свою очередь потребляет электроэнергию и вырабатывает тепловую энергию.

Основная часть

В июле 2016 года на ТЭЦ-2 города Гомель были введены в эксплуатацию два электрических котла типа ZVP-2840 с номинальной мощностью 40 МВт.

В конце 2020 года на ТЭЦ-4 города Минск были установлены четыре электрических котла, мощность каждого составляет 40 МВт.

В 2025 году в Гродненской Северной мини-ТЭЦ начали использовать электрический котёл, мощность которого составляет 30 МВт.

Данное оборудование позволяет регулировать нагрузку в широком диапазоне, а также снизить себестоимость для выработки тепловой энергии.

Преимущества электрических котлов:

- простота устройства;
- небольшие размер;
- высокий КПД, который достигает 99%;
- надёжность;
- нет проблем с доставкой и хранение топлива;
- менее восприимчивы к перепадам напряжения.

Высокий КПД обусловлен тем, что электрический котёл является котлом прямого действия, то есть его элементы не нагреваются, а нагревается только теплоноситель посредством прямого воздействия на него электрическим током. Стоит отметить, что теплоносителем является специально подготовленная вода или раствор. Если в него перестанет поступать вода или раствор он просто прекратит свою работу в связи с тем, что прервётся цепь тока, в отличие от котлов работающих на ТЭНе [1].

К недостаткам можно отнести следующее:

- повышенные требования безопасности относительно заземления;
- теплоноситель должен обладать необходимой теплопроводностью;
- необходимо следить за состоянием электродов, проводить своевременное их обслуживание;
- котлы работают только на переменном токе, иначе будет вызван электролиз воды.

Мощность котла регулируется за счёт регулирующих заслонок, они обеспечивают количество поступающего теплоносителя, который будет находится в контакте с фазовыми электродами.

Электрический котёл для обеспечения своей безопасной эксплуатации снабжён:

- термовыключателем для предотвращения превышения значений температуры воды или раствора, находящихся в котле;
- реле расхода, оно отключает электрический котёл с задержкой при уменьшении потока теплоносителя;
- предохранительными пружинными клапанами, они служат для предотвращения превышения давления теплоносителя внутри котла;
- реле давления, при превышении давления выше разрешённого значения отключает котёл.

На просторах интернета существует достаточное количество предложений на покупку электрических котлов. Предложения начинаются с мощности 100 кВт до нескольких МВт. В общем случае их приобретают для получения горячего водоснабжения на строительных площадках, жилых домах, производствах и так далее. Для наглядного примера характеристики котла «ПЭЛКО 1000» представляют следующую картину:

- максимальная мощность 1000 кВт;
- теплопроизводительность 0,86 Гкал/час;
- объём обогреваемого помещения 29000 м³;
- напряжение сети трёхфазного тока частотой 50 Гц составляет 380 В +10%,

- электродный нагреватель;
- мощность регулируется от 0 до 100%;
- рабочее давление может быть до 0,6 МПа;
- расчётное давление до 1 МПа;
- габариты блока котла 600x800x2000 мм;
- габариты шкафа управления 600x800x1900 мм;
- масса блока котла 500 кг;
- масса шкафа управления 250 кг.

За рубежом, а именно в Северной Америке и Европе электрические котлы набирают с каждым годом всё большую популярность и их доля на рынке постепенно возрастает. Основная тенденция их роста связана с политикой уменьшения выбросов углекислого газа в атмосферу и увеличением энергоэффективности. По большей части их приобретают частные лица для собственных нужд, таких как отопление и нагрев воды. Часть роста популярности котлов обусловлена расширением индустриальной базы зарубежных стран, особый отклик они нашли в пищевой и химической промышленности [3].

Электрические котлы, стоящие на ТЭЦ-2, были произведены «Zander & Ingestrom AB», напряжением 11 кВ и максимальной мощностью до 40 МВт. Расчётное и рабочее давления соответственно 0,6 и 0,2-0,3 МПа, объём 21 м³, расход воды 1200 м³/ч, температура теплоносителя на входе и выходе составляет 90 и °С, нагреватель электродного типа.

Индукционный нагреватель можно применять как один из вариантов для нагрева воды. Кроме воды индукционному нагреву подвержены материалы, хорошо проводящие электрический ток. При достаточной мощности нагрев будет осуществляться очень быстро, например, установка мощностью 31 кВА выделяет около 70060 кДж/ч тепла.

Принцип индукционного нагрева пошёл в основу работы индукционного электрического котла. У данного типа котлов есть своя особенность, вместо трубки в индуктор помещается теплообменный контур, проходя через который происходит нагрев и распределение по всей системе. Как следует из названия, нагреватель у них индукционного типа [2].

Широкое применение они нашли в некоторых областях, таких как: отопление жилых помещений, подогрев воды, а также в металлургической, химической, пищевой, медицинской и других промышленности.

К плюсам этих установок можно отнести следующее:

- меньший расход электроэнергии по сравнению с установками работающих на ТЭН-ах, около 30-40%;
- продолжительный срок службы;
- у котлов существует естественная циркуляция и во время их работы существует вибрация, которая не даёт появиться отложениям накипи на стенках прибора.

Также необходимо заметить, что существует ряд недостатков для данных установок, а именно:

- активное выделение тепла во время работы установки, это может привести к проблемам с пожарной безопасностью;
- для нормальной работы необходима стабильная электрическая сеть;
- необходимо поддерживать давление и температуру в допустимых пределах.

КПД установки достигает 98%. Это обусловлено тем, что нет прямого контакта при переходе одного вида энергии в другой, а следовательно и потери минимальны.

Заключение

Использование электрических котлов для стабилизации теплового графика нагрузки является хорошим решением, ведь их применение даёт возможность с пользой использовать избыток энергии, а именно вырабатывать тепло для систем отопления и подогрева воды. Позволяет убрать избыток генерации электроэнергии в период низкого потребления. Их применение экономически выгодное решение, ведь КПД у них высокий и надёжность на достаточно высоком уровне. С каждым годом спрос на электрические котлы на рынке возрастает, как среди обычных пользователей, так и среди различных отраслей промышленности.

Литература

1. Котлы электрические промышленные – URL: <https://sibpromenergo.ru/boiler/elektricheskie/index.h> (дата обращения: 13.03.2025).
2. Котел электрический промышленный – ТЕРМАНИК – URL: <https://termanik.ru/raznovidnosti-elektronagrevatelej/kotel-elektricheskij-promyshlennyj/> (дата обращения: 13.03.2025).
3. Рынок электрических котлов Северной Америки и Европы, отчет 2032 – URL: <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/north-america-and-europe-electric-boilers-market> (дата обращения: 14.03.2025)

УДК621.31

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРО-
СНАБЖЕНИЯ****METHODS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF POWER SUPPLY
SYSTEMS**

А.А. Мартинчик, Д.И. Рышкель

Научный руководитель – С.В. Константинова, к.т.н., доцент,
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

A. Martinchik, D. Ryshkel

Supervisor – S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в данной статье описываются методы повышения эффективности электроснабжения, их особенности и примеры успешной реализации.

Abstract: this article describes methods for improving the efficiency of electricity supply, their features and examples of successful implementation..

Ключевые слова: энергия, электроснабжение, энергосистемы.

Keywords: energy, electricity supply, power systems.

Введение

Энергоэффективность промышленности сегодня является одной из ключевых задач: снижение затрат на электроэнергию уменьшает себестоимость продукции и повышает экологическую безопасность. Промышленные предприятия потребляют существенную долю электроэнергии – например, до 70% всей электроэнергии в промышленности расходуется на работу электродвигателей. Это означает огромный потенциал экономии при модернизации электроснабжения.

Основная часть

Основные проблемы энергоэффективности.

В традиционных системах электроснабжения предприятий имеется ряд факторов, снижающих эффективность использования электроэнергии. Во-первых, это потери в сетях из-за реактивной мощности и несинусоидальности: низкий коэффициент мощности ($\cos \varphi$) приводит к повышенным токам в линиях и трансформаторах, увеличивая потери энергии на нагрев проводников. Во-вторых, некачественное электропитание снижает КПД электроприемников и может приводить к сбоям работы оборудования. В-третьих, значительная часть предприятий эксплуатирует устаревшее электрооборудование – трансформаторы и электродвигатели с низким КПД, неэффективные системы. В-четвертых, недостаток учета и контроля: при отсутствии современной системы мониторинга энергопотребления (АСУЭ) трудно выявить узлы потерь, утечки и нерациональное использование энергии. Перегрузка оборудования и отсутствие автоматизации приводят к нерациональным режимам работы. Все эти проблемы проявляются в повышенных потерях и расходах на электроэнергию.

Технические методы повышения эффективности.

К основным методам относятся внедрение интеллектуальных электрических сетей (*smartgrid*), автоматизированных систем учета и управления энергопотреблением (АСУЭ), улучшение качества электроэнергии (компенсация реактивной мощности и фильтрация гармоник), модернизация электротехнического оборудования на энергоэффективные образцы, широкая автоматизация и диспетчеризация электросетевого хозяйства, а также использование систем накопления энергии.

Интеллектуальные энергосистемы (Smart Grid).

Концепция *smartgrid* подразумевает модернизацию электрических сетей за счет внедрения цифровых информационно-измерительных и управляющих технологий. «Умные» сети электроэнергии используют информационно-коммуникационные технологии для сбора данных о генерации и потреблении и автоматически повышают эффективность, надежность и экономичность производства и распределения электроэнергии. В рамках *smartgrid* все элементы – от источников энергии до конечных потребителей – объединены единой автоматизированной системой управления в реальном времени. Например, интеллектуальная сеть на предприятии может учитывать текущую нагрузку оборудования, тарифы и состояние внешней сети и соответственно оптимизировать потребление: снижать нагрузку в часы пик, включать резервные источники или накопители при дорогой электроэнергии, распределять нагрузку между цехами для выравнивания графика. Smart grid-технологии также подразумевают двусторонний обмен энергией и информацией: потребители могут выступать участниками энергосистемы (генерировать собственную энергию, возвращать излишки в сеть, участвовать в программах управления нагрузкой). В результате повышается адаптивность и надежность энергоснабжения [1].

Автоматизированные системы учёта электроэнергии (АСУЭ).

Одним из базовых шагов к энергоэффективности является установка системы точного учета и мониторинга энергопотребления. АСУЭ представляет собой комплекс счетчиков (смарт-метров), датчиков и программного обеспечения, который автоматически собирает данные о расходе электроэнергии на всех уровнях – от ввода предприятия до отдельных цехов и крупных потребителей. Внедрение АСУЭ даёт многочисленные преимущества: это снижение непроизводительных затрат энергии, более точный учёт и распределение потребления по технологическим переделам, сокращение операционных расходов на сбор данных. Система в режиме реального времени выявляет отклонения (например, превышение норм расхода, утечки тока, перегрузки оборудования), что позволяет своевременно принимать меры: перераспределять нагрузку, ремонтировать неисправные установки, оптимизировать графики работы.

Повышение качества электроэнергии.

Большой резерв энергосбережения связан с улучшением качества электроэнергии, поступающей к оборудованию. Речь идёт, прежде всего, о компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник. Установка устройств компенсации реактивной мощности повышает коэффициент мощности близко к единице, тем самым снижая ток нагрузки и потери в проводниках и трансформаторах. Предприятия также избегают штрафов за низкий $\cos \varphi$, уменьшают нагрузку на

внешнюю сеть и высвобождают дополнительную активную мощность. Одновременно для борьбы с искажением синусоидальности тока применяются фильтрующие устройства [2].

Более современное решение – активные фильтры гармоник. Такие устройства способны в реальном времени анализировать ток нагрузки и генерировать встречный компенсационный ток. Активный фильтр одновременно выполняет сразу несколько функций для улучшения качества энергии: фильтрацию гармоник, динамическую компенсацию реактивной мощности, симметрирование фазных токов, снижение фликера (мигания напряжения) и стабилизацию напряжения – всё это устройство делает автоматически и непрерывно. Использование активного фильтра повышает надежность системы электроснабжения и продлевает срок службы оборудования за счёт устранения перегрузок и перегрева.

Модернизация оборудования.

Одной из самых результативных мер является замена устаревшего электротехнического оборудования на современные высокоэффективные аналоги. В первую очередь это касается силовых трансформаторов и электродвигателей – основных потребителей и преобразователей энергии на предприятии. Новые трансформаторы изготавливаются с применением улучшенных магнитопроводов и материалов, что резко сокращает их потери.

Автоматизация и диспетчеризация электросетей.

Современные промышленные электросети немыслимы без системы автоматического управления и диспетчерского контроля. Диспетчеризация электроснабжения (АСДУЭ) представляет собой многоуровневую систему программно-технических средств, которая обеспечивает централизованный мониторинг и управление энергосистемой предприятия. На нижнем уровне каждый участок сети оснащается микропроцессорными устройствами (контроллерами, реле, измерителями), объединенными в единую сеть передачи данных. На верхнем уровне находится программный комплекс, который в режиме реального времени собирает информацию и позволяет диспетчеру (или автоматике) отдавать команды оборудованию. Традиционные функции, реализуемые системой диспетчеризации: контроль параметров (напряжения, токов, потребляемой мощности, частоты, показателей качества электроэнергии), наблюдение за состоянием коммутационного оборудования (включение/отключение выключателей, состояние секционных и обходных линий) и правильностью выполнения переключений, отображение и архивирование параметров режимов работы. Таким образом, система ведет журнал событий и параметров, что позволяет анализировать режимы работы и выявлять отклонения задним числом. Продвинутое диспетчерские системы более высокого уровня оснащаются дополнительными функциями: например, регистрация аварий на вводах предприятия (осциллографирование аварийных процессов), что позволяет предъявлять претензии энергоснабжающей организации и получать компенсацию за перебои электроснабжения. Важной функцией является технический учет электроэнергии по центрам затрат – на основе данных АСУЭ система рассчитывает удельные энергозатраты на единицу продукции в каждом цехе и позволяет выявлять участки с наибольшими относительными потерями [3].

Системы накопления энергии.

В последние годы в промышленности все больше внимания уделяется системам накопления электроэнергии (СНЭ) – главным образом аккумуляторным. Энергонакопители позволяют сглаживать неравномерность потребления и более эффективно использовать энергоресурсы. Принцип действия: в часы провалов нагрузки или при избыточной генерации энергия запасается в накопителе (заряд батарей), а в часы пиковой нагрузки накопленная энергия отдаётся в сеть, покрывая часть потребности. Таким образом, снижается пик потребления из внешней сети и выравнивается график нагрузки предприятия. На стороне потребителя такое выравнивание уменьшает потери электроэнергии в питающих его линиях и трансформаторах, поскольку токи становятся более равномерными. Кроме того, предприятие может уменьшить заявленную максимальную мощность и, как следствие, платежи за превышение пиковой мощности. Накопители также позволяют использовать более дешёвую электроэнергию ночного провала нагрузки – заряжаясь ночью по низкому тарифу и покрывая дневной пик, они снижают общие расходы на электроэнергию. Дополнительный эффект – улучшение качества электроэнергии: накопитель может кратковременно выдавать большую мощность, компенсируя провалы напряжения при пусках тяжёлых двигателей, а также выполнять функции источника бесперебойного питания (UPS) при кратковременных сбоях внешнего электроснабжения. В результате повышается устойчивость работы чувствительного оборудования и технологических процессов. Применение накопителей энергии в промышленности сдерживается высокой стоимостью батарейных систем, однако развитие технологий и снижение цен на литий-ионные аккумуляторы делает их всё более привлекательными. Многие предприятия уже реализуют пилотные проекты по установке накопителей для компенсации пиков. Особенно эффективны накопители в сочетании с собственными генерирующими установками на возобновляемых источниках (солнечные панели, ветрогенераторы): в этом случае обеспечивается более стабильное энергоснабжение при переменной выработке ВИЭ и максимальное потребление собственной дешёвой энергии. В перспективе распространение промышленных систем накопления позволит значительно повысить гибкость и экономичность работы энергосистем – как на уровне отдельных предприятий, так и энергосистемы страны в целом.

Заключение

Многие промышленные компании уже добились заметных результатов, внедряя описанные технические решения. Например, корпорация Unilever сократила энергопотребление своих производств на 20% благодаря внедрению эффективных технологий и оптимизации производственных процессов, а компания Coca-Cola реализовала систему управления энергоэффективностью и снизила потребление энергии на 23%. Среди мировых промышленных лидеров можно отметить опыт Siemens – реализация корпоративной программы «Экологические решения» позволила этой компании уменьшить энергозатраты на 20%, тогда как General Electric инвестировала в энергоэффективные технологии и повысила энергоэффективность своих производственных операций на 15%.

Успешный опыт показывает, что вложения в повышение энергоэффективности быстро оправдываются. Например, за счёт снижения энергозатрат на 20–30% предприятие не только уменьшает себестоимость продукции, но и продлевает срок службы оборудования (за счёт снижения нагрузок и перегрева), улучшает условия труда (стабильное качество напряжения, меньше аварийных остановок) и снижает выбросы парниковых газов. Многие решения могут быть реализованы поэтапно – например, установка конденсаторных батарей, преобразователей частоты, датчиков и контроллеров – эти меры не требуют коренной реконструкции производства, но дают значительный эффект.

Литература

1. Энергоэффективность в промышленности: как сократить расходы на энергию [сайт]. - // Энергоэффективность сегодня, 09.05.2023. – URL: <https://vodokanalstroy.spb.ru/jenergeticheskij-rynok/jenergojeffektivnost-v-promyshlennosti-kak-sokratit-rashody-na-jenergiyu/> (дата обращения: 14.03.2025)
2. Энергетические обследования. Способ снизить потребление энергии [сайт]. - // Control Engineering Россия. – URL: <https://controleng.ru/e-lektroprivod/abb-electric-drive/> (дата обращения: 14.03.2025)
3. Common Industrial Electrical Issues [сайт]. - // Southwest Industrial Electric Blog, 21.04.2023. – URL: <https://www.southwestelectric.com/blog/2023/april/common-industrial-electrical-issues/> (дата обращения: 14.03.2025)

УДК 621.315

**НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗРАБОТКЕ И ПРОИЗВОДСТВЕ КАБЕЛЕЙ
NEW TRENDS IN THE DEVELOPMENT AND CABLE PRODUCTION**

Е.Д. Михальцевич, Е.Р. Медовский, А.И. Новик

Научный руководитель – С.В. Константинова, к.т.н., доцент,

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

E. Mikhaltsevich, E. Medovsky, A. Novik

Supervisor – S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в данной статье рассматриваются актуальные тенденции в области разработки и производства кабелей.

Abstract : this article discusses current trends in cable development and production.

Ключевые слова: кабели, кабельные линии, силовые кабели.

Keywords: cables, cable lines, power cables.

Введение

Кабели являются ключевым элементом в современных электрических и информационных сетях, обеспечивающим трансляцию энергии и данных на разных уровнях.

С развитием технологий и ростом необходимости в скоростной передаче информации, а также в надежных источниках питания, тренды в разработке и производстве кабелей приобретают всё большую важность.

В последние годы произошёл значительный прорыв в области материаловедения, что позволяет создавать кабели с улучшенными свойствами: повышенной прочностью, стойкостью к внешним факторам и меньшими потерями при передаче.

Климатические изменения и необходимость перехода на устойчивые источники энергии, вынуждают производителей кабелей внедрять инновационные решения и экологически безопасные технологии.

В связи с этим особое внимание уделяется разработке кабелей для возобновляемых источников энергии, например, солнечных и ветряных электростанций, а также для систем электромобилей.

Основная часть

Разработка новых энергетических кабелей на сегодняшний день требует не только высокой производительности и надежности, но и учета влияния на окружающую среду, а также снижения уровня углеродного следа.

Разработка кабелей, способных работать в условиях высоких температур, позволяет решать вопросы работы оборудования ВИЭ. Требования к проводам в плане интеллектуальности и надежности, и кабелям выросли.

Так же растущий интерес к возобновляемой энергетике и электромобилям открывает новые перспективы перед производителями кабелей.

Разработка специализированных решений для данных сегментов не только соответствует принципам устойчивого развития, но и предоставляет возможности для экономического подъема в индустрии.

Вместе с тем, увеличение конкуренции на рынке кабельной продукции обуславливает необходимость постоянного совершенствования производственных процессов и применения новаторских подходов.

Важно принимать во внимание экологические аспекты производства, что требует от компаний активного участия в создании устойчивых технологий.

Новым направлением в производстве кабелей относится использование композитных материалов, жидких диэлектриков.

В кабельной промышленности композиты используются для изготовления изоляции и оболочки.

Например, сочетание стекловолокна и эпоксидной смолы придает кабелю высокую прочность и устойчивость к механическим повреждениям [1]. Преимущества композитных материалов приведены в таблице 1:

Таблица 1 -Преимущества композитных материалов

1	Высокая прочность : Композитные кабели способны выдерживать значительные нагрузки, что особенно важно для кабелей, применяемых в строительстве, промышленности и энергетике
2	Коррозионная стойкость: Композитные материалы не подвержены коррозии, что позволяет использовать их в агрессивных средах, например, в морской воде или в химически активных средах
3	Гибкость: Композитные кабели могут быть изготовлены различной формы и конфигурации, что расширяет возможности их применения. Композитные материалы применяются для производства, например, подводных кабелей, кабелей для нефтегазовой промышленности и т.п.

Как известно, жидкие диэлектрики это жидкости с высокими изоляционными свойствами, которые используют в качестве изоляционного материала в высоковольтных кабелях [2], что обеспечивает надежную изоляцию, высокую эффективность передачи энергии (таблица 2).

Таблица 2 Преимущества жидких диэлектриков

1	Высокая прочность на пробой: жидкие диэлектрики способны выдерживать высокие напряжения без пробоя
2	Низкие диэлектрические потери: меньше энергии теряется в виде тепла при передаче электрического тока.
3	Самостоятельное восстановление: при возникновении разряда в жидком диэлектрике образуется газовый пузырь, который со временем рассасывается, восстанавливая изоляцию.

Новым направлением в производстве кабелей становится роботизация (таблица 3).

Таблица 3 - Преимущества роботизации производства

Повышение точности	роботы выполняют операции с высокой точностью, что снижает количество брака.
Повышение производительности	автоматизация позволяет увеличить объем производства и сократить время изготовления продукции
Повышение безопасности	роботы выполняют опасные и монотонные работы, снижая риск травматизма.

Применение гибридных технологий в производстве кабелей открывает новые перспективы и преимущества (таблица 4).

Таблица 4 – Преимущества гибридных технологий

1	Оптимизация производства	гибкое сочетание автоматизированных и ручных процессов позволяет оптимизировать производство под конкретные задачи
2	Повышение качества	сочетание точности автоматизированных процессов с гибкостью ручного труда позволяет создавать высококачественные изделия
3	Расширение возможностей	гибридные технологии открывают новые возможности для создания кабелей с нестандартными характеристиками

Создаются интеллектуальные кабели, оснащенные встроенными датчиками, контролирующими состояние кабеля [3,4], что позволяет предотвращать аварии, оптимизировать эксплуатацию кабелей (таблица 5).

Таблица 5 - Возможности интеллектуальных кабелей

Мониторинг состояния	датчики позволяют отслеживать износ изоляции, наличие механических повреждений и другие факторы, влияющие на надежность кабеля
Самодиагностика	интеллектуальные кабели способны самостоятельно обнаруживать и сигнализировать о неисправностях
Оптимизация эксплуатации	анализ данных, полученных от датчиков, позволяет оптимизировать режимы работы кабельных сетей и повысить их эффективность

Применение интеллектуальных кабелей повышает надежность, снижает затраты на обслуживание, позволяет оптимизировать режимы работы кабельных сетей (таблица 6)[4].

Таблица 5 - Перспективы развития интеллектуальных кабелей

Интеграция в системы "умного дома" и "умного города"	интеллектуальные кабели могут стать неотъемлемой частью инфраструктуры "умных" городов, обеспечивая эффективное управление энергоресурсами
Применение в промышленности	интеллектуальные кабели могут использоваться для мониторинга состояния производственного оборудования и оптимизации технологических процессов
Развитие новых материалов и технологий	Появление новых материалов и технологий позволит создавать интеллектуальные кабели с расширенным функционалом

Заключение

Анализ тенденций в сфере проектирования и производства кабельной продукции показывает, что данная область демонстрирует активное развитие, чему способствуют как технологические новшества, так и перемены в запросах потребителей. Кабели становятся более эффективными, долговечными и экологичными благодаря внедрению новых материалов и методик. В частности, использование композитов, усовершенствованных изоляционных систем и интеллектуальных систем управления позволяет значительно улучшить свойства кабелей и расширить области их использования.

Будущее кабельной промышленности определяется умением адаптироваться к новым вызовам и запросам рынка, что предоставит возможности для внедрения передовых решений и повышения конкурентоспособности на мировом рынке.

Литература

1. Отраслевой электротехнический портал [сайт]. - / Инновации в кабельной промышленности: тенденции и перспективы – URL: <https://marketelectro.ru/content/innovatsii-v-kabelnoy-promyshlennosti-tendentsii-i-perspektivy> (дата обращения: 27.03.2025).
2. X-CABEL [сайт]. - / Новые достижения в области разработки электрических кабелей – URL: <https://xcabel.ru/blog/novye-dostizheniya-v-oblasti-proizvodstva-elektricheskikh-kabelej> – (дата обращения: 25.03.2025).
3. ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА СВЯЗИ [сайт]. - / Состояние и перспективы развития кабельной промышленности в России – URL: <http://lib.tssonline.ru/articles2/cable/sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-kabelnoy-promyshlennosti-v-rossii> (дата обращения: 25.03.2025).
4. Технологическая пресса ONEWORLD [сайт]. - /Новые энергетические кабели: будущее электроэнергии и ее перспективы применения! – URL: <https://www.owcable.com/ru/technology/new-energy-cables-the-future-of-electricity-and-its-application-prospects-revealed/> (дата обращения: 25.03.2025).

УДК 628.987

ИЗМЕРЕНИЕ ЯРКОСТИ BRIGHTNESS MEASUREMENT

П.А. Чибисова, Д.В. Бердовский

Научный руководитель – В.Б. Козловская, к.т.н., доцент,
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

P. Chibisova, D. Berdovskiy

Supervisor – V. Kozlovskaya, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в данной статье описываются сложности измерения яркости, рассматриваются приборы, порядок измерений и область применения.

Abstract: this article discusses the complexities of brightness measurement, discusses instrumentation, measurement procedures and applications.

Ключевые слова: яркость, освещение, измерение яркости.

Keywords: brightness, lighting, brightness measurement.

Введение

Яркость света – важная характеристика, влияющая на работоспособность человека. Данная характеристика представляет собой отношение силы света в конкретном направлении к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную оси наблюдения. Единица измерения яркости является кандел на квадратный метр (кд/м²). Яркость характеризует пространственное и поверхностное распределение светового потока. Для измерения яркости используются различные специальные приборы – яркомеры, колориметры, спектрорадиометры и люксометры [1].

Основная часть

Измерение яркости может быть осложнено множеством факторов, которые существенно влияют на результаты.

Во-первых, существует большое количество разнообразных объектов и сред, которые отражают, поглощают или пропускают свет по-разному.

Во-вторых, определение источника света может вызвать сложности. Естественные и искусственные источники света обладают уникальными спектральными характеристиками, которые могут искажать восприятие яркости.

Окружающая среда также оказывает влияние на измерения. Свет, отраженный от окружающих поверхностей, погодные условия, такие как облачность, туман или дождь – изменяют интенсивность и характер освещения. Кроме того, влияние отраженного света может искажать результаты измерений. Может увеличиваться общая яркость сцены, что требует корректировки данных. Атмосферные условия (влажность, давление, температура и т.д.) оказывают особое влияние при измерениях на открытом воздухе и могут повлиять на светопропускание воздуха и на измеряемую яркость [2,3].

Следует учитывать и расстояние между прибором и источником света, поскольку оно влияет на точность измерения. Для избежания влияния посторонних

источников света необходимо учитывать общую освещенность окружающей среды.

Яркость может изменяться во времени, что требует учета динамических изменений в процессе измерения. Например, яркость солнца в течение дня меняется, что затрудняет получение стабильных данных. Для достижения высокой точности часто используют несколько измерений и рассчитывают среднее значение.

Субъективность восприятия также является значительным фактором. Разные люди могут по-разному интерпретировать яркость одного и того же объекта в зависимости от их индивидуальных особенностей зрения. При измерении яркости важно учитывать угол наблюдения, так как он может существенно влиять на результаты. Это требует точной установки измерительного прибора и контроля за углом измерения [4].

У приборов для измерения яркости имеются некоторые технические ограничения, из-за которых может быть снижена точность результатов. Например, некоторые приборы могут иметь ограниченный диапазон измерения или быть чувствительными к определенным типам света. Важным аспектом для точных измерений является правильная калибровка прибора. Ошибки, допущенные при калибровке, могут значительно повлиять на конечный результат измерений.

Для измерения яркости используются специальные приборы, такие как яркомеры, колориметры и спектрорадиометры. Каждый из них имеет свои особенности и области применения, что может усложнять выбор оптимального инструмента для конкретной задачи.

Яркость часто описывается законом Ламберта, который предполагает равномерное излучение света во всех направлениях. Однако не все источники света идеально соответствуют этому закону, что может ввести погрешности в измерения.

В целом, измерение яркости требует тщательного выбора прибора, контроля условий измерения и учета физических свойств объектов, что делает этот процесс достаточно сложным и требующим специальных знаний и оборудования.

В данное время существуют следующие приборы для измерения яркости:

1. Яркомеры — это фотометры, предназначенные для измерения яркости источников света или отражающих поверхностей. Они преобразуют световой поток в непрерывный электрический сигнал, который выводится на дисплей в виде цифрового значения. Одним из примеров таких приборов является модель Konica Minolta LS-100 и LS-110, которые обеспечивают высокую точность измерений и используются для измерения яркости на малых площадях (рисунок 1).



Рисунок 1—Яркометр Konica Minolta LS-100

2. Люксометры - Яркометры. Некоторые модели люксометров имеют способность измерять интенсивность свечения объектов, поэтому они считаются универсальными для оценки как освещенности, так и яркости (рисунок 2).



Рисунок 2—ТКА-ПКМ 02 Люксметр - яркомер

3. Спектрорадиометры. Приборы, которые используются для детального анализа спектрального состава света и могут быть применены для измерения яркости в различных спектральных диапазонах (рисунок 3).



Рисунок 3—Спектрорадиометры

4. Колориметры. Служат для измерения цвета и цветовых различий при оценке яркости в контексте цветового восприятия (рисунок 4) [5, 6].



Рисунок 4—Колориметр 3NH NR-20XE

Эти инструменты позволяют с высокой точностью оценить и проконтролировать уровень яркости в различных условиях, что важно для обеспечения комфортной и безопасной среды в различных сферах деятельности человека.

Измерение яркости применяется в различных областях, таких как:

- Охрана труда и техника безопасности. Для контроля уровня освещения, предотвращения утомляемости и эффективной производительности.
- Общественные здания (кинотеатры, научные центры, образовательные и медицинские учреждения). Для условий освещения, которые обеспечивают комфортное восприятие информации.
- Проектирование наружного и внутреннего освещения. Для выбора источников света, соответствующих требованиям необходимой яркости в помещениях.

Заключение

Измерение яркости — это важная задача, которая требует использования подходящих приборов и методов. Яркость оказывает влияние на здоровье, комфорт и производительность людей в разных помещениях. В современном мире используются определенные стандарты, которые устанавливают требования к яркости и методам её измерения.

Для измерения яркости используются яркометры, люксметры, спектрорадиометры, колориметры. Каждый из перечисленных приборов имеет свои особенности и методы измерения, которые необходимо учитывать для получения достоверного и корректного результата. С помощью современных приборов есть возможность получать точные и надежные данные об уровне и качестве освещения, а также с помощью специального программного обеспечения анализировать и визуализировать. Различают несколько типов яркометров, в зависимости от цели и точности измерений [2].

Для достоверности результатов и корректного измерения яркости необходимо соблюдать определенные правила. Измерение яркости помогает контролировать и улучшать производительность труда в разных помещениях и условия зрительного комфорта для человека.

Литература

1. Научно-техническое предприятие «ТКА» [сайт]. - / Измерение яркости. – URL: <https://www.tkaspb.ru/измерение-яркости> (дата обращения: 02.03.2025).
2. Школа электрика [сайт]. - / Освещение и его измерение: основные понятия и методы. – URL: <https://electricalschool.info/main/lighting/2981-osveschenie-i-ego-izmerenie-ponyatiya-i-metody.html> (дата обращения: 02.03.2025).
3. Спектрофотометры: измерение цвета и света [сайт]. - / Колориметр 3NH NR-20XE – URL: <http://www.spectrophotometry.ru/kolorimetry/nr-20xe.html> (дата обращения: 12.03.2025).
4. ООО НПО «Компас» [сайт]. - / Спекторадиометр. – URL: <https://compasltd.com/products/spektoradiometr> - (дата обращения: 12.03.2025)
5. Эко-Интех [сайт]. - / ТКА-ПКМ 02 Люксметр-яркомер. – URL: <https://eco-intech.com/product/tka-pkm-02-luksmetr-yarkomer> (дата обращения: 12.03.2025).
6. Актуальные проблемы энергетики [сайт]. - / Светодиоды: преимущества, недостатки и перспективы их развития – URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/152966> (дата обращения: 12.03.2025).

УДК 621.39

СВЕТОВОДЫ. ЧТО СОБОЙ ПРЕДСТАВЛЯЮТ И ГДЕ ПРИМЕНЯЮТСЯ
LIGHT GUIDES. WHAT ARE THEY AND WHERE ARE THEY USED

А.А. Мартинчик, Д.И. Рышкель

Научный руководитель – В.Б. Козловская, к.т.н., доцент,
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

A. Martinchik, D. Ryshkel

Supervisor – V. Kozlovskaya, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus***Аннотация:** в данной статье описываются световоды, их виды, принцип работы и области применения.****Abstract:** this article describes the light guides, their types, principle of operation and applications.****Ключевые слова:** световоды, освещение, оптическое волокно.****Keywords:** light guides, lighting, optical fiber.***Введение**

Современный информационный век немыслим без технологий волоконной оптики. Тонкие световоды, более известные как оптические волокна, составляют основу глобальных коммуникационных сетей – от магистрального интернета между континентами до локальных сетей в наших домах. Благодаря им мы имеем высокоскоростной интернет, цифровое телевидение и надежную связь по всему миру. Кроме телекоммуникаций, световоды все шире применяются в медицине (например, для малоинвазивной эндоскопии), в системах освещения и в различных датчиках. Актуальность темы обусловлена тем, что световоды нашли применение во многих сферах науки и техники, значительно улучшая качество передачи информации и энергии света там, где обычные электрические или оптические средства малоэффективны. Рассмотрим подробнее, что собой представляют световоды, каковы их виды и принцип работы, а также основные области применения этих устройств.

Основная часть

Световод (оптический волновод) – это устройство или среда, предназначенная для направленной передачи светового излучения (рисунок 1). В открытом пространстве свет может распространяться только в пределах прямой видимости и неизбежно рассеивается и поглощается атмосферой, тогда как световод позволяет удерживать свет внутри себя и доставлять его точно к месту назначения. Чаще всего под световодом подразумевается оптическое волокно – тонкая гибкая нить из прозрачного материала (стекла или пластика), служащая каналом для распространения электромагнитных волн оптического диапазона (видимого и инфракрасного света) на большие расстояния посредством явления полного внутреннего отражения. Проще говоря, оптическое волокно состоит из центральной сердцевины и окружено оболочкой с чуть меньшим показателем преломления; такая структура «запирает» лучи света внутри сердцевины, отражая их от

границы с оболочкой, благодаря чему свет распространяется вдоль волокна с минимальными потерями. Световоды изготавливаются многослойными (обычно коаксиальными) – сердцевина и оболочка, часто дополняемые защитными покрытиями для прочности. Диаметр сердцевины стеклянного волокна, как правило, составляет от нескольких микрометров до десятков микрометров, а с учетом защитных оболочек толщина нити около 0,1–0,2 мм. Несмотря на свои микроскопические размеры, один такой волоконный световод способен передавать огромный поток информации или света без существенного затухания.

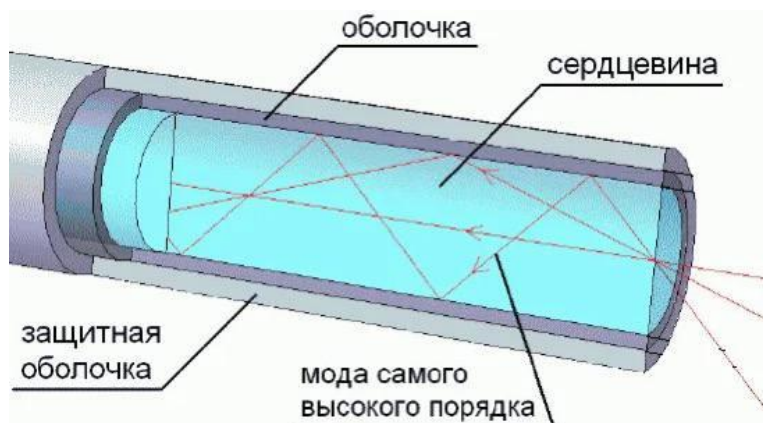


Рисунок 1-Конструкция оптического волокна

Принцип работы световодов.

Основой работы оптического световода является явление полного внутреннего отражения. Когда луч света пытается выйти из оптически более плотной среды (сердцевины) в менее плотную (оболочку) под достаточным углом, он полностью отражается обратно во внутреннюю среду, не проходя наружу. В световоде сердцевина обладает более высоким показателем преломления, чем оболочка, поэтому лучи света, входящие в сердцевину под углами меньше некоторого критического, многократно отражаются от границы сердцевина/оболочка и продолжают распространяться вдоль волокна. Таким образом, свет «заперт» внутри нити и может передаваться на большое расстояние, поворачивая вместе с изгибами волокна. Это позволяет световоду направлять световой сигнал по сложному маршруту – в отличие от свободного луча света, который рассеивался бы в пространстве. Полное внутреннее отражение обеспечивает очень малые потери: в современных оптических волокнах затухание может составлять доли децибела на километр, что в сотни раз меньше, чем потери в медных проводниках при передаче электрических сигналов на ту же дистанцию. Для эффективной работы световода важно также качество материала (чистота стекла) и ровность границы между сердцевиной и оболочкой – чтобы не было лишнего рассеяния и поглощения света. В результате правильно изготовленный световод позволяет передавать значительное количество световой энергии или данных с минимальными искажениями и потерями (рисунок 2).

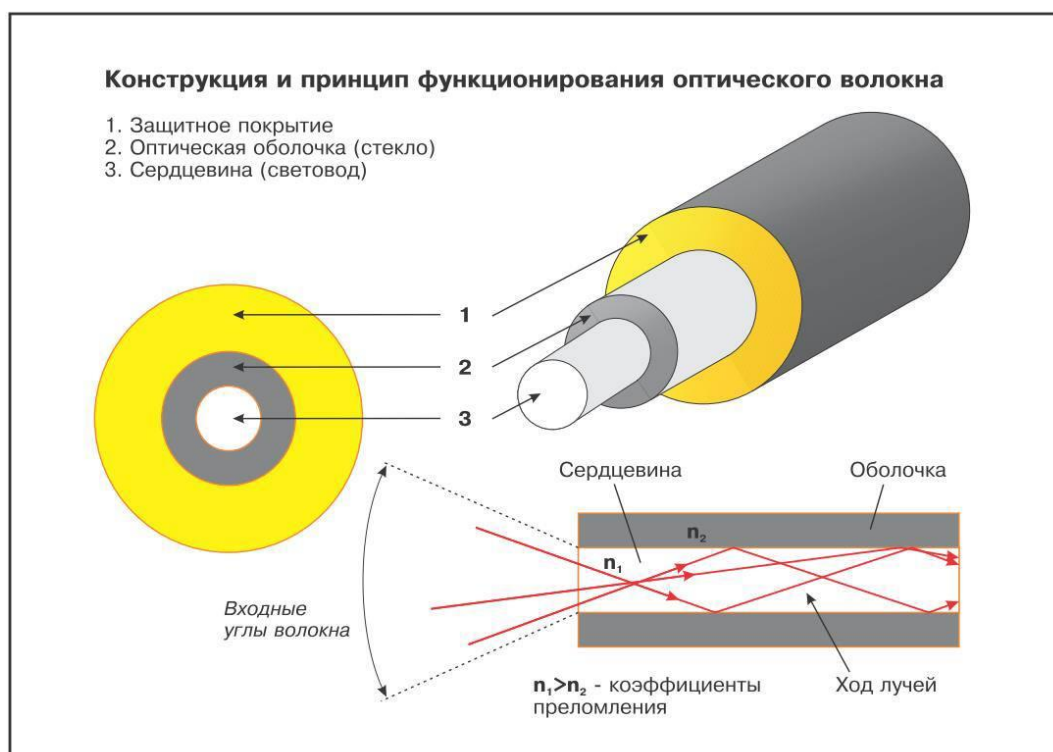


Рисунок 2- Конструкция и принцип функционирования оптического волокна

Виды световодов.

Существует несколько классификаций оптических световодов по конструкции и характеристикам:

- По числу распространяемых мод (типов лучей): различают одномодовые и многомодовые оптические волокна. Одномодовые волокна имеют очень тонкую сердцевину (около 8–10 мкм для стеклянных волокон), благодаря чему в них распространяется лишь одна мода света – это позволяет передавать сигнал на максимально большие расстояния с минимальной дисперсией (искажением импульса). Мномодовые волокна обладают более толстой сердцевиной (50 или 62,5 мкм – стандартные значения для стеклянных волокон) и могут нести множество мод (лучей под разными углами) одновременно.

- По профилю показателя преломления: у многомодовых волокон сердцевина может иметь либо резкий перепад показателя преломления, либо плавный градиент. Ступенчатые (с резким переходом) волокна имеют одинаковый показатель преломления по всей сердцевине, который скачкообразно снижается в оболочке. Градиентные волокна, напротив, обладают плавным изменением показателя преломления от центра сердцевины к краю. Градиентные многомодовые волокна обеспечивают более высокую пропускную способность на умеренных дистанциях по сравнению со ступенчатыми.

- По материалу: стеклянные волокна из кварцевого стекла наиболее распространены в телекоммуникациях из-за низких оптических потерь. Пластиковые оптические волокна (POF) из полимеров имеют большие диаметры (сердцевина 0,5–1 мм) и более высокие потери, поэтому применяются на коротких расстояниях – например, в автомобильной технике, в электронных устройствах,

датчиках. Их плюс – гибкость и дешевизна, возможность простой инсталляции без сложного оборудования

Области применения световодов

Оптоволоконные коммуникации

Оптические волокна произвели революцию в сфере связи. Волоконно-оптические коммуникации – это основное применение световодов, где они используются в качестве физической среды для передачи данных на больших расстояниях. Волоконные линии связи проложены повсеместно: от межконтинентальных подводных кабелей, соединяющих страны, до локальных сетей в городах и даже домашних Интернет-подключений. Преимущество оптоволоконных кабелей перед медными проводниками огромно: они обладают колоссальной пропускной способностью (на порядки больше, чем у электрических кабелей), устойчивостью к электромагнитным помехам и малым затуханием сигнала. Это позволяет передавать информацию на десятки и сотни километров без повторителей и с очень высокими скоростями. Для примера, еще в 2006 году в лабораториях достигнута скорость модуляции оптического сигнала 111 ГГц, а стандартные скорости передачи по одному волокну давно составляют 10 и 40 Гбит/с. С использованием спектрального уплотнения (WDM) в одном волокне одновременно передаются сотни независимых каналов, суммарная пропускная способность достигает терабит в секунду. В силу отсутствия электропроводности оптические линии также лучше защищены от несанкционированного доступа (перехват сигнала затруднен) и не представляют опасности возгорания. Сегодня оптоволоконные кабели являются основой интернет-инфраструктуры и глобальной телефонной сети. Благодаря им данные из одной точки мира в другую передаются практически мгновенно по световому лучу, проходящему по тонкому стеклянному волокну.

Медицина.

В медицине световоды открыли новые возможности диагностики и лечения. Одно из ключевых применений – эндоскопия. Гибкие эндоскопы представляют собой пучки оптических волокон, которые вводятся в тело пациента через небольшие отверстия или естественные пути. По одним волокнам свет от внешнего источника передается внутрь организма, освещая исследуемую область, а по другим – изображение передается обратно к окуляру или камере. Таким образом врач может осмотреть внутренние органы без полноценной операции. Волоконная оптика применяется в колоноскопах, бронхоскопах, лапароскопическом оборудовании и многих других эндоскопических приборах. Кроме передачи изображений, оптические волокна в медицине используются для доставки лазерного излучения к труднодоступным участкам. Например, в лазерной хирургии специальными волокнами подводят излучение лазера непосредственно к опухоли или другому объекту, обеспечивая точечное воздействие. Еще одно направление – фототерапия: по световодам можно вводить излучение определенной длины волны в организм для активации лекарственных веществ (фотодинамическая терапия рака кожи и др.). Оптические технологии безопасны для пациента, так как сами волокна электрически инертны (нет риска удара током) и имеют небольшой диаметр, что минимизирует травмы [1].

Освещение и декоративные применения

Световоды нашли широкое применение в системах освещения, где требуется передать свет в труднодоступное место или создать особые световые эффекты. Например, в некоторых случаях солнечный свет направляют с крыши здания вглубь помещений по оптическим волокнам, обеспечивая естественное освещение без электричества. Гибкие световодные световые трубки применяются для подсветки витрин, музеев – источник света (лампа или светодиод) может быть спрятан в удобном месте, а свет подается по волокну к точке экспозиции. В медицине схожим образом используют волоконные осветители для хирургических инструментов: яркая лампа остается вне тела, а через тонкий световод свет поступает в операционное поле. В автомобиле короткие пластиковые световоды служат для подсветки приборной панели, индикаторов – это надежно (нет нагрева лампы возле пластика) и гибко в дизайне.

Отдельно стоит отметить декоративные и художественные применения. Оптоволоконное освещение часто используется для создания декоративных светильников, светящихся занавесей, инсталляций. Волоконная подсветка применяется в рекламных вывесках, аттракционах, на сцене. Даже искусственные ёлки со световодами вместо иголок стали распространенным новогодним украшением – внутрь ёлки устанавливается одна лампа, а разноцветные огоньки на концах «иголок»-волокон создаются за счет преломления и фильтрации света. Такие технологии позволяют получать яркое, но холодное (не нагревающееся) освещение в самых разных формах. Преимущество световодов в осветительных задачах – их гибкость и безопасность: можно подсветить объект в воде, в вакууме, в среде с горючими газами, отнеся сам источник света подальше. Все это делает волоконные световоды универсальным инструментом для инженеров по свету и дизайнеров.

Сенсоры и измерительные системы

Еще одна важная область – волоконно-оптические датчики (сенсоры). Световод может выступать не только как линия связи, но и как чувствительный элемент, реагирующий на изменения окружающей среды. Простейший пример – термометр на основе оптического волокна: при нагреве меняются оптические свойства волокна (например, длина волны пропускания или интенсивность света на выходе), что фиксируется приборами. Волоконно-оптические датчики разработаны для измерения множества величин: температуры, давления, механических напряжений, акустических волн, положения и др.. Благодаря малому размеру и гибкости такой датчик можно разместить там, где обычный электронный не подойдет – например, внутри толстостенной конструкции, в зоне сильных электромагнитных полей, под водой и т.д. Ключевое преимущество: отсутствие электрического тока на самом сенсоре. Это означает полную взрывопожаробезопасность (актуально при измерениях в газовых средах, на нефтеперерабатывающих заводах), а также иммунитет к электромагнитным помехам. Волоконные сенсоры могут работать при экстремальных температурах, при которых электроника выходит из строя. Так, созданы датчики температуры и давления для использования непосредственно в нефтяных скважинах – там, где слишком жарко для полупроводниковых приборов. Также оптические сенсоры применяются в

экологии: с их помощью, например, можно обнаруживать примеси в воде (оптические волокна используют для детектирования содержания аммиака и других веществ).

Другие применения

Помимо вышеперечисленного, световоды используются и в ряде других направлений техники. Оптические волокна являются ключевым компонентом волоконных лазеров – особого класса лазеров, в которых активная среда представляет собой именно оптическое волокно, легированное редкоземельными элементами (например, эрбием, иттрием). Волоконные лазеры широко применяются в промышленности (для резки и сварки материалов) и медицине, а их конструкция невозможна без высококачественных световодов специального типа [2].

Еще одно интересное применение – датчики тока и магнитного поля на основе эффекта Фарадея в оптических волокнах. В специальных волокнах под действием сильного магнитного поля происходит вращение плоскости поляризации света, что позволяет измерять величину тока в проводе (окружающем волокно) без прямого контакта – чисто оптическим способом. Такие устройства используют, например, в энергетике для контроля линий электропередач.

В сфере военной техники и авиастроения волоконно-оптические линии применяются для передачи сигналов управления (система «fly-by-light» – управление самолетом по световым каналам вместо электрических, что повышает помехоустойчивость). В сейсмологии протяженные волоконные кабели служат основой чувствительных сейсмо - датчиков для обнаружения колебаний грунта. В киноиндустрии и телевидении оптоволокно используется для передачи несжатого видеосигнала высокой четкости на большие расстояния (например, от камер на стадионе до аппаратной). Основные проблемы энергоэффективности.

Заключение

Рассмотрев устройство и сферы применения световодов, можно сделать вывод, что эти тонкие нити из стекла или пластика являются одним из краеугольных камней современной техники. За счет уникального физического принципа – полного внутреннего отражения – световоды способны направленно передавать световые сигналы на большие расстояния с малыми потерями. Оптические волокна классифицируются по ряду признаков (одномодовые и многомодовые, стеклянные и пластиковые и др.), каждый вид находит оптимальное применение в своей нише. Главная область использования световодов – телекоммуникации: оптоволоконные линии связи обеспечивают невероятно быстрый и дальний обмен информацией, лежащий в основе Интернета и глобальной связи. Не менее важны медицинские приложения: эндоскопия и лазерная хирургия стали возможны во многом благодаря гибким световодам, передающим свет внутрь организма. В системах освещения и индикации световоды позволили реализовать эффекты и конструкции, недостижимые традиционными лампами. А волоконно-оптические датчики открыли новое направление в измерительной технике, позволяя контролировать процессы там, где электроника бессильна.

Можно ожидать, что в будущем технологии световодов будут совершенствоваться еще больше. Создаются новые типы оптических волокон – с пониженным затуханием, с нелинейными свойствами, фотонно-кристаллические

структуры – расширяя возможности по передаче информации и энергии света. Рост потребностей в скорости передачи данных стимулирует разработку многожильных волокон и новых методов уплотнения каналов. Волоконные лазеры и датчики продолжают развиваться, находя всё более широкое применение. Иными словами, световоды – это не просто «провода для света», а целое семейство высокотехнологичных устройств, без которых невозможно представить ни современные коммуникации, ни медицину, ни науку. Их уникальные свойства еще долго будут востребованы, освещая наш путь в прямом и переносном смысле.

Литература

1. Световод. – URL: <https://science.fandom.com/ru/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4> (дата обращения: 14.03.2025)
2. Применение оптоволокну: ключевые области использования. – URL: <https://homenet.online/ru/primenenie-optovolokna-klyuchevye-oblasti-ispolzovaniya/> (дата обращения: 14.03.2025)

УДК 621.316

СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННО-ПОСТОЯННОГО ТОКА AC DC SYSTEMS

А.А. Кот, К.В. Гайков

Научный руководитель – Счасный В.П., к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

val.sc@mail.ru

A.Kot, K. Haikov

Supervisor – V. Schasniy, Candidate of Technical Sciences, Docent,
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотаци: В статье рассмотрены вопросы использования систем электроснабжения с преобразованием переменного тока в постоянный и обратно, возможность интегрировать возобновляемые источники энергии в линии электропередачи, используя новые типы преобразователей.

Annotation. The article discusses the use of power supply systems with the conversion of AC into DC and vice versa, the possibility of integrating renewable energy sources into power transmission lines using new types of converters.

Ключевые слова. Система электроснабжения, возобновляемые источники энергии, зеленая энергетика, преобразователи, высоковольтные линии, переменный, постоянный ток.

Keywords. Power supply system, renewable energy sources, green energy, converters, high-voltage AC, DC lines.

Введение

За прошедшие десятилетия в мире, благодаря развитию цифровых технологий, различных областей промышленности, появилось множество потребителей электроэнергии переменного-постоянного тока, в том числе с встроенными выпрямителями. Всё больше набирает популярность зеленая энергетика с источниками возобновляемой энергии, для интегрирования которой в энергосистему требуется ряд преобразований. Благодаря развитию силовой электроники существенно улучшились характеристики преобразовательных подстанций, возросла доля распределенной генерации, вырабатывающей электроэнергию на постоянном токе, особенно на обособленных производственных объектах. Все больше используются системы постоянного тока как связующего звена различных источников генерации электроэнергии.

Основная часть

Системы передачи постоянного тока (ППТ) имеют множество областей применения благодаря своим уникальным характеристикам, включая возможность передачи энергии на большие расстояния с минимальными потерями, более высокую эффективность работы, а также простоту интеграции с возобновляемыми источниками энергии. Ниже приведены основные области использования ППТ:

1. Передача электроэнергии на большие расстояния.

Межрегиональные и международные связи: ППТ используется для передачи электроэнергии от удаленных генераторов (включая ветряные и солнечные

электростанции) к крупным городам и промышленным центрам. Примеры включают системы HVDC, которые соединяют разные страны и регионы.

2. Интеграция возобновляемых источников энергии.

Солнечные и ветряные станции: множество солнечных и ветряных электростанций вырабатывают постоянный ток, который можно передавать по системам ППТ, снижая потери и обеспечивая эффективную интеграцию возобновляемых источников в электросети.

3. Системы мини-грид.

Энергоснабжение отдаленных районов: ППТ используются в мини-грид системах для обеспечения электроэнергией удаленных населенных пунктов особенно в тех регионах, где подключение к основной сети невозможно или экономически нецелесообразно.

4. Энергетические мосты и гибридные системы.

Объединение различных энергетических систем: ППТ применяются для связывания различных энергетических систем и интеграции источников энергии, работающих на переменном и постоянном токе. Это способствует более эффективному управлению потоками энергии.

5. Электроника и электромобили.

Зарядные станции для электромобилей: использование ППТ для зарядных станций электромобилей позволяет ускорить процесс зарядки благодаря высокой мощности постоянного тока.

6. Устойчивое развитие и борьба с энергетической бедностью.

Энергетическая независимость: ППТ могут использоваться для создания автономных источников энергии в развивающихся странах, что способствует улучшению доступа к электричеству и снижению зависимости от ископаемого топлива.

Мини-грид (minigrid) представляет собой небольшую локальную электросеть, которая может функционировать автономно или в связке с основной электросетью. Эти системы предназначены для обеспечения электроэнергией удаленных, изолированных или недостаточно обслуживаемых районов, где подключение к централизованной сети является экономически нецелесообразным или технически затруднительным.

Основные характеристики мини-грид:

- обслуживают ограниченную территорию, как правило, несколько населенных пунктов или отдельный поселок;
- могут работать независимо от основной сети, что особенно важно в регионах, подверженных частым отключениям электроэнергии или в ситуациях, когда основная сеть недоступна;
- используют комбинацию возобновляемых источников (таких как солнечная и ветровая энергия) и традиционных источников (таких как дизельные генераторы) для обеспечения стабильности энергоснабжения;
- большинство мини-гридов работают на низком и среднем напряжении, что упрощает распределение энергии и снижает затраты на инфраструктуру.

В компоненты мини-грид могут входить солнечные панели, ветряные турбины и дизельные генераторы, которые служат подстраховкой в случае нехватки энергии из возобновляемых источников энергии.

В преимущества данной системы можно отнести использование зеленой энергетики, которая способствует снижению углеродных выбросов и делает энергоснабжение более устойчивым. Также установка мини-гридов может быть более экономичной для небольших сообществ по сравнению с прокладкой линий электропередач к основной сети.

Они могут быть легко адаптированы к потребностям сообщества, включая масштабирование и модификацию в зависимости от изменения спроса на электроэнергию.

Самая протяженная ЛЭП постоянного электрического тока на 1100 кВ находится в Китае. ЛЭП Чанцзи-Гуцюань имеет длину более 3000 км и содержит более 6 тысяч опор.

У ЛЭП постоянного тока существуют множества преимуществ над ЛЭП переменного тока:

- существует такое соотношение длины линии, при которой стоимость передачи постоянного тока становится выгодней, чем переменного: примерно 700 км для воздушной линии 30-50 для кабелей;
- линия постоянного тока стоит дешевле, чем линии переменного тока из-за меньшего количества проводов, изоляторов, линейной арматуры и более легких опор.

Линия постоянного тока может поставлять сопоставимые объемы, или даже более высокие объемы энергии, используя только два набора проводников вместо трех. Поэтому, башни не должны быть такими большими, а также вы можете прокладывать более длинные линии постоянного тока под землей. Выбор линий постоянного тока экономически оправдан при их очень большой длине, когда удорожание подстанций компенсируется удешевлением линии (рисунок 1).

На нормальный режим работы линии постоянного тока не оказывают влияния ее реактивные параметры – емкость и индуктивность. Это значит, что падения напряжения на ней гораздо меньше, чем на линии переменного тока. Это создает предпосылки для увеличения радиуса действия линии постоянного тока по сравнению с ЛЭП переменного тока. Они идеальны для соединения разных энергосистем, не синхронизируя их при этом.

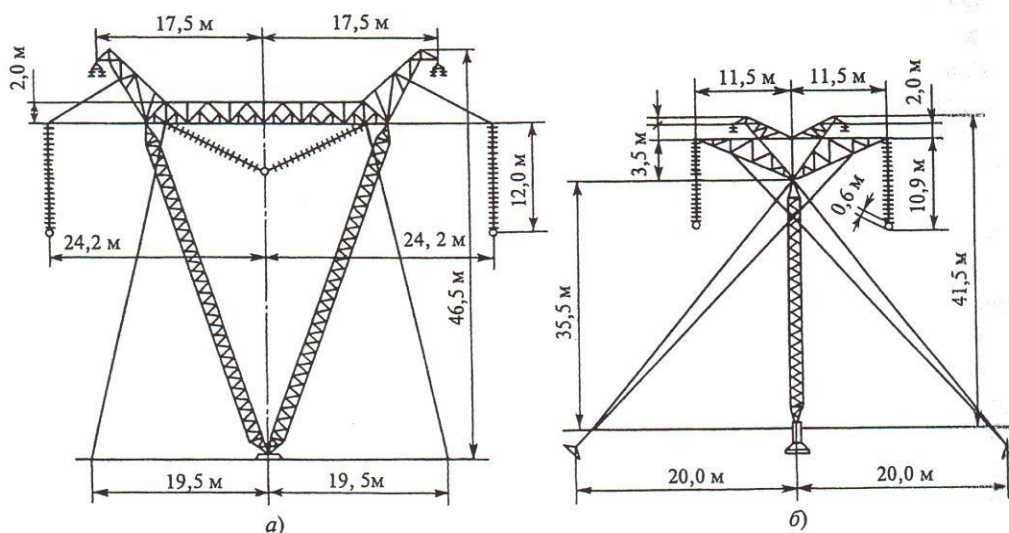


Рисунок 1. Пример промежуточной опоры электропередач переменного и постоянного тока в одном масштабе: *а* – опора ВЛ переменного тока 1150 кВ Экибастуз Урал: пропускная способность 5000 МВт, плотность тока 0,95 А/мм², провод 8хАС 330, общая масса опоры 19,8 т; *б* – опора ВЛ постоянного тока Экибастуз – Центр: пропускная способность 6000 МВт, плотность тока 0,66 А/мм², провод 5хАС 120 065, шаг расщепления 600 мм общая масса опоры 9,4т.

Можно взять пример Японии, где активно используются вставки постоянного тока, т.к. из-за исторических обстоятельств север Японии использует ток частотой 50 Гц, а юг — 60 Гц (рисунок 2).

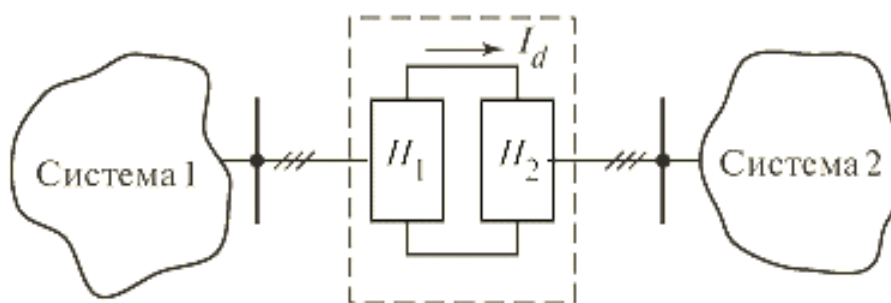


Рисунок 2. Пример вставки постоянного тока, где Π_1 и Π_2 – преобразователи.

Следует отметить, что при связи двух энергосистем на постоянном токе аварийные режимы в одной из энергосистем не отражаются на работе другой энергосистемы столь непосредственно, как это происходит при связи на переменном токе. Кроме того, исключается подпитка места короткого замыкания в одной энергосистеме со стороны другой. Поэтому, объединение энергосистем или ввод дополнительной мощности в энергосистему через электропередачу постоянного тока не приводит к увеличению токов короткого замыкания и не требует соответствующей замены всего оборудования, и, прежде всего, выключателей.

Намного выгоднее использовать расщепление фазы. Кроме уменьшения потерь и увеличения пропускной способности, увеличение с помощью расщепленной фазы эквивалентного радиуса провода позволяет снизить напряженность поля у поверхности этого эквивалентного провода, а значит, и снизить потери на коронный разряд.

Но у ЛЭП постоянного тока существуют и недостатки:

- установка дорогостоящих конечных подстанций с большим количеством преобразователей напряжения и остальной аппаратурой;
- установка сглаживающих устройств большой мощности. Преобразовательная техника довольно сильно искажает форму кривой напряжения на стороне переменного тока, а это значит и увеличение расходов, и снижение надежности.

Сегодня мир стала захватывать зеленая энергетика. Это означает, что были найдены способы получения постоянного и переменного тока при помощи возобновляемых источниках энергии. В него входят солнце, вода, ветер.

Учёные оценивают потенциал солнечной энергии как самый большой и доступный для человечества, прогнозируют, что к 2060 г. доля энергии солнца на мировом энергетическом рынке составит более 50 %, что опять же говорит о её популярности в будущем.

Системы солнечной энергии уже используются для подключения к электросети благодаря инверторам, однако в будущем они могут стать более интегрированными.

Например, развиваются технологии использования солнечной энергии для таких целей, как производство водорода, который может быть использован в качестве топлива для автомобилей и даже кораблей. Развитие гибридных систем, которые сочетают в себе несколько источников возобновляемой энергии, таких как солнечная и ветровая энергия, для увеличения надежности энергоснабжения.

Ещё есть ветряные турбины (ветряки), которые вырабатывают переменный ток, способствует снижению зависимости страны от импортного ископаемого топлива. Снижает уязвимость к колебаниям цен на мировом энергетическом рынке, перебоям в поставках и геополитическим конфликтам, связанным с импортом энергии. Ну а к минусам можно отнести шум и затраты на саму постройку ветряных лопастей, а также непостоянство.

Но как нам перенаправлять полученную энергию? Если использовать линии переменного тока, то это будет экономически невыгодно. Если линии постоянного тока, то на сегодняшний день не существует способа без больших потерь изменять в широких пределах напряжение постоянного тока, кроме трансформатора, который работает на переменном токе. Поэтому в рамках данной проблемы была придумана HVDC [1].

HVDC – это высоковольтная линия постоянного тока. При помощи данной технологии можно перенаправлять постоянный ток с высоким напряжением. Но так как просто взять и повысить напряжение постоянного тока нельзя, то была придумана преобразовательная станция. При помощи станции можно превращать переменный ток в постоянный, и наоборот. Смотря какой ток нам надо получить, станция может работать как инвертором, так и выпрямителем. Пример: если по линии течет постоянный ток, то станция играет роль инвертора, преобразует постоянный в переменный, попутно с этим повышая напряжение, а уже после становится выпрямителем и преобразует полученный переменный ток с

высоким напряжением в постоянный. Данные линии хороши при передаче электроэнергии на большие расстояния. Они также соединяют сети с различными частотами и характеристиками.

Сегодня можно выделить два основных типа преобразователей — старые LCC (преобразователи с линейной коммутацией) и современные VSC (преобразователи с источником напряжения), в зависимости от типа используемых компонентов [2].

Системы на основе преобразователей с линейной коммутацией (LCC) — магистрали высокого и сверхвысокого напряжения (до 800 кВ). Строительство таких сетей оптимально для передачи электроэнергии на дальние расстояния (более 700 км), например, когда крупный генерирующий объект расположен вдалеке от конечных потребителей. Такие системы носят название «двухточечных» HVDC. Данная система основана на тиристорах.

Вторая система — на преобразователях напряжения (VSC). Такие сетевые объекты имеют гораздо меньшие габариты по сравнению с LCC, что делает их оптимальным решением для подключения к магистральным сетям ветропарков на морских платформах. Это особенно актуально в случае, когда расстояние до берега превышает 50 км. Данная технология основана на транзисторах.

Заключение

Зеленая энергетика — это новая веха в энергетике, логическое продолжение её развития с учётом наших знаний и возможностей. А высоковольтные линии постоянного тока дают этой возможностью воспользоваться.

Технологии преобразования переменного тока (AC) в постоянный (DC) и обратно играют ключевую роль в современной энергетике, особенно в контексте развития зеленой энергетике. Основные преимущества таких систем заключаются в следующем:

1. Эффективная передача энергии на большие расстояния и снижение потерь:

- преобразование переменного тока в постоянный позволяет минимизировать потери при передаче электроэнергии на сверхдальние расстояния (более 700 км). Это особенно важно для интеграции удаленных возобновляемых источников энергии, таких как ветряные и солнечные электростанции, в общую энергосистему;

- линии постоянного тока (DC) имеют меньшие потери на больших расстояниях по сравнению с линиями переменного тока (AC). Это делает их экономически выгодными для передачи энергии от удаленных генераторов к потребителям;

- отсутствие влияния реактивных параметров (емкости и индуктивности) в линиях DC позволяет увеличить радиус действия передачи энергии.

2. Интеграция возобновляемых источников энергии:

- солнечные панели вырабатывают постоянный ток, а ветряные турбины переменный. Преобразовательные станции (HVDC) позволяют эффективно объединять эти источники, преобразуя ток в нужный формат для передачи и распределения;

- технологии HVDC обеспечивают стабильное подключение морских ветропарков и других удаленных объектов ВИЭ к основной сети.

3. Соединение энергосистем с разными характеристиками:

- преобразовательные станции позволяют объединять энергосистемы с разными частотами (например, 50 Гц и 60 Гц) без необходимости синхронизации. Это особенно важно для международных энергетических проектов и интеграции возобновляемых источников энергии.

Преобразование переменного тока в постоянный и обратно является важным элементом современной энергетики, особенно если мы говорим про зеленую энергетику. Оно обеспечивает эффективную передачу энергии, интеграцию ВИЭ, снижение потерь и поддержку устойчивого развития. Эти технологии играют ключевую роль в создании гибких, надежных и экологически чистых энергосистем будущего. Грамотное использование переменного и постоянного тока вместе – ключ к успеху человечества.

Литература

1. POWER: Новости и технологии для мировой энергетической отрасли: [сайт]. – URL: <https://www.powermag.com/benefits-of-high-voltage-direct-current-transmission-systems/> (дата обращения: 18.02.2025)
2. Электрик Инфо: [сайт]. – URL: <https://electrik.info/main/fakty/1820-peredacha-postoyannogo-toka.html> (дата обращения: 18.02.2025)

УДК 621.3

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШ-
ЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
PERSPECTIVE SYSTEMS OF POWER SUPPLY OF INDUSTRIAL ENDUS-
TRIAL ENTERPRISES**

Е. И. Кашкевич, Н.Д. Шибeko

Научный руководитель – С. В. Константинова, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

E. Kashkevich, N. Shibeko

Supervisor – S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: В работе исследуются современные подходы к организации электроснабжения промышленных предприятий в условиях растущего спроса на электрическую энергию и экологических проблем. Рассмотрены ключевые технологии в области электроснабжения: умные сети (Smart Grid), микросети, гибридные системы с интеграцией возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и накопителей. Проанализированы экономические, технические и экологические аспекты их внедрения в уже существующие системы, а также препятствия и перспективы развития. На основе анализа предложены рекомендации для промышленных потребителей.

Abstract: The paper studies modern approaches to the organisation of power supply to industrial enterprises in the context of growing demand for electricity and environmental problems. The paper considers key technologies in the field of power supply: Smart Grid, microgrids, hybrid systems with the integration of renewable energy sources (RES) and storage. The economic, technical and environmental aspects of their implementation in existing systems, as well as obstacles and development prospects are analysed. Based on the analysis, recommendations for industrial consumers are proposed.

Ключевые слова: электроснабжение, возобновляемые источники энергии, микросети, цифровизация, системы накопления энергии.

Keywords: electricity supply, renewable energy sources, micro grids, digitalization, energy storage systems.

Введение

Промышленные предприятия — крупнейшие потребители электроэнергии (до 40% мирового энергопотребления). Традиционные централизованные сети не справляются с требованиями устойчивости, энергоэффективности и гибкости. Рост тарифов, ужесточение экологических норм (Парижское соглашение), потери электрической энергии на больших расстояниях и риски перебоев стимулируют переход к инновационным системам.

Основная часть

1. Основные проблемы современных систем электроснабжения:

1.1) Старение инфраструктуры. В большинстве стран энергосистемы (линии электропередач, подстанции, трансформаторы) технологически устарели, и

потеряли свою актуальность, что повышает риски аварий и потерь энергии. К примеру, в странах СНГ значительная часть сетей построена в середине XX века и не рассчитана на современные нагрузки.

1.2) Внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Из-за зависимости от погодных факторов солнечные и ветровые электростанции создают нестабильность в сетях, что приводит к сбоям в подаче электроэнергии, авариям или угрозе коллапса системе.

1.3) Изменение климата и экстремальные явления. Уязвимость энергетической инфраструктуры к климатическим изменениям и природным катаклизмам, что может привести к массовым отключениям. К примеру, события в Гомельской области РБ в 2024 году, где стихия нанесла серьезный ущерб энергетической инфраструктуре региона.

1.4) Рост спроса на электромобили. Массовый переход населения развитых стран на использование электромобилей требует модернизации сетей для пиковых нагрузок (рисунок 1). К примеру, в США к 2030 году прогнозируют увеличение спроса на электроэнергию на 25% из-за увеличения количества электро транспорта. А в РБ к 2025 году число электромобилей увеличилось в 2 раза по сравнению с 2022 годом.

АВТОМОБИЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ БАА

БЕЛАРУСЬ: РОСТ ПАРКА ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

- 10-кратный рост парка электромобилей
- При сохранении текущих условий рост парка в ближайшие годы **до 100 000 авто**



Рисунок 1 – Тенденция роста парка электромобилей в РБ

1.5) Декарбонизация и отказ от ископаемого топлива

Замена угольных и газовых электростанций требует огромных инвестиций в строительстве новой инфраструктуры и переобучения кадров.

2. Оценка роли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и систем накопления энергии (СНЭ).

Роль возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и систем накопления энергии (СНЭ) в современном мире энергетики крайне значима. Их внедрение трансформирует глобальную энергетику, экономику и экологию. Вот ключевые аспекты их влияния [1, 2, 3]:

2.1) Декарбонизация и борьба с изменением климата

- ВИЭ (солнечная, ветровая, гидро-, геотермальная энергия, биомасса) заменяют ископаемое топливо, сокращая выбросы CO₂. Например, по данным Международного Энергетического Агентства (МЭА), в перспективе ВИЭ могут стать крупнейшим источником электроэнергии, обогнав уголь.

- Системы накопления энергии (литий-ионные батареи, гидроаккумулирующие станции, водородные системы) решают проблему нестабильного генерирования ВИЭ, накапливая избыток энергии для использования в периоды низкой генерации (ночь, безветрие).

2.2) Энергетическая безопасность и независимость

- Повышение эффективности источников: ВИЭ снижают зависимость от импорта ископаемого топлива, что особенно важно для стран с дефицитом энергетических ресурсов.

- Децентрализация: Солнечные панели и домашние СНЭ позволяют создавать локальные микросети, повышая устойчивость систем электроснабжения к авариям и кризисам.

2.3) Технологический прогресс и экономика

- Снижение стоимости: Цена солнечных панелей упала на 80% за последнее десятилетие, а литий-ионных батарей — на 90%. Это делает ВИЭ и СНЭ более конкурентоспособными.

- Создание рабочих мест: ВИЭ обеспечивает рабочие места 13,7 млн человек в мире. Лидеры — Китай, ЕС, США.

- Инновации: Развитие новых технологий накопления (твердотельные батареи, гравитационные системы).

2.4) Социальные и экологические вызовы

- Землепользование: Ветряные и солнечные фермы, а также ГЭС требуют больших площадей, что негативно сказывается на сельском хозяйстве и животном мире.

- Ресурсы для СНЭ: Добыча лития, кобальта и редкоземельных металлов вызывает экологические и этические вопросы.

- Утилизация: Переработка батарей пока недостаточно развита, но некоторые компании (Redwood Materials, Northvolt) активно работают над замкнутым циклом переработки.

2.5) Перспективы и проблемы

- Сценарии развития: К 2050 году ВИЭ могут покрывать 60-85% мирового спроса на электроэнергию (МЭА), но для этого требуется:

- Инвестиции в ВИЭ и СНЭ (до \$1.3 трлн в год).

- Гибкое регулирование и поддержка государств (налоговые льготы, льготные тарифы).

- Региональные различия: В ЕС и Китае внедрение ВИЭ идёт быстро, в развивающихся странах — медленнее из-за высокой стоимости инфраструктуры и отсутствия инвестиций. В РБ доля ВИЭ в энергетическом балансе электрической энергии составляет лишь 1.5% (рисунок 2).

Рост установленной мощности ВИЭ

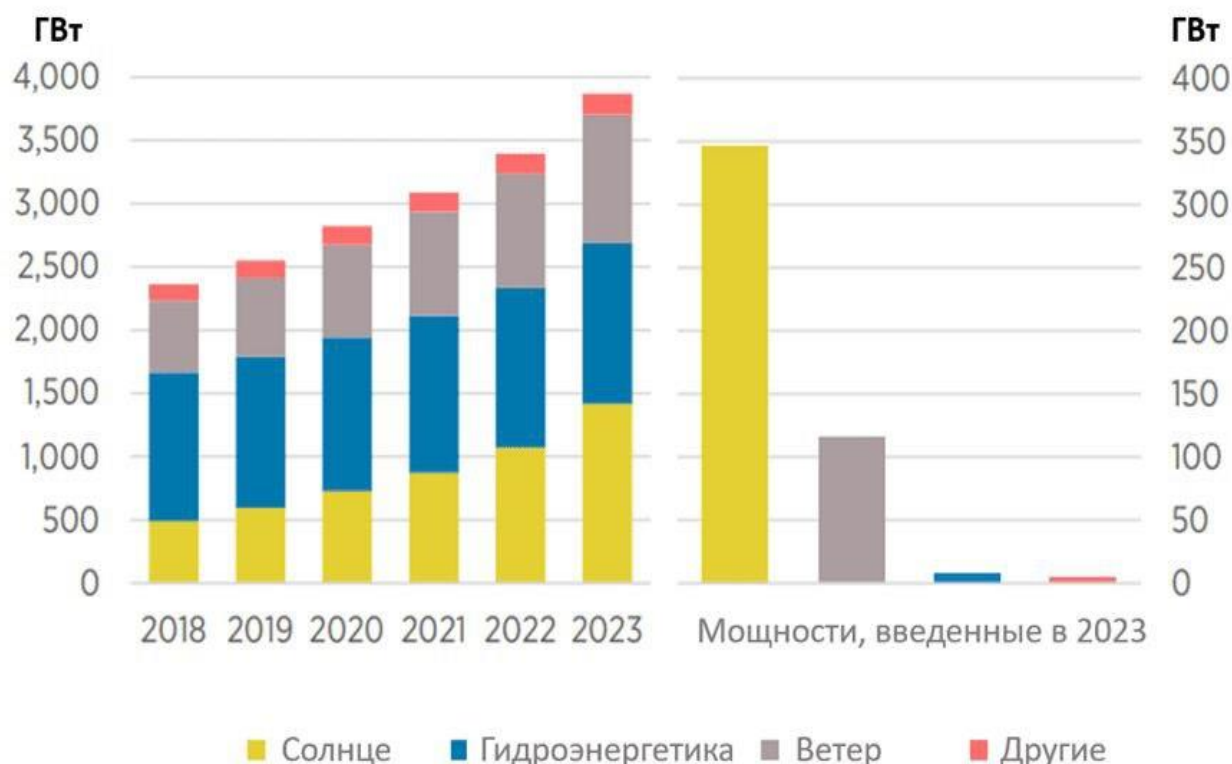


Рисунок 2 – Рост установленной мощности ВИЭ в мире

ВИЭ и СНЭ — основа энергетики будущего, но их успех зависит от системного подхода: интеграции с традиционной энергетикой, развития smart-сетей и международного сотрудничества. Без накопителей возобновляемая энергия останется дополнением, а с ними — станет основой безуглеродного мира.

3. Изучение влияния цифровизации на управление энергопотоками.

Изучение влияния цифровизации на управление энергопотоками охватывает множество аспектов, связанных с внедрением современных технологий в энергетическую отрасль [4].

3.1) Основные технологии цифровизации в энергетике:

- Умные устройства: Датчики и устройства собирают данные о потреблении, генерации и передаче энергии в реальном времени.
- Искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение: Оптимизация прогнозирования спроса, балансировка сетей, обнаружение аварий.
- Программы для обработки информации: Анализ больших массивов данных для повышения эффективности управления энергосистемами.
- Цифровые двойники: Моделирование энергосистем для тестирования сценариев и предотвращения сбоев.

3.2) Влияние на управление энергопотоками:

А. Оптимизация генерации и распределения электроэнергии

- Умные сети (Smart Grids): Автоматическое перераспределение энергии, минимизация потерь, интеграция ВИЭ (ветер, солнце).
- Прогнозирование: Точные прогнозы генерации и потребления с учетом погоды, времени суток, поведения пользователей.

- Микросети и децентрализация: Локальные энергосистемы с автономным управлением, снижение зависимости от централизованных сетей.

В. Участие потребителей

- Потребители становятся производителями (солнечные панели, домашние аккумуляторы).

- Динамическое ценообразование: Тарифы меняются в зависимости от нагрузки (например, ночью энергия дешевле).

С. Снижение потерь и повышение надежности

- Мониторинг в реальном времени: Быстрое обнаружение утечек, аварий, несанкционированного доступа.

- Предиктивная аналитика: Предупреждение поломок оборудования до их возникновения.

3.3) Интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ):

- Цифровизация позволяет управлять нестабильной генерацией от ВИЭ, балансируя ее с накопителями (батареи, гидроаккумулирующие станции) [5, 6].

- Пример: В Германии цифровые системы автоматически переключают потоки энергии между регионами при изменении ветровой или солнечной активности.

3.4) Примеры внедрения:

- Европа: Проекты умных сетей (Smart Grids) в рамках «Зеленого курса» для достижения декарбонизации.

- Китай: Национальная система мониторинга энергопотребления на основе ИИ.

- США: Использование цифровых двойников для моделирования энергосетей (например, компания GE).

3.5) Сопутствующие проблемы:

- Высокие затраты: Модернизация инфраструктуры требует значительных инвестиций.

- Регуляторные барьеры: Необходимость адаптации законодательства под новые модели.

- Квалификация кадров: Дефицит специалистов в области цифровой энергетики.

3.6) Перспективы:

- Умные города: Полностью автоматизированные и саморегулирующиеся энергосистемы.

- Гибридные системы: Комбинация ВИЭ, водородной энергетики и традиционных источников с цифровым управлением.

Цифровизация кардинально меняет управление энергопотоками, делая его более гибким, эффективным и экологичным. Однако успех зависит от решения технических, финансовых и регуляторных задач. Страны и компании, которые смогут интегрировать инновации, получают преимущество в переходе к устойчивой энергетике будущего. На сегодняшний момент развитие «умных сетей» в Беларуси находится на самом начальном уровне. Мировой опыт в реализации пилотных проектов и многочисленные исследования показывают, что применение интеллектуальных сетей в перспективно и экономически оправдано. На сегодняшний момент Smart Grid системы – это закономерный этап развития электроэнергетики с учетом мировых технических достижений. К этому стоит добавить

и тот факт, что для нашей страны не встанет вопрос о разработке основных концепций, ведь уже сейчас накоплен огромный опыт, который можно перенять и использовать уже установившееся и работающие технологии. Вероятно, внедрение «умных сетей» позволило бы решить проблемы с интеграцией Белорусской АЭС в энергосистему страны.

4. Рекомендации для промышленных предприятий в области энергетики будущего.

Промышленные предприятия играют ключевую роль в современной энергетике. Для минимизации затрат, декарбонизации и повышения конкурентоспособности предприятий рекомендуется:

4.1) Внедрение энергоэффективных технологий:

- Энергоаудит: проведение регулярного анализа энергопотребления для выявления «слабых мест» (устаревшее оборудование, потери в сетях).
- Модернизация оборудования: замена электродвигателей, насосов, систем вентиляции и других видов оборудования на энергоэффективные модели.
- Системы рекуперации: использование тепла от производственных процессов для отопления или генерации электроэнергии.

4.2) Переход на возобновляемые источники энергии (ВИЭ):

- Солнечные панели и ветрогенераторы: установка на территории предприятия для покрытия части энергопотребления.
- Зеленые РРА (Power Purchase Agreements): заключение долгосрочных контрактов на покупку энергии от ВИЭ-станций.
- Водородные технологии: использование «зеленого» водорода для энергоемких процессов (например, в металлургии, химической промышленности).

4.3) Цифровизация энергоменеджмента:

- Умные сети (Smart Grids): внедрение умных датчиков для мониторинга энергопотоков в реальном времени.
- Цифровые двойники: создание виртуальных моделей производственных линий для оптимизации энергозатрат.
- Искусственный интеллект: прогнозирование пиковых нагрузок и автоматическое перераспределение энергии между цехами.

4.4) Системы накопления энергии (СНЭ):

- Промышленные аккумуляторы: накопление избыточной энергии от ВИЭ для использования в периоды высоких тарифов.
- Гидроаккумулирующие системы: для предприятий с доступом к водным ресурсам.
- Тепловые накопители: сохранение избыточного тепла для последующего использования.

4.5) Управление спросом:

- Гибкие тарифы: участие в программах, где энергопотребление корректируется в зависимости от цены (например, работа ночью при низких тарифах) [7].
- Автоматизация процессов: интеграция систем, которые временно отключают неключевое оборудование при пиковых нагрузках на сеть.

4.6) Круговая экономика и устойчивость:

- Переработка отходов в энергию: использование биогаза из органических отходов или тепла от промышленных процессов.

- Декарбонизация: внедрение стандартов ESG (Environmental, Social, Governance) и участие в углеродных рынках.

- Цикл использования оборудования: выбор техники с возможностью ремонта, модернизации и утилизации.

4.7) Обучение и развитие персонала:

- Цифровые компетенции: подготовка специалистов по работе с ИИ, умным оборудованием и системами управления энергопотоками.

4.8) Партнерства и регуляторная поддержка:

- Участие в государственных программах: получение субсидий или налоговых льгот за внедрение «зеленых» технологий.

- Объединения с другими предприятиями: совместные проекты по строительству ВИЭ-станций или систем хранения энергии.

4.9) Адаптация к глобальным трендам:

- Декарбонизация: постепенный отказ от ископаемого топлива в пользу ВИЭ и водорода.

- Гибридные энергосистемы: комбинация солнечных панелей, ветрогенераторов и газовых турбин с улавливанием CO₂.

- Участие в международных инициативах: например, в рамках Парижского соглашения.

Промышленные предприятия, внедряющие цифровые технологии, ВИЭ и принципы устойчивости, не только снижают операционные затраты, но и укрепляют свою репутацию на рынке. Ключевыми пунктами для этого являются: энергоаудит и пилотные проекты; интегрирование ИИ и умных систем для оптимизации; активное участие в «зеленой» энергетике через инвестиции и инновации, что позволит оставаться конкурентоспособными в эпоху энергетического перехода.

Заключение

Перспективы электроснабжения промышленных предприятий в условиях глобальной энергетической трансформации связаны с интеграцией инновационных технологий, декарбонизацией и повышением устойчивости энергосистем. Анализ позволяет выделить следующие ключевые направления развития:

- 1) Цифровизация управления энергопотоками;

- 2) Переход на гибридные и возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и системы накопления электроэнергии (СНЭ);

- 3) Устойчивость и ресурсная эффективность;

- 4) Адаптивность инфраструктуры.

Такие проблемы, как высокая стоимость модернизации, дефицит квалифицированных кадров возможно решать с помощью государственных программ поддержки. В долгосрочной перспективе промышленные предприятия, ориентированные на гибкие энергосистемы, цифровые инновации и декарбонизацию, смогут сократить затраты. Успех зависит от системного подхода к управлению ресурсами, своевременной адаптации, стратегий, инвестиций в инфраструктуру и активного взаимодействия с научным сообществом.

Литература

- 1.Альтернативные источники энергии [сайт]. – URL: <https://nsportal.ru/ap/library/nauchno-tekhnicheskoe-tvorchestvo/2018/05/22/proekt-alternativnye-istochniki-energii> (дата обращения:25.03.2025).
- 2.Системы электроснабжения: проблемы, инновации, перспективы [сайт]. – URL: <https://rosbuild-expo.ru/ru/articles/sistemy-elektrosnabzheniya> (дата обращения:27.03.2025).
- 3.Декарбонизация экономики и энергетических систем [сайт]. – URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/521106-dekarbonizatsiya-ekonomiki-i-energeticheskikh-sistem> (дата обращения:30.03.2025).
4. Дэниел Ергин. В поисках энергии. Ресурсные войны, новые технологии и будущее энергетики. Москва, 2017.-720 с.
5. Альтернативные источники энергии и энергосбережение : практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы / В. Германович, А. Турилин. — Санкт-Петербург : Наука и Техника, 2014. 317 с.
6. Тенденции на белорусском и мировом рынках электромобилей: реальность и перспективы [сайт]. – URL: <https://belchemoil.by/news/tehnologii-i-trendy/tendencii-na-belorusskom-i-mirovom-rynkah-elektromobilej-realnost-i-perspektivy> (дата обращения:..30.03.2025).
7. Основные показатели глобального использования возобновляемых источников энергии в 2023 году [сайт]. – URL: <https://eepir.ru/new/osnovnye-pokazateli-globalnogo-ispolzovaniya-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-v-nbsp-2023-nbsp-godu/> (дата обращения:..02.04.2025).

УДК 628.974.8

АРХИТЕКТУРНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ ARCHITECTURAL LIGHTNING

Е.Д. Михальцевич, Е.Р. Медовский, А.И. Новик

Научный руководитель – В.Б. Козловская, к.т.н., доцент,

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

E. Mikhaltsevich, E. Medovsky, A. Novik

Supervisor – V. Kozlovskaya, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в данной статье рассматриваются виды архитектурного освещения, а также источники света, которые используются в архитектурном освещении.

Abstract: This paper discusses the types of architectural lighting and the light sources that are used in architectural lighting.

Ключевые слова: архитектурное освещение, освещение, осветительные приборы.

Keywords: architectural lighting, lighting, lighting fixtures.

Введение

Уличное освещение давно утратило статус простого средства для улучшения видимости в ночное время.

В настоящее время оно стало важным элементом комфортной городской среды и свидетельством благоустройства. Благодаря развитию технологий, освещение стало использоваться как художественный инструмент, подчеркивающий эстетическую ценность архитектурных объектов.

С помощью декоративного освещения можно формировать уникальный облик любого здания, включая те, что выполнены по стандартным проектам.

В данной статье рассмотрены виды архитектурного освещения, а также перспективы развития этого направления.

Основная часть

Сегодня, архитектурное освещение по своему назначению подразделяется на два типа: функциональное и декоративное.

Функциональное освещение обеспечивает комфорт и безопасность горожан на улицах, особенно в темное время. При создании функциональной подсветки зданий и фасадов тщательно подбирают источники света. Каждый светильник эффективно освещает максимальное пространство, не вызывая при этом зрительного дискомфорта.

Декоративное освещение украшает городские пространства, делая их более запоминающимися. Во время особых дат, таких как фестивали, соревнования или праздники, фасадная подсветка становится не просто украшением, но и неотъемлемой частью праздничной атмосферы [1, 2].

Принципы архитектурного освещения:

Функции: Освещение обеспечит возможность отображения различных задач. В жилых и офисных помещениях важно обеспечить комфорт для работы и

отдыха. В общественных местах, таких как улицы и площади, освещение обеспечивает безопасность и ориентацию.

Эстетика: Архитектурный свет подчеркивает особенности зданий и создает визуальный интерес. Точное распределение света и сияния изменит восприятие форм, выбор текстур и материалов. Эстетический свет может фокусироваться на основных факторах, таких как предметы, скульптуры или ландшафт.

Атмосфера: Свет, который влияет на эмоциональное восприятие пространства. Горячие цвета создают комфортную атмосферу, в то время как холодные считаются более интимными и современными. Использование различных уровней яркости и цветовой температуры позволяет создавать множество различных настроений в зависимости от времени суток и назначения помещения.

Современные технологии освещения являются важным шагом в области архитектуры и дизайна интерьеров, а также для обеспечения безопасности и комфорта в городской среде. Эти технологии включают в себя использование светоизлучающего диода (LED), отличающегося высокой энергоэффективностью и долговечностью, а также возможностью регулировки яркости и цветовой температуры.

Кроме того, современные системы освещения могут быть интегрированы в интеллектуальные системы управления, что позволяет оптимизировать энергопотребление и управление освещением в зависимости от времени суток и работы пользователя. Внедрение этих технологий не только улучшает интуитивное восприятие пространства, но и способствует созданию более стабильной и экологически чистой городской среды.

Влияние архитектурного освещения на пространство является важным аспектом, который заслуживает тщательного изучения в контексте архитектурного дизайна и городской среды.

Правильно организованное освещение не только улучшает видимость и безопасность, но и формирует эмоциональное восприятие пространства, создавая определённую атмосферу.

Архитектурное освещение может акцентировать внимание на ключевых элементах зданий и ландшафта, подчеркивая их эстетическую ценность и уникальность. Кроме того, оно способствует созданию визуальных связей между различными элементами городской инфраструктуры, что в свою очередь влияет на восприятие и поведение людей в этих пространствах.

Таким образом, архитектурное освещение играет ключевую роль в формировании комфортной и привлекательной городской среды, способствуя не только функциональности, но и эстетическому наслаждению.

Архитектурное освещение выполняет не только утилитарную функцию, но и существенно влияет на восприятие пространства как пешеходами, так и водителями. В связи с этим существуют определенные требования, установленные законодательными нормами. К ним относятся следующие положения [1, 3]:

1. Архитектурное освещение должно быть спроектировано так, чтобы не ослеплять пешеходов и водителей.

2. При разработке архитектурного освещения необходимо учитывать отражающие свойства поверхностей объекта.

3. Следует избегать значительных различий в уровне освещенности при заливаемом освещении, принимая во внимание количество цветов и рельеф поверхности объекта

4. Допускается увеличение яркости на 50% с учетом отражающих свойств поверхности, если объект рассматривается с расстояния 300 метров и более..

В ТКП о наружном освещении населенных пунктов [1] указывается, что при освещении архитектурных объектов, например, фонтана используется одноцветное или многоцветное освещение.

При проектировании освещения фонтана предусматривается освещение всех его элементов посредством осветительных приборов. Для вертикальных или наклонных струй используют осветительные приборы с концентрированной кривой силы света. Освещение наклонных струй, падающих вниз, осуществляется осветительными приборами с косинусной или полуширокой кривой силы света, расположенными в зоне падения струй. Осветительные приборы располагают скрыто. Выбор приема освещения фонтана определяется художественным содержанием, его композицией, гидродинамическими показателями, а также характером окружающего ансамбля.

При освещении зеленых насаждений, как правило, используется прием интенсивного подсвета отдельных деревьев, кустарников и цветников, создавая достаточный контраст между освещенными объектами и фоном.

В световых приборах подсвета зелени для ограничения ослепленности применяются защитные решетки и экраны или размещать приборы так, чтобы световые пучки не были направлены в сторону наблюдателей. [1]

Заключение

Архитектурное освещение – это очень многогранная тема, сочетающая в себе технические, эстетические и психологические аспекты. Современные технологии открывают новые возможности для создания уникальных световых решений, которые могут существенно изменить восприятие пространства.

Важно учитывать не только функциональные требования, но и эмоциональное воздействие света на пользователей. В будущем архитектурное освещение продолжит развиваться, становясь неотъемлемой частью архитектурного дизайна и городской среды.

Литература

1. Наружное освещение городов, поселков и сельских населенных пунктов / А.Б. Дранун, Д.В. Сизиков, И.В. Иванина, О.О. Кудревич – 19 с. – URL: https://stn.by/files/projects/-sp_naruzhnoe_osveschenie_gorodov,_poselkov_i_selskih_naselennyh_punktov.pdf (дата обращения: 25.03.2025).

2. Подольский завод светотехники [сайт]. - / Архитектурное освещение — URL: <https://terra-led.ru/reviews/detail/arkhitekturnoe-osveshchenie/> (дата обращения: 21.03.2025).

3. Architectural Lighting Controls in Building Automation Systems [сайт]. - – URL: https://www.researchgate.net/publication/331971626_Architectural_Lighting_Controls_in_Building_Automation_Systems (дата обращения: 22.03.2025).

УДК 621.316

ИНДУКЦИОННЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ С ЧАСТОТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ INDUCTION HEATERS WITH FREQUENCY REGULATION

И.И. Кирилук

Научный руководитель – Счасный В.П., к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

val.sc@mail.ru

I.I. Kiriluk

Supervisor – V. Schasniy, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: *индукционные нагреватели с частотным регулированием, их применение на производственных объектах, устройство и принцип работы.*

Abstract: *Induction heaters with frequency control, their application at production facilities, design and principle of operation.*

Ключевые слова: *индукционная катушка, генератор частоты, LC-генератор, RC-генератор.*

Keywords: *induction coil, frequency generator LC- generator, RC- generator.*

Введение

Индукционные нагреватели с частотным регулированием представляют собой современное и высокоэффективное оборудование, которое позволяет точно контролировать процесс нагрева за счёт изменения частоты переменного тока, подаваемого на индукционную катушку. Такие нагреватели широко применяются на ТЭЦ и других промышленных объектах, где требуется высокая точность и гибкость в управлении температурными процессами.

Их работа заключается в преобразовании электрической энергии в тепловую за счёт генерации вихревых токов в проводящих материалах. Частотное регулирование позволяет точно управлять процессом нагрева, изменяя глубину проникновения электромагнитного поля и интенсивность тепловыделения. Основу работы таких нагревателей составляют физические процессы, включая электромагнитную индукцию, скин-эффект и джоулев нагрев.

Основная часть

Основными компонентами индукционного регулятора такого типа являются **индукционная катушка и генератор частоты.**

Принцип действия индукционных нагревателей с частотным регулированием начинается с подачи переменного тока на индукционную катушку, которая создаёт переменное магнитное поле. Это поле, в свою очередь, индуцирует вихревые токи в проводящем материале, помещённом в зону действия катушки. Вихревые токи возникают вследствие изменения магнитного потока через материал, что приводит к выделению тепла (джоулевый нагрев) за счёт сопротивления материала протеканию этих токов.

Важно учитывать производителей индукционных катушек, которые предлагают оборудование, адаптированное для работы в энергетической отрасли.

Среди производителей из стран СНГ можно выделить российские компании, такие как «Термотехника» (Москва), специализирующаяся на промышленных индукционных системах, и «Элтехника» (Санкт-Петербург), разрабатывающая решения для металлообработки и энергетики. Украинский производитель «Индукционные технологии» (Киев) также предлагает индукционные катушки, которые могут быть использованы для подогрева теплоносителей и других задач на ТЭЦ. В Беларуси компания «БелТермоПласт» (Минск) производит индукционное оборудование, включая катушки, для нагрева и плавки металлов, что может быть адаптировано для нужд энергетики.

Выбор производителя индукционных катушек для ТЭЦ должен основываться на таких критериях, как соответствие оборудования техническим требованиям, наличие сертификатов качества, возможность адаптации под конкретные задачи, а также доступность технической поддержки и обслуживания. Указанные производители предлагают решения, которые могут быть успешно интегрированы в системы нагрева на ТЭЦ, обеспечивая высокую энергоэффективность и надёжность.

Простейшая индукционная катушка представлена на рисунок 1.

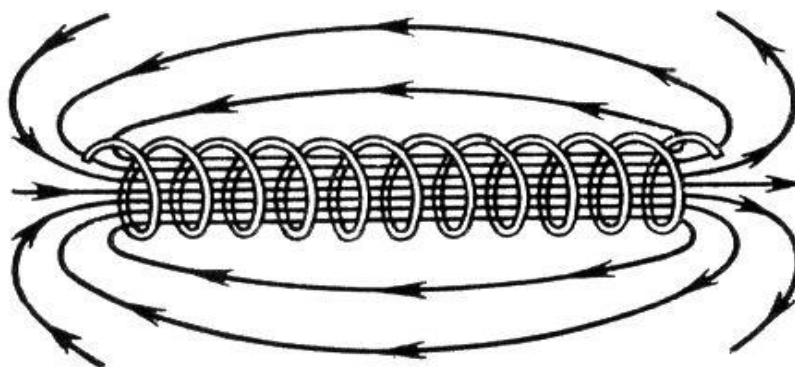


Рисунок 1 – Индукционная катушка

Интенсивность нагрева в индукционных системах напрямую связана с частотой переменного тока, подаваемого на индукционную катушку. При увеличении частоты уменьшается глубина проникновения электромагнитного поля в материал, что обусловлено явлением, известным как скин-эффект. Суть скин-эффекта заключается в том, что переменный ток высокой частоты распространяется преимущественно в поверхностном слое проводника, практически не затрагивая его внутренние области. Это позволяет локально нагревать поверхность материала, обеспечивая высокую точность контроля температуры и минимизируя тепловое воздействие на соседние участки. Такая особенность делает индукционный нагрев особенно эффективным в задачах, где требуется избирательное воздействие на материал, например, при обработке металлов, нагреве тонких слоёв или в процессах, где важно избежать перегрева внутренних структур. Частотное регулирование обеспечивается генератором высокой частоты, который преобразует стандартный промышленный ток (50 Гц) в ток высокой частоты (от 1 кГц до нескольких МГц). Это достигается с использованием полупроводнико-

вых ключей и резонансных контуров. Резонансные явления позволяют минимизировать потери энергии и максимизировать эффективность нагрева. Генератор частоты регулирует не только частоту, но и мощность тока, что позволяет точно управлять температурой нагрева. Простейшая схема генератора частоты представлена на рисунке. 2 [1].

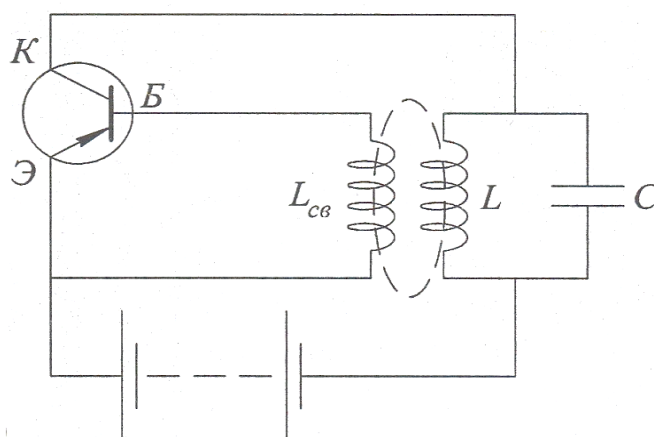


Рисунок 2 – Схема генератора частоты

При выборе генератора частоты для индукционных нагревателей на ТЭЦ необходимо учитывать такие параметры, как диапазон частот, мощность, надёжность, энергоэффективность и возможность интеграции в существующие системы. Указанные производители предлагают решения, которые могут быть успешно применены для нагрева теплоносителей, подогрева масел и других процессов на ТЭЦ, обеспечивая высокую производительность и долговечность оборудования.

Генераторы частоты, используемые в индукционных нагревателях, можно классифицировать на несколько типов в зависимости от их конструкции, принципа работы и области применения. Одним из наиболее распространённых типов являются **LC-генераторы**, которые используют колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности (L) и конденсатора (C). Такие генераторы отличаются простотой конструкции и высокой стабильностью частоты, что делает их подходящими для задач, где требуется точное поддержание заданных параметров. Другим типом являются **RC-генераторы**, в которых частота определяется резисторами (R) и конденсаторами (C). Они менее стабильны по сравнению с LC-генераторами, но обладают меньшими габаритами и стоимостью, что делает их привлекательными для маломощных систем. Для высокочастотных применений широко используются **генераторы на основе кварцевых резонаторов**, которые обеспечивают высокую точность и стабильность частоты благодаря пьезоэлектрическому эффекту.

В промышленных индукционных нагревателях часто применяются **генераторы на полупроводниковых элементах**, которые позволяют регулировать частоту и мощность в широких пределах, обеспечивая высокую энергоэффективность и надёжность. Отдельно стоит выделить **цифровые генераторы частоты**, которые используют микропроцессоры для формирования сигнала. Они обладают высокой

гибкостью, позволяя программировать частоту и форму сигнала, что делает их идеальными для задач, требующих сложного управления. Каждый из этих типов генераторов имеет свои преимущества и ограничения, что позволяет выбирать наиболее подходящее решение в зависимости от конкретных требований, таких как диапазон частот, мощность, точность и условия эксплуатации.

Среди производителей из стран СНГ можно отметить российские компании, такие как «Термотехника» (Москва), специализирующаяся на разработке и производстве генераторов частоты для промышленных индукционных систем, включая решения для энергетики. В Беларуси компания «БелТермоПласт» (Минск) разрабатывает генераторы частоты для индукционных систем, подходящие для интеграции в оборудование ТЭЦ.

Среди зарубежных производителей выделяются компании с мировым опытом, такие как **Inductoheat Inc.** (США), предлагающая высокочастотные генераторы для промышленного применения, включая энергетику. Немецкая компания **EFD Induction** производит генераторы частоты, которые могут быть использованы для индукционного нагрева жидкостей и других процессов на ТЭЦ. В Китае компании **Jinlai Electromechanical** и **Shenzhen Shuangping** предлагают генераторы частоты по конкурентоспособным ценам, которые могут быть адаптированы для систем нагрева на ТЭЦ.

Система управления индукционного нагревателя обеспечивает точный контроль температуры за счёт обратной связи. Датчики температуры, такие как термопары или инфракрасные сенсоры, передают данные о температуре нагреваемого объекта в систему управления, которая регулирует частоту и мощность тока. Микроконтроллеры или программируемые логические контроллеры обеспечивают автоматизацию процесса, поддерживая заданную температуру и отключая нагреватель при достижении целевых параметров. Тепловая передача энергии в индукционных нагревателях происходит за счёт кондукции, конвекции и излучения. Тепло, выделяемое в поверхностном слое материала, передаётся вглубь за счёт теплопроводности. В случае нагрева жидкостей или газов дополнительно учитываются конвективные потоки и тепловое излучение. Отличительные особенности индукционного нагрева с частотным регулированием востребованы в ряде отраслей промышленного производства [2].

Одной из важных задач на теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) является эффективный нагрев теплоносителей, масел, воды и других рабочих сред. Традиционные методы нагрева, такие как использование газовых или электрических печей, имеют ряд недостатков, включая низкий КПД, высокие эксплуатационные расходы и экологические проблемы. В связи с этим всё большее внимание уделяется индукционным нагревателям. Например, для подогрева мазута перед подачей в горелки котлов индукционная катушка устанавливается вокруг трубопровода, а генератор частоты подаёт ток высокой частоты, что обеспечивает быстрый и равномерный нагрев.

Индукционные нагреватели нашли широкое применение в различных отраслях промышленности:

1. В **металлургии** индукционные нагреватели используются для плавки металлов, закалки и термообработки деталей. Например, в производстве стальных изделий индукционный нагрев позволяет быстро и равномерно нагревать заготовки до требуемой температуры, что улучшает качество конечного продукта и снижает энергозатраты.

2. В **машиностроении** индукционные нагреватели применяются для сборки и разборки узлов, таких как подшипники и втулки, за счёт локального нагрева, который облегчает процесс монтажа и демонтажа.

3. Ещё одной областью применения является **пищевая промышленность**, где индукционные нагреватели используются для стерилизации оборудования, нагрева жидкостей и приготовления пищи.

Заключение

Индукционные нагреватели с частотным регулированием представляют собой высокоэффективные устройства, основанные на принципах электромагнитной индукции с генерацией переменного магнитного поля, индукцией вихревых токов и преобразованием электрической энергии в тепловую. Использование частотного регулирования позволяет точно контролировать процесс нагрева, что в совокупности делает их незаменимыми для применения при производстве продукции в ряде отраслей.

Литература

1. Описание принципов работы, математических моделей и применения [сайт]. -Режим доступа : <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/induction-heating> - (дата обращения 25.02.2025).
2. Разделы: "How Induction Heating Works", "Industries Served" [сайт]. - URL: <https://www.inductoheat.com/induction-heating/> - (дата обращения 25.02.2025).

УДК 621.3

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПЕРЕГРУЗКОЙ
OPERATING MODES OF TRANSFORMERS WITH OVERLOAD

И.С. Шманай, М.Г. Сенько

Научный преподаватель – С. В. Константинова, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

I.S. Shmanay, M.G. Senko

Supervisor – S. V. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: Данная работа рассматривает эффективное использование трансформаторов с перегрузкой, которые часто возникают в современных электроэнергетических системах из-за увеличения потребления электроэнергии и аварийных ситуаций.

Abstract: This paper considers the efficient use of transformers with overloads, which often occur in modern electric power systems due to increased power consumption and emergency situations..

Ключевые слова: трансформатор, перегрузка, износ

Keywords: transformer, overload, wear.

Введение

Среди электроустановок, применяемых для преобразования и передачи электроэнергии, трансформаторы являются одними из самых дорогих устройств. Трансформаторы – это ключевые элементы современных систем электроснабжения, обеспечивают эффективную передачу и распределение электроэнергии. От их надежной и бесперебойной работы напрямую зависит стабильность функционирования промышленных предприятий, коммунальных сетей и бытовых потребителей. Они способны работать бесперебойно на протяжении всего срока эксплуатации и даже дольше, но при условии отсутствия воздействия на них различных факторов, одним из таких в той или иной степени является перегрузка.

Основная часть

Существуют различные виды перегрузок: режим допустимых систематических перегрузок, режим продолжительных аварийных перегрузок, режим кратковременных аварийных перегрузок.

Перегрузка трансформатора, характеризующаяся превышением номинального тока нагрузки, представляет собой серьезную проблему, способную привести к существенному сокращению срока службы, а также к возникновению аварийных ситуаций, сопровождающихся значительным экономическим ущербом. Понимание причин, последствий и методов предотвращения перегрузок имеет первостепенное значение для обеспечения надежности и безопасности электроснабжения.

Актуальность данной темы обусловлена постоянным ростом потребления электроэнергии и необходимостью оптимизации работы электрооборудования с

целью повышения его надежности, эффективности и безопасности. Целью работы является систематизация знаний о перегрузке трансформаторов для предотвращения негативных последствий, связанных с данным явлением.

Режим допустимых систематических перегрузок

Режим допустимых систематических перегрузок трансформаторов - это особый режим эксплуатации, характеризующийся повторяющимся во времени графиком нагрузки. Это означает, что в течение определенного периода времени (цикла) нагрузка трансформатора изменяется по заранее известному, предсказуемому закону, и этот цикл регулярно повторяется. Причиной систематических перегрузок могут служить такие случаи как небольшое превышение тока над номинальным значением (больше номинального тока, заявленного в паспорте трансформатора) или изменение температуры окружающей среды.

Ключевые особенности такого режима для трансформаторов:

- Цикличность: повторяющиеся графики нагрузки через определенные временные интервалы.
- Предсказуемость: возможность прогнозировать изменения нагрузки в течение цикла.
- Повторяемость: многократное повторение цикла нагрузки.
- Влияние на тепловой режим: Основное отличие от других режимов - важность учета тепловых процессов, так как постоянное изменение нагрузки влияет на нагрев трансформатора.

Примеры режимов систематических нагрузок трансформаторов:

- Электролизные установки: Нагрузка ступенчато изменяется в зависимости от этапов технологического процесса.
- Промышленные предприятия с автоматизированным циклом производства: Нагрузка меняется в соответствии с рабочим графиком станков, печей, сварочных аппаратов и другого оборудования. Объекты с выраженной сезонностью потребления электроэнергии: Например, сельскохозяйственные предприятия с использованием оборудования для полива и сушки зерна.
- Городское электроснабжение с учетом суточного графика нагрузки: Пики потребления утром и вечером, снижение нагрузки ночью.
- Зарядные станции для электромобилей: Нагрузка может циклически изменяться в зависимости от времени суток и активности зарядки.

В случае допустимых систематических перегрузок различные параметры работы трансформаторов находятся в таких пределах, в которых они не оказывают существенного влияния на износ ресурса трансформатора. Время работы в режиме характеризующимся более высокой скоростью износа ресурса компенсируется временем работы в режиме с более низкой скоростью. В результате мы получаем случай эквивалентный тому, в котором трансформатор работал в нормальном номинальном режиме.

Режимы аварийных перегрузок трансформатора

Режим аварийных перегрузок в отличие от режима допустимых систематических перегрузок приводит к снижению ресурса трансформатора, а в крайних

случаях, к пробое изоляции. Выделяют два вида режимов аварийной перегрузки трансформаторов:

- режим продолжительных аварийных перегрузок
- режим кратковременных аварийных перегрузок.

Режим продолжительных аварийных перегрузок

Причиной такого вида перегрузок является продолжительный выход из строя различных элементов сети. При этом эти элементы не могут быть восстановлены, пока трансформатор не достигнет постоянного значения превышения температуры. Для трансформатора такое состояние не является стандартным, считается, что оно будет возникать крайне редко, но при возникновении может продлиться длительное время, вплоть до нескольких месяцев и вызвать термический износ. Но, не смотря на это, такое состояние, как правило, не приводит к нарушению целостности изоляции (или ухудшению её свойств) и к аварии в целом. Цель: восстановление нормального режима работы электросети после аварийной ситуации, минимизация ущерба потребителям и поддержание электрообеспечения критически важных объектов.

Режим продолжительных аварийных перегрузок возникают в следующих случаях:

- Выход из строя части оборудования: Например, отключение трансформатора, кабельной линии или генератора.
- Аварийные ситуации в сети: Короткие замыкания, обрывы проводов и другие аварии.
- Резкое увеличение нагрузки: Например, в пиковые часы потребления электроэнергии или при подключении новых мощных потребителей.
- Для обеспечения электроснабжения важных потребителей: В случаях, когда отключение электроэнергии недопустимо (например, больницы, пожарные станции, и т.д.).

Ресурс трансформатора в данном режиме снижается по правилу “ 6°C ”, то есть при повышении температуры наиболее нагретой точки трансформатора на 6 градусов скорость снижения ресурса трансформатора увеличивается в два раза. За отсчётную точку принимают температуру 98°C . Зависимость скорости износа от температуры наиболее нагретой точки показана в таблице 1 [1].

Таблица-1 Относительная скорость износа изоляции

θ_h	Относительная скорость износа изоляции
80	0,125
86	0,25
92	0,5
98	1,0
104	2,0
110	4,0
116	8,0
122	16,0
128	32,0
134	64,0
140	128,0

Значение температуры менее 80°C и более 140°C отсутствуют, так как эксплуатация трансформатора в таких условиях является нецелесообразной.

Наиболее нагретая точка-это часть трансформатора с наивысшей температурой. Расположение этого места может варьироваться, но как правило, это первая или вторая от верха катушка обмотки. Их температура всегда выше, чем средняя температура верхней катушки и является значительным ограничением перегрузки трансформатора.

Один из способов определения температуры наиболее нагретой точки — это выполнение её измерения оптическими волоконными светопроводами с датчиками или другими приборами аналогичного назначения.

Режим кратковременных аварийных перегрузок

В отличие от продолжительных аварийных перегрузок в данном режиме трансформатор не достигает какой-либо установившейся температуры. Рассматриваемый режим возникает крайне редко. Так как в данном режиме температура наиболее нагретой точки машины достигает опасных значений. Это приводит к значительным повреждением трансформатору, если такой режим вовремя не отключить, или, как минимум, не снизить действующую нагрузку.

Как правило, при описании продолжительности этого режима оперируют продолжительностью времени от нескольких минут до получаса, а в случаях с некоторыми видами трансформаторов (например, с распределительными) согласно ГОСТ 14209-97 значение времени может достигать полутора часов. Возможная продолжительность времени нахождения трансформатора в режиме **кратковременной аварийной перегрузки** зависит от предшествующей температуры и времени работы в предыдущем режиме [2].

Данный режим возникает в результате:

- Автоматического повторного включения (АПВ):

После кратковременного короткого замыкания, при успешном АПВ, оборудование может испытывать кратковременную перегрузку из-за восстановления нагрузки.

- Переходных процессов при коммутациях:

Переключения в сети (включение резервного оборудования, отключение поврежденных участков) могут вызывать кратковременные пики нагрузки.

- Кратковременных скачков нагрузки:

Внезапное включение мощного потребителя, аварийное отключение других источников питания.

- Ошибочного действия персонала:

Например, ошибочное включение оборудования под нагрузкой, превышающей номинальную (таблица 2).

Существуют следующие категории трансформаторов по мощности:

- распределительные трансформаторы – до 2500 кВА;
- трансформаторы средней мощности – до 100 МВА;
- трансформаторы большой мощности – более 100 МВА.

Таблица 2. Режим перегрузок трансформаторов

Характеристика	Режим Кратковременных Аварийных Перегрузок	Режим Продолжительных Аварийных Перегрузок
Длительность	От секунд до нескольких десятков минут (редко до часа)	От часов до десятков часов
Степень перегрузки	Значительно выше	Относительно умеренная
Управление	Часто автоматическое (системами защиты и автоматики)	Обычно диспетчерское
Цель	Предотвращение немедленного отключения, адаптация к резким пикам	Восстановление нормального режима, минимизация ущерба
Приоритет	Немедленная стабилизация ситуации	Поддержание электроснабжения в течение более длительного времени

Когда нагрузка превышает номинальную, пользуются таблицей предельных значений (таблице 3):

Таблица 3 - Таблица предельных значений при перегрузке

Тип нагрузки	Трансформаторы		
	распределительные	средней мощности	большой мощности
Режим систематических нагрузок			
Ток, отн. ед.	1,5	1,5	1,3
Температура наиболее нагретой точки и металлических частей, соприкасающихся с изоляционным материалом, °С	140	140	120
Температура масла в верхних слоях, °С	105	105	105
Режим продолжительных аварийных перегрузок			
Ток, отн. ед.	1,8	1,5	1,3
Температура наиболее нагретой точки и металлических частей, соприкасающихся с изоляционным материалом, °С	150	140	130
Температура масла в верхних слоях, °С	115	115	115
Режим кратковременных аварийных перегрузок			
Ток, отн. ед.	2,0	1,8	1,5
Температура наиболее нагретой точки и металлических частей, соприкасающихся с изоляционным материалом, °С	По 1.5.2	160	160
Температура масла в верхних слоях, °С	По 1.5.2	115	115

Заключение

Проанализированы основные причины возникновения перегрузок. Длительная работа в режиме перегрузки приводит к повышенному нагреву, ускоренному износу изоляции, снижению диэлектрической прочности масла (для масляных трансформаторов) и, как следствие, к сокращению срока службы и увеличению вероятности аварийных ситуаций. Существуют различные методы определения допустимой перегрузки, учитывающие тепловое состояние трансформатора. Подчеркивается важность мониторинга температуры наиболее нагретой точки, что позволяет своевременно выявлять признаки перегрева и принимать меры по предотвращению аварийных ситуаций.

Работа трансформаторов с перегрузкой является сложной и многогранной проблемой, требующей комплексного подхода. Внедрение современных технологий мониторинга, диагностики и защиты, а также соблюдение правил эксплуатации и технического обслуживания, позволит обеспечить надежную и долговечную работу трансформаторного оборудования и избежать негативных последствий, связанных с перегрузками.

Литература

1. Иванов И.И., Петров П.П. Анализ влияния перегрузок на срок службы изоляции силовых трансформаторов, [сайт]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz_-metodov-kontrolya-tehnicheskogo-sostoyaniya-oborudovaniya-na-primenimost-k-vysokovoltnym-elektronnym-izmeritelnym (дата обращения: 14.03.2025)
2. Перегрузочная способность масляных силовых трансформаторов: [сайт]. - URL: <https://220blog.ru/proektirovanie/peregruzochnaya-sposobnost-maslyanyx-silovyx-transformatorov.html> (дата обращения: 15.04.2025).

УДК 621.311

**ДВИГАТЕЛИ С ДВОЙНЫМ РОТОРОМ CES МОТОР КОЛЕСО
DOUBLE-ROTOR MOTORS CES MOTOR WHEEL**

Д.В. Кухновец, М.С. Марцинкевич

Научный руководитель – С.В. Константинова, к.т.н, доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

D.Kukhnovets, M.Martsinkevich

Supervisor - S.Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian National Technical University,

Minsk, Belarus

Аннотация: Рассматривается конструкция двухроторного двигателя, используемого в мотор-колесе электромобилей. DonutLab, обеспечивающая высокую удельную мощность и крутящий момент.

Abstract: This paper discusses the design of a dual-rotor motor used in the motor-wheel of electric vehicles. An innovative DonutLab motor design that provides high specific power and torque is presented.

Ключевые слова: Двухроторный двигатель, мотор-колесо, электромобиль, крутящий момент, энергоэффективность.

Keywords: Dual rotor motor, motor-wheel, electric vehicle, torque, energy efficiency.

Введение

Развитие электрического транспорта требует постоянного совершенствования силовых установок, обеспечивающих высокую энергоэффективность, компактность и оптимальные характеристики мощности и крутящего момента.

Одним из перспективных направлений является использование двухроторных двигателей, интегрированных в колесо автомобиля. Традиционные конструкции электродвигателей обладают рядом ограничений, таких как громоздкость трансмиссии, повышенные потери энергии при передаче мощности и сложность технического обслуживания. В отличие от них, мотор-колеса с двухроторными двигателями позволяют оптимизировать распределение крутящего момента между двумя роторами, что повышает общую эффективность работы привода.

Основная часть

Применение двигателей с двойным ротором в электромобилях с мотор-колесами является перспективным направлением. В настоящее время существуют научные работы о мотор-колесах с двумя роторами, и было подано несколько заявок на патенты. Производитель электродвигателей DonutLab продемонстрировал свою последнюю инновацию на CES 2025. Приводы, устанавливаемые на колёса, могут кардинально изменить подход к проектированию электромобилей. По словам DonutLab, это значительно снизит вес, а также увеличит мощность и крутящий момент.

На сегодняшний день индустрия электромобилей во многом опирается на дизайн транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Электродвигатели обеспечивают гораздо большую гибкость конструкции, чем ДВС, например электродвигатель DonutLab второго поколения. Конструкция, встроенная в колесо, означает, что двигатель не находится в корпусе автомобиля. Это освобождает место, позволяя увеличить количество посадочных мест и грузоподъемность. Это может привести к созданию довольно необычных конструкций. Конструкция двигателя Donut с прямым приводом устраняет сложности, присущие традиционным силовым установкам, и открывает ряд преимуществ.

Прямой привод уменьшает вес, занимает меньше места, делая транспортные средства более лёгкими, манёвренными и обеспечивая большую гибкость конструкции, снижает затраты за счёт устранения ненужных компонентов трансмиссии, уменьшая износ и продлевая срок службы. Более простая конструкция с меньшим количеством компонентов снижает общую сложность системы. Благодаря меньшему количеству движущихся частей прямой привод требует значительно меньше обслуживания, повышает эффективность передачи энергии для улучшения производительности, что означает более высокую выходную мощность и меньшее энергопотребление при увеличении дальности хода.

Благодаря всем достоинствам двигателя с двойным ротором (мотор колесо) прямой привод обеспечивает управление с частотой в миллисекунды, позволяя выполнять точную настройку в режиме реального времени. Передавая энергию непосредственно на колёса, двигатель обеспечивает повышение точности, стабильности и контроля тяги.

На рисунке 1 представлено сравнение удельной мощности (Power Density) и удельного крутящего момента (Torque Density) различных двигателей. Точки синего цвета представляют производителей, которые ориентированы на удельную мощность, а зеленые – на удельный крутящий момент. Особая точка, которая представляет собой логотип “Donut Motor Automotive 21” указывает на двигатель, который значительно превосходит конкурентов по удельной мощности и по удельному крутящему моменту, что говорит о его высокой эффективности и производительности в обеих категориях [1].

DRIWM относится к двигателям с постоянными магнитами, расположенными на статоре, которые можно рассматривать как комбинацию двух обычных двигателей с переключением потока в радиальном пространстве. Благодаря уникальной конструкции внутренний и внешний роторы DRIWM могут вращаться независимо друг от друга. В системе DRIWM (Dynamic Response Integrated Wheel Motor) используются разные пары полюсов для внутреннего и внешнего двигателей. Это позволяет оптимизировать мощность и эффективность работы в различных условиях эксплуатации.

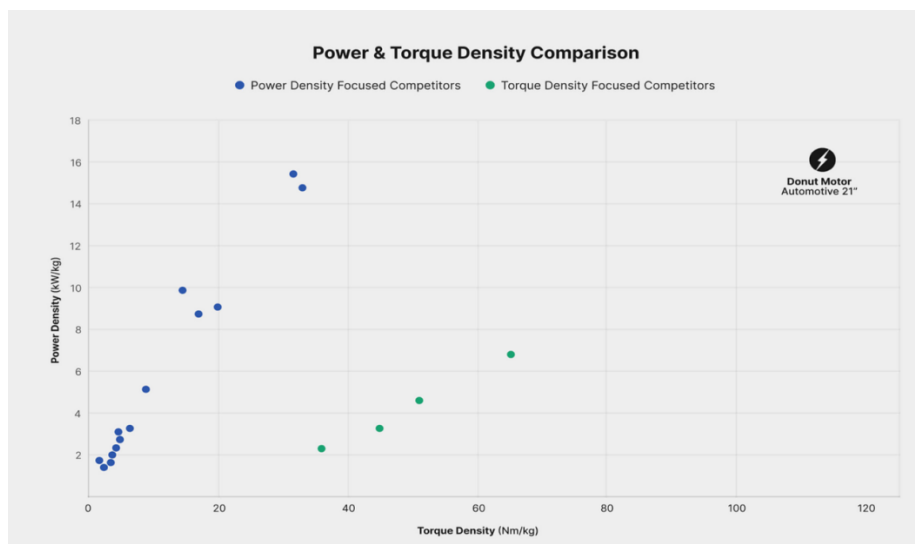


Рисунок 1 –Сравнение удельной мощности и удельного крутящего момента различных двигателей.

Как известно, количество пар полюсов влияет на синхронную частоту вращения. Используя разные конфигурации полюсов для внутренних и внешних двигателей, можно адаптировать систему к разным режимам работы и требованиям по мощности (рисунок 2).

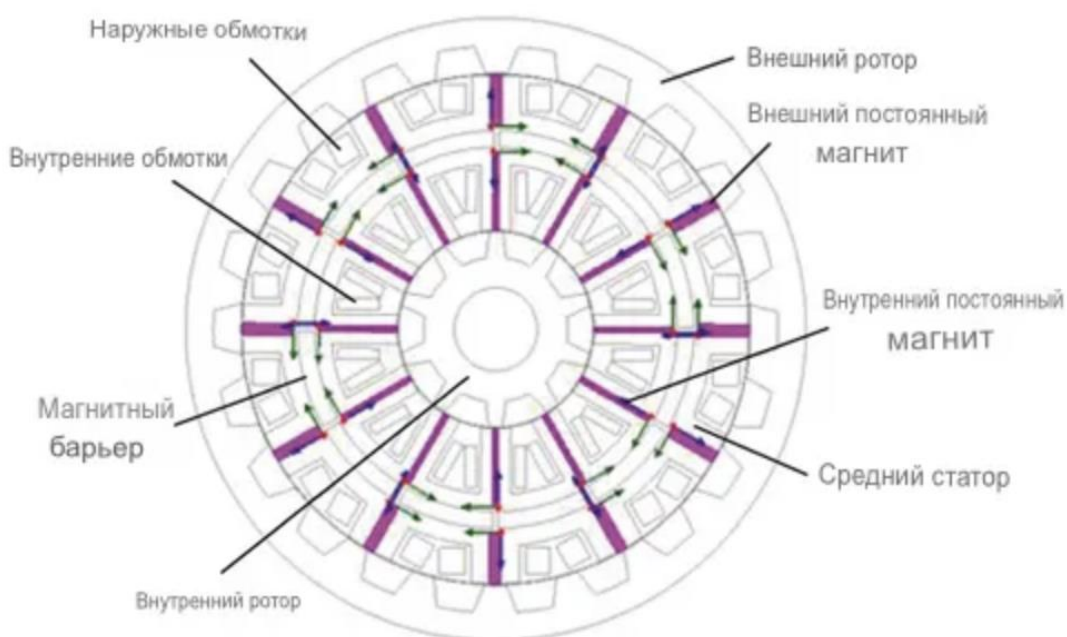


Рисунок 2 – Схема поперечного сечения корпуса двигателя с двойным ротором.

Распределение крутящего момента проводится на основе минимального энергопотребления, когда система распределяет крутящий момент между двигателями таким образом, чтобы минимизировать общее энергопотребление. Для расчёта предполагается, что колёса катятся без сопротивления, кривые, представляющие скорость двигателя и электромагнитный крутящий момент на диа-

граммах эффективности внутреннего (рисунок 3) и внешнего двигателей (рисунок 4), преобразуются в кривую зависимости между линейной скоростью транспортного средства и выходным крутящим моментом. В результате решения поставленной оптимизационной задачи были получены значения коэффициентов распределения крутящего момента для внутреннего двигателя [1] в зависимости от скорости движения транспортного средства и величины общего требуемого крутящего момента.

Анализ показывает, что при низких значениях требуемого крутящего момента транспортного средства доля крутящего момента, передаваемого внутреннему двигателю, велика (рисунок 5) [2]. Это обусловлено тем, что планетарный механизм обеспечивает увеличение крутящего момента за счёт своего редукторного эффекта, а также тем, что внутренний двигатель характеризуется высокой эффективностью при малых скоростях движения.

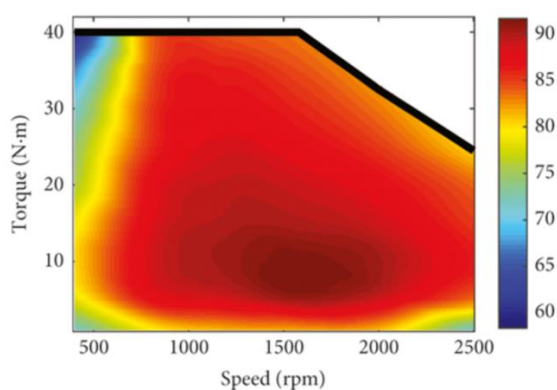


Рисунок 3 – Диаграмма эффективности внутреннего двигателя. Зависимость момента (torque) от скорости (speed)

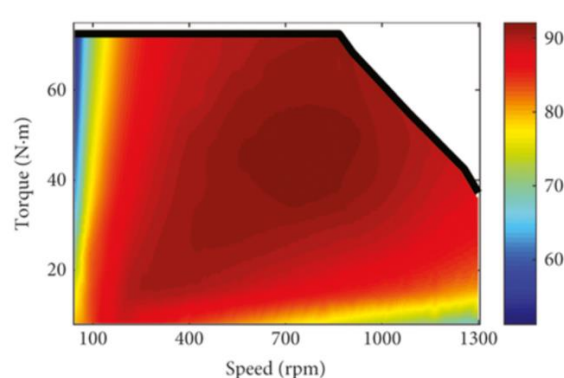


Рисунок 4 – Диаграмма эффективности внешнего двигателя. Зависимость момента (torque) от скорости (speed)

С увеличением общего требуемого крутящего момента доля участия внутреннего двигателя в обеспечении привода снижается. Основной причиной этого является ограничение по максимальному крутящему моменту, который способен развить внутренний двигатель.

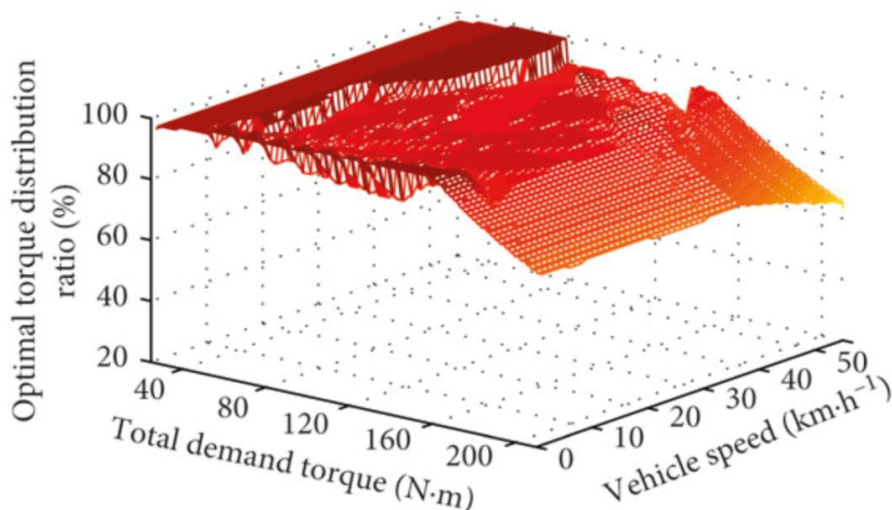


Рисунок 5 -Трёхмерная диаграмма, показывающая оптимальное распределение

крутящего момента (optimal torque distribution) в зависимости от скорости автомобиля (vehicle speed), общего требуемого крутящего момента (total demand torque)

В таких условиях нагрузка перераспределяется на внешний двигатель, который должен компенсировать нехватку момента. Кроме того, при определении оптимального распределения учитывалась эффективность работы как внутреннего, так и внешнего двигателей, что позволило получить наиболее рациональное с точки зрения энергетических затрат распределение крутящего момента [1, 2].

Заключение

Рассмотрена конструкция электрического колеса, основанная на двухроторном двигателе, которая обладает преимуществами внутреннего ротора, обеспечивающего замедление, и внешнего ротора, обеспечивающего прямое приведение в движение. Она может работать в трёх режимах: привод от одного внутреннего ротора, привод от одного внешнего ротора и привод от двух роторов, что позволяет удовлетворить эксплуатационные требования электромобилей в различных условиях движения на основе принципа минимального энергопотребления

Литература

1. Mathematical Problems in Engineering [сайт]. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/4970238>. (дата обращения 25.03.2025).
2. DonutLab [сайт]. – URL: <https://www.donutlab.com/motor>. (дата обращения 25.03.2025).

УДК 621.316

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИНХРОННЫХ МАШИН НА АТОМНЫХ СТАНЦИЯХ
PROMISING TECHNOLOGIES FOR INCREASING THE PRODUCTIVITY OF SYNCHRONOUS MACHINES AT NUCLEAR POWER PLANTS

И.А. Черник, Д.А. Давыдович

Научный руководитель – Счастный В.П., к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

schastniy@bntu.by

I.A. Chernik, D.A. Davydovich

Supervisor – Schastniy V., Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian National University of Technic, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье предоставлены предложения по улучшению производительности синхронных машин с помощью перспективных технологий.*

***Abstract:** this article provides proposals for improving the performance of synchronous machines using advanced technologies.*

***Ключевые слова:** нанокристаллические магниты, редкоземельные магниты, синхронные машины, охлаждение, магнитные материалы, системы управления.*

***Keywords:** nanocrystalline magnets, rare earth magnets, synchronous machines, cooling, magnetic materials, control systems.*

Введение

Синхронные машины играют ключевую роль в обеспечении надежности и эффективности работы атомных станций. Они используются для генерации электроэнергии, а также в качестве приводов для различных механизмов.

В условиях растущих требований к производительности и надежности энергетических систем, необходимо внедрение новых технологий, материалов и конструктивных решений, которые позволят повысить эффективность синхронных машин. В данной работе рассматриваются перспективные технологии, направленные на улучшение производительности синхронных машин на атомных станциях, включая использование новых магнитных материалов, инновационных конструкций и методов управления.

Основная часть

Нано-кристаллические магниты представляют собой новые магнитные материалы, состоящие из кристаллов размером в несколько нанометров. Их уникальная структура позволяет достичь высокой магнитной проницаемости и низких потерь на гистерезис. Нано-кристаллические магниты обычно изготавливаются методом быстрого охлаждения расплава, что приводит к образованию аморфной структуры, которая затем кристаллизуется. Это позволяет контролировать размер кристаллов и их распределение, что критично для магнитных свойств.

В синхронных машинах такие магниты могут использоваться в роторе, что позволяет значительно уменьшить его массу и размеры. Это особенно важно для применения в компактных системах, таких как электромобили и высокоскоростные поезда.

Редкоземельные магниты, такие как неодимовые (NdFeB) и самариевые (SmCo), обладают высокой магнитной энергией и стабильностью при высоких температурах. Они обеспечивают высокую плотность магнитного потока, что позволяет создавать более мощные и компактные машины [1, 2].

Например, синхронные машины с редкоземельными магнитами могут иметь в 2-3 раза меньший размер по сравнению с традиционными аналогами. Основные проблемы связаны с высокой стоимостью редкоземельных материалов и их ограниченной доступностью. Это требует разработки альтернативных технологий и материалов, которые могут снизить зависимость от редкоземельных элементов.

Модульные конструкции синхронных машин являются инновационными, позволяют разделять их на независимые компоненты, которые могут быть легко заменены или модернизированы. Это значительно упрощает процесс обслуживания и ремонта, так как можно заменить только поврежденный модуль, а не всю машину. Кроме того, модульные конструкции позволяют адаптировать машины под различные условия эксплуатации, что делает их более универсальными. В некоторых современных синхронных машинах используются модульные статорные и роторные системы, которые могут быть легко адаптированы для работы в различных режимах, таких как генерация или электродвигатель. Системы активного охлаждения могут включать в себя как жидкостные, так и воздушные системы, которые помогают поддерживать оптимальную температуру работы машины. Жидкостное охлаждение - это использование специальной охлаждающей жидкости, которая циркулирует через теплообменники, расположенные вблизи нагреваемых частей машины. Это позволяет эффективно отводить тепло и поддерживать стабильную работу.

В системах воздушного охлаждения используются вентиляторы и радиаторы для отведения тепла. Хотя такие системы проще в реализации, они могут быть менее эффективными при высоких нагрузках.

Современные системы управления синхронными машинами используют алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта для оптимизации работы. Такие системы могут анализировать данные о работе машины в реальном времени, предсказывать возможные неисправности и автоматически настраивать режимы работы для повышения эффективности. Например, в случае изменения нагрузки система может автоматически регулировать скорость вращения ротора для поддержания оптимальной производительности. Это позволяет значительно снизить энергозатраты и увеличить срок службы оборудования, так как предотвращает перегрев и другие потенциальные проблемы. Системы мониторинга состояния включают в себя датчики, которые отслеживают различные параметры работы машины, такие как температура, вибрация и электрические характеристики.

Вибрационные датчики могут выявлять аномалии в работе, такие как несоосность или износ подшипников. Температурные датчики помогают контролировать нагрев обмоток и магнитов, что позволяет предотвратить перегрев. Анализ собранных данных могут быть использованы для создания моделей предсказания состояния машины, что позволяет проводить профилактическое обслуживание и избегать аварийных ситуаций.

С учетом растущих требований к устойчивому развитию, использование экологически чистых и переработанных материалов становится важным аспектом в производстве синхронных машин. Использование переработанных металлов и композитов может снизить углеродный след производства. Также разрабатываются новые биосовместимые материалы, которые могут быть использованы в изоляции и других компонентах [2].

Совершенствование технологий и конструкций синхронных машин может привести к значительному снижению выбросов парниковых газов. Повышение эффективности работы машин позволяет снизить потребление энергии, что в свою очередь уменьшает выбросы CO₂. Например, синхронные машины с высокоэффективными магнитами могут снизить потребление энергии на 20-30% по сравнению с традиционными аналогами. Внедрение новых технологий и конструкций, направленных на повышение эффективности работы синхронных машин, способствует устойчивому развитию энергетического сектора и снижению негативного воздействия на окружающую среду. Таким образом, углубленное изучение новых магнитных материалов, инновационных конструкций, методов управления и экологических аспектов позволяет значительно повысить производительность синхронных машин на атомных станциях и других промышленных объектах. Эти технологии не только способствуют улучшению эффективности работы, но и обеспечивают устойчивое развитие энергетического сектора.

Заключение

Перспективные технологии для улучшения производительности синхронных машин на атомных станциях включают в себя использование новых магнитных материалов, инновационных конструкций и современных методов управления. Эти решения не только повышают эффективность и надежность работы машин, но и способствуют снижению негативного воздействия на окружающую среду. Внедрение данных технологий позволит атомным станциям соответствовать современным требованиям и обеспечивать устойчивое развитие энергетического сектора.

Литература

1. Белтехнология. [сайт]. –URL: http://beltechnologia.by/topic-induction_heaters/. – (дата обращения: 18.10.2025).
2. Термотех. [сайт]. –URL: <https://termanik.ru/raznovidnosti-elektronagrevatelj/induktsionnyj-nagrevatel-igra-konstruktsij/>. – (дата обращения: 18.10.2025).

УДК 621.3

СОВМЕЩЕННАЯ ОБМОТКА АСИНХРОННЫХ МАШИН COMBINED WINDING OF ASYNCHRONOUS MACHINES

А.А. Кречко

Научный руководитель – С.В. Константинова, к.т.н, доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

A.Krechko

Supervisor - S.Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: Рассмотрены история создания, принципы выполнения, преимущества совмещенной обмотки.

Abstract: The history of creation, principles of implementation, advantages of combined winding are considered.

Ключевые слова: совмещенная обмотка, асинхронный электродвигатель, энергоэффективность.

Keywords: combined winding, asynchronous electric motor, efficiency efficiency.

Введение

В настоящее время асинхронные двигатели (АД) из-за простоты своей конструкции становятся все более востребованы, они успешно применяются в электротранспорте личного пользования. Асинхронный короткозамкнутый двигатель, имеет свои недостатки, одним из которых является сложность управления. Применение частотного управления решает данную проблему. Постоянно ведутся работы над улучшением характеристик классических АД.

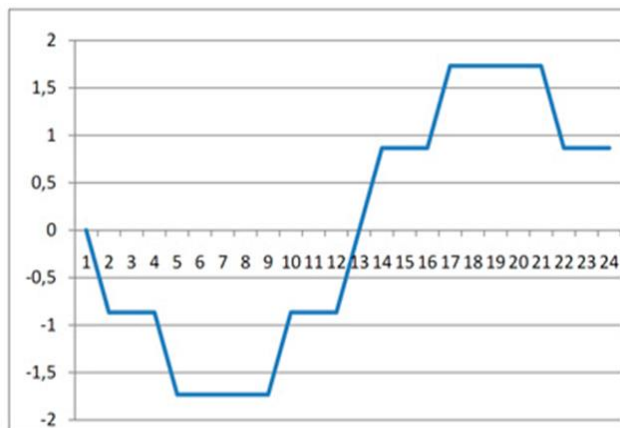
Основная часть

Для улучшения характеристик магнитного поля трехфазного АД был предложен способ совмещения двух схем «звезды» и «треугольника» в одной обмотке (рисунок 1) [1].

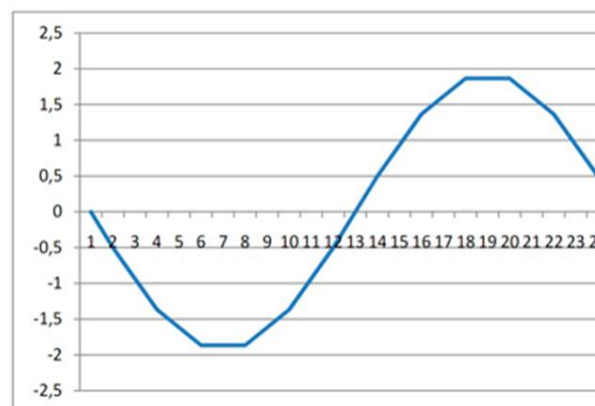


Рисунок 1 – Схемы обмотки «звезда», «треугольник», «совмещенная»

В течение ряда лет были проведены многотысячные измерения и расчеты мгновенных значений магнитного поля в зазоре асинхронных двигателей различных серий. Результаты многочисленных исследований и расчетов позволили определить формы магнитного поля в рабочем зазоре АД, создаваемого различными обмотками (рисунок 2а, б) [1]



а) Форма магнитного поля в рабочем зазоре стандартного двигателя



б) Форма магнитного поля в рабочем зазоре двигателя с совмещёнными обмотками

Рисунок 2 – Форма магнитного поля в рабочем зазоре асинхронной машины

Исследования по совмещению обмоток проводились в течение многих лет. Краткая информация об истории создания АД приведена в таблице 1.

Таблица 1- Исторические сведения создания АМ

1888г Г.Феррарис	опубликовал свои исследования в статье для Королевской академии наук в Турине, в которой изложил теоретические основы асинхронного двигателя, сделал ошибочный вывод о небольшом коэффициенте полезного действия асинхронного двигателя и о нецелесообразности применения систем переменного тока
1888г Н. <u>Тесла</u>	получил патент США
1889 г М.О. Доливо-Добровольский	получил патент на трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа «беличье колесо». (германский патент № 51083 от 8 марта 1889»
1889г М.О. Доливо-Добровольский	получил патенты в Англии № 20425 и Германии № 75361 на фазный ротор с кольцами и пусковыми устройствами. Данные изобретения открыли эру массового промышленного применения электрических машин

В 1916г изобретатель Willem C Korthals-Altes получил Патент US1267232A "Обмотка двигателя".

Заявка подана компанией General Electric Co 1916-03-16 Заявка удовлетворена 1918-05-21 Публикация от US1267232A 1935-05-21. Страница из патента приведена на рисунке 3, где явно выражено исследование совмещенной обмотки (звезда-треугольник).

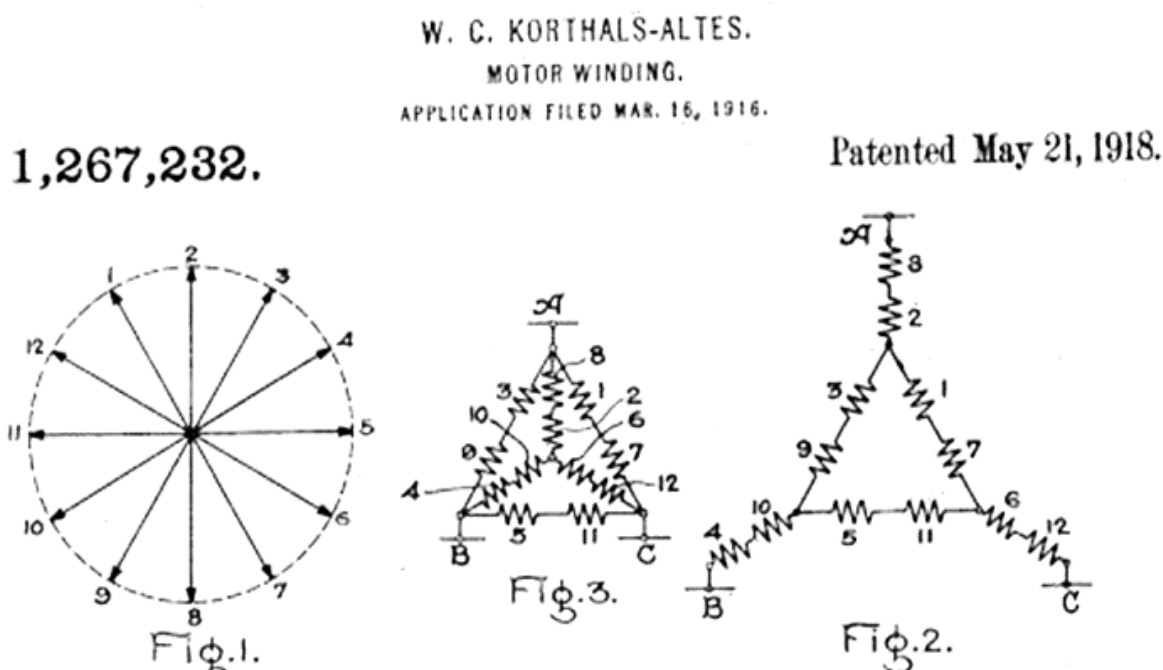


Рисунок 3 - Страница из патента изобретателя Willem C Korthals-Altes

С момента создания АД, постоянно ведутся работы по улучшению его свойств и характеристик. В таблице 2 приведены краткие исторические сведения о создании и совмещенной обмотки трехфазной АМ [1].

Таблица 2 – Этапы создания совмещенной обмотки

1980г В.И Попов	рассматривал вопрос создания совмещенной обмотки
1991г В.Г.Власов, Н.М.Морозов	патент "Статорная обмотка двухполюсного трехфазного асинхронного двигателя" Авторы. РФ 2046515 подача заявки: 1991-07-22, публикация патента: 20.10.1995 Цитата из патента: Сущность изобретения: статорную обмотку электродвигателя выполняют из двух трехфазных обмоток, соединенных соответственно в треугольник и звезду, при этом укорочение шага обеих обмоток задают в пределах от 0,388 до 0,416 в зависимости от числа полюсов статора
1993г Н.В.Яловега .С.Н.Яловега К.А Беланов	патент США, выданный 29.06.1993 г., на электродвигатель аналогичный патенту РФ 1991 года, но создать по названным патентам электродвигатель никому не удалось т.к. теоретическое описание не содержит информации об конкретном исполнении обмоток

В 1993 году Николай Яловега, работавший над усовершенствованием схем соединения асинхронного двигателя, сумел совместить «звезду» с «треугольником», создал работоспособный демонстрационный образец асинхронного двигателя.

В 2012г завод «УралЭлектро» приступил к серийному производству асинхронных двигателей с совмещёнными обмотками общепромышленного исполнения серии АДЭМ (Энергоэффективные, высокомоментные АД). Электродвигатель с 2×3 двухслойными обмотками, сдвинутыми относительно друг друга получил название асинхронный электродвигатель с совмещёнными обмотками (АЭД СО). Созданы АЭД СО с рядом мощностей от 0,25 кВт до 2000 кВт. в соответствии с IEC 60034-30.

Первые экспериментальные электродвигатели, со статорной совмещённой обмоткой, которая получила название «Славянка», были установлены на северо-восточной насосной станции города Стаханова.

По данному методу перематывали многочисленные АД. Появились статистические, данные, позволяющие оценить качества совмещённой обмотки.

Весь смысл предложенной технологии сводится к использованию дополнительных совмещённых обмоток статора. Сдвиг между основной и дополнительной обмотками – равен 30 электрическим градусам.

Существует две схемы соединения фаз совмещённой обмотки (рисунок 4):

- параллельная: основная обмотка это «звезда», а совмещённая «треугольник»;
- последовательная: предполагающая сохранение первоначальной схемы основной обмотки, с пересчетом совмещённой на «треугольник» [2].

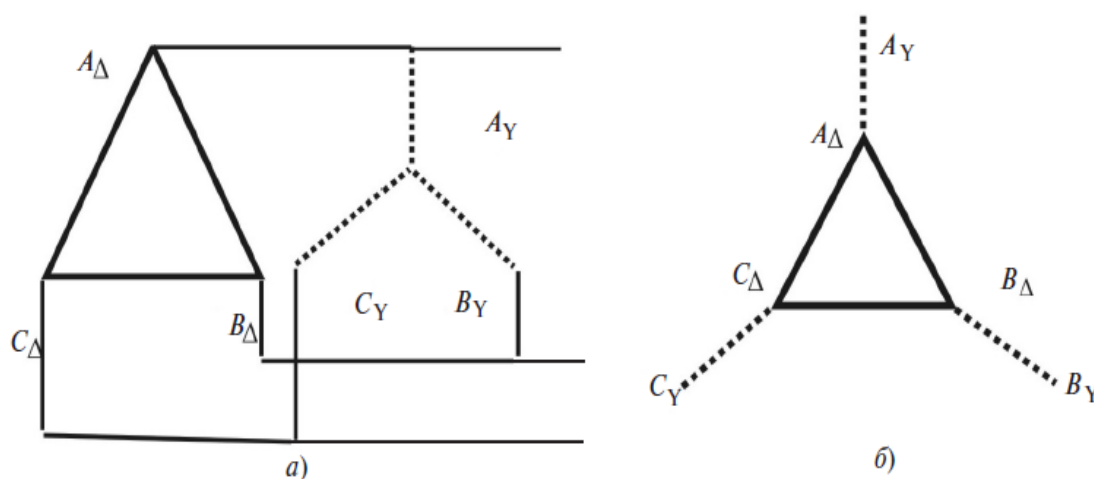


Рисунок 4 - Схемы включения совмещённых обмоток асинхронного двигателя: а – параллельное; б – последовательное .

Применение совмещённых обмоток для намотки трехфазных асинхронных двигателей оказалось весьма эффективным. Очень убедительными являются примеры из транспортной сферы, где применили двигатели, модернизированные по данной технологии (таблица 3).

Таблица 3 – Примеры использования двигателей с совмещенной обмоткой

год	Пример внедрения	Результат внедрения
2013	В Донецке на шахтный электровоз «Эра» был установлен двигатель 112-го габарита, модернизированный по технологии «Славянка»	Существенное повышение производительности труда при значительном снижении энергопотребления: электровоз вытянул 11 вагонеток с углём, тогда как предыдущий тянул лишь 5. При транспортировке 100 тонн угля двигатель не перегревался, несмотря на двукратный рост нагрузки
2015	Перемотка двигателя электромобиля RenaultKangoo	Устранение перегрева, увеличение длительности поездки электромобиля на 20 %
2017	Перемотан генератор автомобиля КамАЗ из команды «КамАЗ-Мастер»	Модернизированный автомобиль принял участие в гонке «Дакар-2017», увеличена мощность генератора почти на 30%. В результате чего были перемотаны генераторы всех остальных автомобилей к ралли «Дакар-2018».
2017	Модернизирован двигатель для электробайка	китайская компания Denzel выбрала двигателя со «Славянкой» BLDC для новой версии электробайка DenzellLiberty
	Модифицированный по технологии «Славянка» асинхронный двигатель китайского производства имеет следующие характеристики: - асинхронный двигатель номинальной мощностью 3 кВт (3300об/мин), пиковой мощностью 9,5 кВт, - длительный ток (максимальное значение) 60А (фазный ток пиковый ток 350 А, - номинальное напряжение 72В, - максимальная скорость 5000об/мин, - КПД 92 %, - крутящий момент (максимальное значение) 74 Нм (на валу), - вес: 10,5 кг, - отсутствие магнитного сопротивления, - повышение эффективности во всем диапазоне нагрузок	
2019	Созданы новые образцы электродвигателей	расходуют до 40% меньше электроэнергии, требуют при производстве в среднем на 30% меньше меди и дорогой электротехнической стали.

Согласно имеющейся информации, есть примеры двигателей с совмещенной обмоткой «Славянка», которые работают без поломок уже более 20 лет. Работающие такие двигатели издают меньше шума и вибраций.

Вывод

Согласно исследованиям, совмещенной обмотка со схемой последовательного соединения фаз, демонстрирует более высокие рабочие характеристики по

сравнению с аналогичной параллельной [1,2]. Преимущества данной обмотки приведены в таблице 4.

Таблица 4. Преимущества совмещенной обмотки

1	сокращение потребляемой электроэнергии
2	снижение расходов на эксплуатацию
3	более высокий КПД
4	значительное увеличение крутящего и пускового момента
5	возможность работы сразу в двух режимах – S1 и S3
6	снижение нагрузок на электросеть за счет уменьшения пусковых токов
7	более низкий уровень шума
8	возможность выдерживать большие перегрузки
9	значительное снижение температуры нагрева обмотки
	повышение надежности электродвигателя

Литература

1. Совмещенная обмотка «Славянка»: революция в области электродвигателей [сайт]. – URL: <https://clck.ru/3JVUoD> (дата обращения: 20.02.2025).
2. Преимущества и недостатки совмещенной обмотки «Славянка»/ Ю.А. Мошинский Е.М Соколова// Электричество, 2018, №11, с. 23–31. – URL: <https://old-etr1880.mpei.ru/index.php/electricity/article/view/1072/0> (дата обращения: 20.02.2025).

УДК 621.311

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ
INTELLIGENT LIGHTING CONTROL SYSTEMS**

Е.С. Бондарчук

Научный руководитель – Т.М. Жуковская, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

E.S. Bondarchuk

Supervisor – T.M. Zhukovskaya

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в статье отражены современные системы управления освещением, их принципы функционирования, классификация и области применения. Особое внимание уделено интеллектуальным и автоматизированным системам, позволяющим повысить энергоэффективность, удобство эксплуатации и безопасности объектов.

Abstract: the article reflects modern lighting control systems, their principles of operation, classification and areas of application. Particular attention is paid to intelligent and automated systems that allow to increase energy efficiency, ease of operation and safety of facilities.

Ключевые слова: освещение, системы управления, автоматизация, энергоэффективность, интеллектуальное освещение.

Keywords: lighting, control systems, automation, energy efficiency, intelligent lighting.

Введение

Быстрое развитие технологий в сочетании с увеличивающимися энергозатратами увеличивает требования к энергоэффективности, автоматизации и комфорту. Интеллектуальные системы управления освещением становятся неотъемлемой частью современной инфраструктуры. Это совокупность технических и программных решений, предназначенных для управления осветительными приборами с учетом внешних и внутренних факторов.

Системы управления освещением могут автоматически регулировать интенсивность светового потока в зависимости от времени суток, наличия людей, уровня естественного освещения и различных сценариев использования. Это позволяет снизить потребление электроэнергии, продлевать срок эксплуатации осветительных приборов, а также повышать уровень комфорта и безопасности персонала.

Энергоэффективность и экономическая целесообразность автоматизированных систем

Привычные осветительные приборы потребляют много электроэнергии, требуют частого обслуживания и не позволяют гибко управлять освещением. Системы управления освещением на основе светодиодных технологий и автоматизированных протоколов, таких как DALI, KNX, BACnet и других, решают эти проблемы.

Автоматизированные системы управления освещением имеют ряд преимуществ [1,2,4]:

1. Экономия электроэнергии. Адаптивное управление освещением (автоматическое включение/выключение) позволяет сократить потребление электроэнергии на 30–60%.
2. Увеличение срока службы светильников. Управление яркостью уменьшает износ светодиодных ламп, что сокращает затраты на замену оборудования.
3. Гибкость и масштабируемость. Возможность объединения с системами управления зданием, датчиками движения и освещенности, таймерами и другими интеллектуальными модулями.
4. Снижение человеческого фактора. Автоматизированное управление устраняет необходимость в действиях персонала.

Основные принципы работы систем управления освещением

Системы управления освещением работают на основе принципов:

1. Адаптивность. Освещение автоматически регулируется в зависимости от изменений окружающей среды с помощью датчиков освещенности, движения и присутствия.
2. Централизованное и локальное управление. Системой можно управлять как из диспетчерской, так и через индивидуальные контроллеры или мобильные приложения.
3. Автоматизация. Возможность автоматического регулирования освещения по заданным сценариям, например, снижать яркость в ночное время или включаться при обнаружении движения.
4. Энергоэффективность. За счет автоматического отключения ненужных светильников и регулирования цветовой температуры затраты на электроэнергию снижаются.
5. Интеграция с другими системами. Системы освещения могут быть частью общей системы управления зданием, взаимодействуя с отоплением, вентиляцией, кондиционированием и системами безопасности.

Современные интеллектуальные системы освещения включают в себя компоненты:

1. Источники света – современные системы используют светодиодные источники света, обеспечивающие более долгий срок службы и возможность диммирования.
2. Датчики и сенсоры – позволяют системе реагировать на изменения окружающей среды. К ним относятся датчики движения и присутствия, датчики освещенности, датчики температуры и цвета.
3. Контроллеры и шлюзы – обрабатывают информацию от датчиков и отправляют команды светильникам. Например, в системе DALI контроллер управляет светильниками, задавая нужную яркость и сценарии работы.
4. Панели управления и интерфейсы – позволяют вручную регулировать освещение через кнопочные панели, сенсорные экраны или мобильные приложения.

5. Программное обеспечение – благодаря ним создаются сценарии освещения, система интегрируется с другими элементами автоматизации здания.

Классификация систем управления освещением

Системы управления освещением могут классифицироваться по разным параметрам: уровню автоматизации, способом управления, методом передачи данных и области применения. Такое разделение помогает определить подходы для конкретных объектов, включая промышленные предприятия [3, 4, 5].

По уровню автоматизации системы освещения можно разделить на:

1. **Ручные системы управления.** В таких системах освещение включается и выключается вручную с помощью обычных выключателей, кнопочных панелей управления, дистанционных пультов.

Ручное управление является простым и дешевым решением, но на крупных производствах, где требуется постоянное участия человека, оно неэффективно.

2. **Полуавтоматические системы.** В этих системах управление освещением частично автоматизировано, но требует человеческого вмешательства для настройки или изменения режима работы. К таким системам относятся, например, таймерные системы, включающие или выключающие свет по заданному расписанию, датчики движения, активирующие освещение при обнаружении человека, но не регулируют уровень освещенности.

3. **Полностью автоматизированные системы.** Данные системы управления работают без постоянного вмешательства человека. Они способны регулировать освещение в зависимости от времени суток, присутствия людей, уровня естественного освещения и других факторов. К ним относятся системы на базе **DALI**, **KNX** или **BACnet**, способные управлять каждым светильником индивидуально, автоматическое диммирование света.

Системы освещения также различаются по методу контроля над светильниками [6]:

1. **Локальное управление.** Освещение регулируется в пределах отдельной зоны, здания или объекта, например, промышленные цеха, где каждая линия освещения управляется отдельно. Такие системы просты в реализации, но не позволяют централизованно контролировать освещение на крупных объектах.

2. **Централизованное управление.** Все светильники и группы освещения объединены в единую систему, управляемую из единого центра или через программное обеспечение. Это позволяет контролировать освещение на всего предприятия, своевременно изменять параметры освещения в зависимости от потребностей, интегрировать освещение с другими системами автоматизации.

3. **Распределенное управление.** Система сочетает локальное и централизованное управление, например, рабочие места персонала могут регулироваться локально, но общая система освещения цеха управляется централизованно.

Распределенные системы наиболее гибкие и позволяют сочетать преимущества обоих подходов.

Передача данных в системах управления освещением может осуществляться как с использованием проводных, так и беспроводных технологий:

1. Проводные системы передают сигналы между компонентами с помощью кабелей. К ним относятся **DALI** (цифровой адресный интерфейс управления освещением), **KNX** (универсальная система автоматизации зданий, включая управление освещением), **BACnet** (система управления инженерными системами зданий, включающая управление освещением).

Преимущества проводных систем: высокая надежность и защита от помех, отсутствие задержек в передаче команд, возможность реализации сложных сценариев освещения.

Недостатки: высокая стоимость прокладки кабелей, ограниченная гибкость.

2. Беспроводные системы. Данные системы используют радиочастоты для передачи данных между устройствами. Основными беспроводными системами являются ZigBee (популярная система для умных зданий), Wi-Fi (удобна для интеграции с корпоративными сетями), Bluetooth Mesh (организовывает сеть датчиков и светильников без проводов).

Системы управления освещением применяются в различных сферах:

1. Промышленные предприятия (заводы, фабрики, складские комплексы);
2. Коммерческие здания (офисы, торговые центры, гостиницы);
3. Жилые здания (квартиры, частные дома, многоквартирные комплексы);
4. Городская инфраструктура (уличное освещение, парковки, транспортные узлы).

Системы управления освещением

Современные системы управления освещением используют различные технологии и протоколы для автоматического управления светильниками. Выбор технологии зависит от требований к системе, типа объекта, масштаба установки и бюджета. В этом разделе представлены основные технологии, используемые в системах управления освещением, такие как DALI, KNX, BACnet, ZigBee, Wi-Fi и Bluetooth Mesh [7, 8, 9].

DALI является одной из самых распространенных систем для управления освещением. Она специально разработан для работы со светодиодными, люминесцентными и другими типами светильников.

Ключевые особенности DALI:

1. **Адресное управление.** Возможность отдельного контроля каждого светильника.
2. **Диммирование.** Возможность изменять яркость светильников.
3. **Создание групп и сценариев.** Позволяет объединять светильники в группы и программировать режимы освещения.
4. **Двусторонняя связь** – система, помимо передачи сигнала, получает обратную связь (например, об ошибках или состоянии светильников).
5. **Энергоэффективность.** Способность снижения потребления электроэнергии за счет точной настройки уровней освещенности.

В промышленности DALI дали может применяться в производственных цехах, где требуется гибкое управление освещением, складских помещениях с автоматизированной системой освещения, административных зданиях и офисных помещениях предприятий.

KNX – это международный стандарт автоматизированного управления зданиями, включающий освещение, климат-контроль, безопасность и другие инженерные системы.

Основные характеристики KNX:

1. **Гибкость** – возможность интеграции освещения с другими системами автоматизации управления.
2. **Модульность** – возможность устанавливать новые устройства без дополнительной модернизации системы.
3. **Работа с различными типами датчиков** (освещенности, движения, температуры).
4. **Высокая надежность и стабильность работы.**

KNX может быть применена в коммерческих и промышленных объектах, где требуется комплексная автоматизация, административных зданиях и центрах управления, высокотехнологичных производственных предприятиях.

BACnet – это протокол автоматизированного управления зданиями, охватывающий освещение, вентиляцию, кондиционирование и другие системы.

Особенности BACnet:

1. **Интеграция с BMS (Building Management System)** дает возможность объединения освещения с другими системами управления зданием.
2. **Широкий выбор поддерживаемых устройств**, от датчиков освещенности до контроллеров вентиляции.
3. **Высокая надежность и безотказность.**

BACnet используется на крупных промышленных предприятиях, где требуется централизованное управление инженерными системами, в системах умных зданий (smartbuilding), объектах с высокими требованиями к энергоэффективности.

ZigBee – это беспроводной энергоэффективный протокол, который используется в системах умного освещения.

Особенности ZigBee:

1. **Сетевой принцип работы (mesh-сеть)** – устройства могут передавать сигнал друг через друга, обеспечивая стабильную связь.
2. **Низкое энергопотребление**, что подходящее для автономных датчиков и беспроводных светильников.
3. **Возможность создание коллективной сети между подключенным устройствами, облегчающая связь между ними и облачными сервисами.**

ZigBee применяется для управления освещением в офисных зданиях и бизнес-центры, производственных помещениях с распределенной системой освещения, умных домах и жилых комплексах.

Wi-Fi активно используется в системах освещения, особенно в коммерческих и бытовых решениях.

Преимущества Wi-Fi:

1. **Широкая совместимость.** Позволяет легко интегрироваться с существующей сетевой **Высокая скорость передачи данных.**
2. инфраструктурой.
3. **Удаленное управление.** Дает возможность настройки освещения через мобильные приложения.

Недостатки:

1. **Высокое энергопотребление,** поскольку требует постоянного питания.
2. **Зависимость от сети Wi-Fi** – при сбоях в работе сети освещение может функционировать нестабильно.

Применяется Wi-Fi система на малых и средних предприятиях, офисных зданиях и магазинах, частных дома и квартирах [10].

Bluetooth Mesh создает распределенные сети управления освещением.

Из основных особенностей выделяются:

1. Работа без центрального контроллера: каждый узел в сети может передавать команды другим.
2. Низкое энергопотребление: хорошо для беспроводных светильников и датчиков с автономным питанием.
3. **Высокая масштабируемость** – позволяет легко расширять сеть освещения.

Заключение

Системы управления освещением активно применяются в инфраструктуре «Умного дома», «Умного города», промышленных комплексов, коммерческой недвижимости. Это делает данное направление крайне перспективным. Развитие интернета, искусственного интеллекта и облачных технологий постоянно расширяет функционал таких систем и делает их более доступными для конечных пользователей.

Интеллектуальные системы управления освещением являются ярким примером использования современных технологий для достижения комфорта, безопасности и энергоэффективности. В общем виде они подразумевают автоматизацию процессов освещения с последующим снижением затрат на электроэнергию, а затем рациональное использование ресурсов для создания благоприятных условий жизнедеятельности человека как в частных, так и в общественных и промышленных помещениях.

Таким образом, интеллектуальные системы освещения — это важный шаг на пути к построению устойчивого, энергоэффективного и комфортного будущего.

Литература

1. DALI Alliance: [сайт]. – URL: <https://www.dali-alliance.org/> (дата обращения 23.03.2025).
2. DALI диммирование и его применение в освещении внутри и снаружи помещений: [сайт]. – URL: <https://goo.su/zmD8> (дата обращения 23.03.2025).
3. Описания и отличия протоколов DALI И DALI 2: [сайт]. – URL: <https://goo.su/z45Uks> (дата обращения 23.03.2025)

УДК 621.311

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ DALI НА ПРИМЕРЕ ПРО- МЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА DALI LIGHTING CONTROL SYSTEM IN AN INDUSTRIAL FACILITY

Е.С. Бондарчук

Научный руководитель – Т.М. Жуковская, преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

E.S. Bondarchuk

Supervisor – T.M. Zhukovskaya, Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: В статье рассматривается использование системы управления освещением через протокол DALI на примере промышленного объекта. Рассмотрены архитектура системы, принципы взаимосвязи её компонентов, возможности группового и индивидуального управления светильниками. Уделено внимание вопросам энергоэффективности, гибкости и надежности системы DALI при использовании на промышленных предприятиях. Приведен пример внедрения протокола, его преимущества и недостатки.

Abstract: The article considers the use of lighting control system via DALI protocol on the example of an industrial facility. The architecture of the system, the principles of interconnection of its components, the possibilities of group and individual control of luminaires are considered. Attention is paid to the issues of energy efficiency, flexibility and reliability of the DALI system when used at industrial enterprises. An example of protocol implementation, its advantages and disadvantages are given.

Ключевые слова: Управление освещением, автоматизация, датчики, энергоэффективность, DALI, диммирование.

Keywords: Lighting control, automation, sensors, energy efficiency, DALI, dimming.

Введение

В настоящее время промышленными предприятиями предъявляются жесткие требования к системам освещения. Такие системы должны предоставлять условия для обеспечения безопасных и комфортных условий труда, соответствовать нормативным требованиям, быть энергоэффективными и понятными в эксплуатации. Благодаря стремительному развитию автоматизации и цифровизации смену устоявшимся системам освещения появились интеллектуальные системы управления, обеспечивающие более эффективное энергопотребление, гибкое управление освещением, интеграцию с другими системами управления.

Перспективным и эффективным решением в этой области станет использование протокола Digital Addressable Lighting Interface, позволяющего осуществлять скоординированное и персональное управление осветительными приборами, обеспечивая гибкость, точность управления и экономию энергии. Широкое применение система DALI получила благодаря своей совместимости, адаптивности и возможности интеграции с системами управления зданием.

Использование интеллектуальных систем управления освещением DALI не только экономит затраты на электроэнергию, но и повышает комфорт и безопасность персонала, а также упрощает обслуживание осветительных установок. В условиях неуклонного роста цен на энергоносители и ужесточения экологической политики использование таких систем оказывается экономически целесообразным и, более того, стратегически выгодным для промышленных предприятий.

Общие характеристики протокола DALI

1. Адресное управление. Главной особенностью протокола DALI является адресное управление. Каждому устройству, подключенному к системе, назначается уникальный адрес, что позволяет осуществлять индивидуальное управление, а не только групповое.

2. Двухпроводная связь. Это протокол DALI, основанный на использовании двух проводов, что значительно упрощает установку и эксплуатацию системы. Проводка предназначена для передачи данных и электроэнергии, поэтому она становится экономичной за счет снижения затрат на провода и более гибкая при установке системы.

3. Два направления связи. Это означает, что контроллер может не только управлять устройствами, но и получать данные об их состоянии обратно в систему.

4. Поддержка диммирования и управления яркостью. Протокол DALI предоставляет высокоточное диммирование светильников, позволяя регулировать освещение в зависимости от условий, времени суток, уровня естественного освещения или конкретных эксплуатационных требований. Управление яркостью может быть выполнено с точностью до одного процента от максимальной, что позволяет настраивать освещение в помещениях в зависимости от требований

Принцип адресации и обмена данными

Протокол DALI основан на двухсторонней связи, что обеспечивает обмен данными как от контроллера к устройству, так и в обратном направлении.

Это позволяет не только отправлять команды на управление, но и получать информацию о состоянии системы, например, контроллер может отправлять команды для включения, выключения, диммирования или изменения настроек устройства, а устройства – передавать информацию о своем состоянии, такую как яркость, работоспособность или неисправности.

Возможность получения данных о состоянии устройства позволяет производить своевременную диагностику системы и быстро устранять неисправности.

Чтобы система определила устройство, которым необходимо управлять, или откуда получать информацию, в системе DALI каждому светильнику, датчику, контроллеру или шлюзу присваивается уникальный адрес. В системе DALI каждому устройству может быть присвоен адрес в диапазоне от 0 до 63. Таким образом, к одной линии можно подключить до 64 устройств, однако это число можно увеличить с помощью использования большего количества устройств управления или расширенных версий протокола.

Каждый светильник может иметь свой собственный уникальный адрес, например, на рабочем месте он будет иметь свой индивидуальный адрес, что поз-

волит управлять светильниками отдельно. Устройства, также, могут образовывать группы, что позволяет нескольким устройствам получать команды одновременно, например, группу можно настроить для освещения в общем проходе и все светильники, размещенные в этой области, будут включены [1].

Протокол DALI использует команды для управления устройствами и обменом данных, например:

1. Команды включения/выключения, предназначенные для управления состоянием устройств.
2. Считывание параметров, что позволяет получать информацию об устройстве, такие как текущая яркость, температура или состояние неисправности.
3. Режимы работы, включающие команды, которые управляют работой устройства, например, переключение между различными сценариями освещения.

Элементы системы DALI.

Одним из главных элементов системы являются светильники, которые выполняются как в виде простых ламп, так и более сложными устройствами с дополнительными функциями, такими как диммирование, изменение цвета и температуры света. Светильники с диммированием обеспечивают регулировку яркости в пределах от 0 до 100 процентов, позволяя создавать приемлемые условия работы и экономить электроэнергию, а светильники с изменением цветовой температуры могут быть полезны в производственных помещениях, где требуется настройка освещенности для работ разного класса точности.

Для повышения энергоэффективности и удобства эксплуатации в систему DALI часто включаются различные датчики движения, которые обнаруживают присутствие людей в помещении и автоматически включают или отключают свет, или освещенности, изменяющие уровень естественного света в помещении, что позволяет автоматически регулировать яркость искусственного освещения. Контроллеры DALI выполняют роль центрального звена системы управления. Они обеспечивают взаимодействие различных устройств и системы. Контроллеры могут быть встроены в панели управления, интерфейсы пользователя или интегрированы в более масштабные системы автоматизации зданий. Контроллеры могут быть сетевыми или локальными. В крупных промышленных объектах часто используется централизованная система управления, объединяющая несколько контроллеров и взаимодействующая с другими системами.

К основным функциям контроллера относятся управление всеми подключенными устройствами через уникальные адреса, программирование сценариями освещения, мониторинг и диагностика состоянием устройств, интеграция с другими системами.

Для удобства управления системы DALI могут быть оснащены панелями управления или интерфейсами, что позволяет регулировать освещенность в зависимости от условий или потребностей, контролировать параметры энергопотребления и оптимизировать работу системы.

Датчики времени. Датчики времени используются для автоматического управления освещением в зависимости от времени суток. Эти устройства позво-

ляют настроить освещенность на основе заданного времени или расписания. Благодаря таймерам и расписанию система может быть настроена так, чтобы включать освещение в определенное время, а интеграция с системами позволяет управлять освещением с использованием расширенных сценариев, что позволяет автоматизировать работу освещения в соответствии с графиком работы персонала. Использование датчиков времени удобно для управления освещением в тех местах, где есть четко установленный рабочий график, например, в офисах, цехах, складах, то есть, где можно настроить включение света только в рабочие время.

Датчики движения. Датчики движения являются ключевыми для автоматизации освещения, позволяя автоматически включать или отключать, поскольку они, реагируя на перемещение в помещении, передают сигнал контроллеру. Различают инфракрасные датчики, которые фиксируют изменение температуры, вызванные движением человека или объекта, и ультразвуковые датчики, работающие на основе отражения ультразвуковых волн. Датчики движения могут быть использованы в складских помещениях, коридорах, гаражах и производственных зонах, в которых включать освещение необходимо только при наличии персонала. Это позволяет снизить нежелательное энергопотребление и автоматизировать управление светом (рисунок 1) [2].

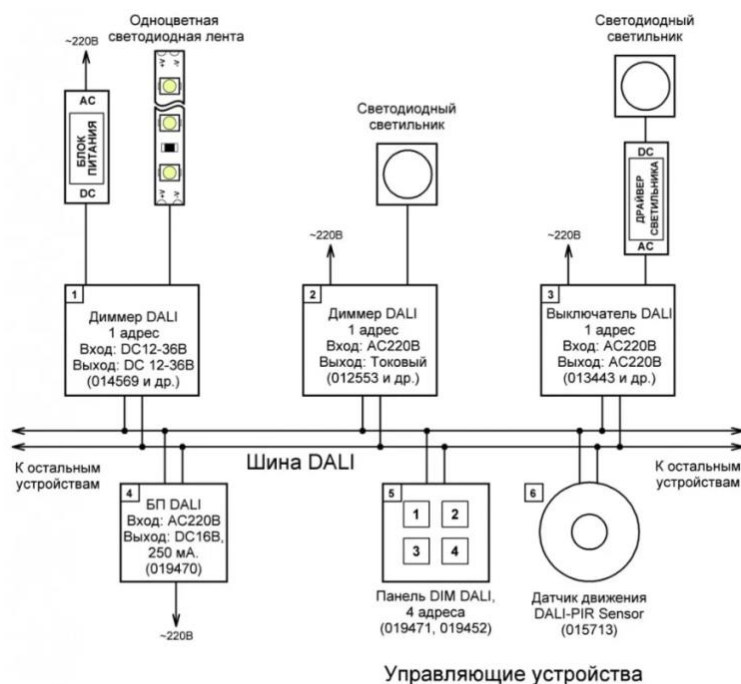


Рисунок 1 – Построение сети с использованием датчика движения

Датчики освещенности. Датчики освещенности фиксируют степень естественного освещения и, в зависимости от установленной программы, регулируют яркость светильников для поддержания оптимального уровня освещения. Когда уровень естественного освещения снижается, система увеличивает яркость, а когда увеличивается – снижает, экономя электроэнергию. Датчики освещенности

щенности могут применяться в различных типах промышленных объектов, складах, офисах и в помещениях, где необходимо поддерживать необходимый уровень освещенности (рисунок 2)

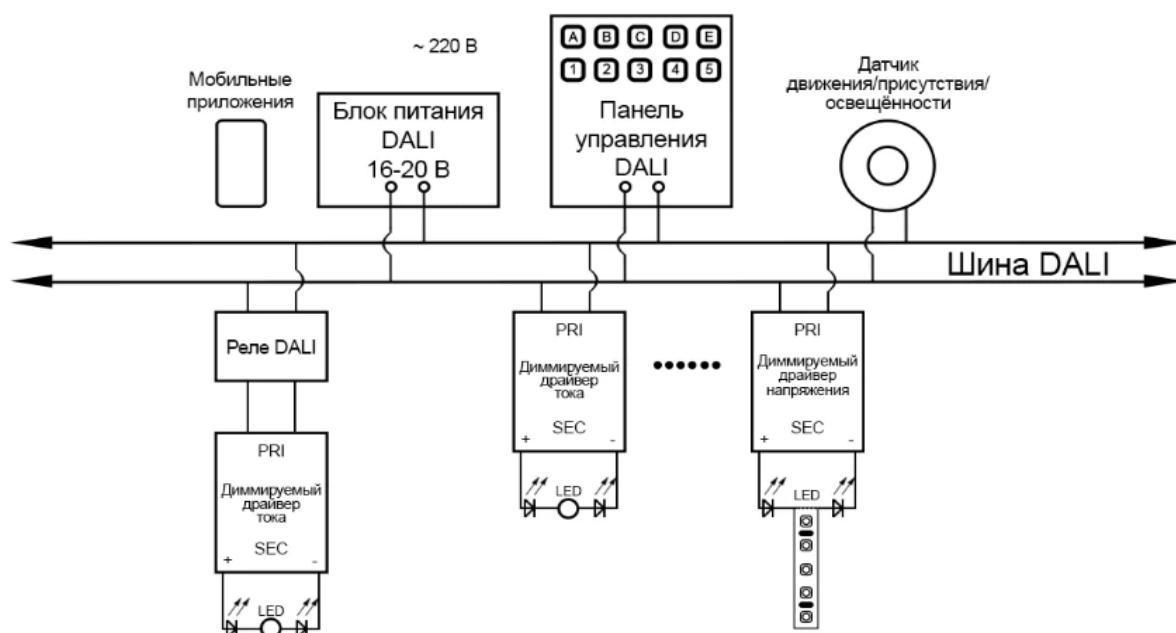


Рисунок 2 – Построение сети с использованием датчика освещенности

Внедрение DALI на промышленных объектах

Внедрение системы DALI на промышленных объектах имеет комплексный характер, включающий проектирование, монтаж, настройку и интеграцию системы освещения с другими инженерными системами. Применение DALI в промышленных объектах позволяет повысить энергоэффективность, автоматизировать управление освещением и улучшить условия труда для персонала [3].

Этапы проектирования системы управления освещением на базе протокола DALI:

1. Подготовительный этап. На данном этапе проводится подготовка планов. Необходимо нанести на планы осветительные приборы в соответствии со светотехническим расчетом, удалить ненужные обозначения.
2. Необходимо тщательно изучить техническое задание. Светильники, не входящие в техническое задание, рекомендуется удалять с плана.
3. Расстановка оборудования для ручного управления и управления датчиками движения и освещенности. На данном этапе необходимо определить количество помещений, в которых применяется ручное и автоматическое управление светом, исходя из параметров помещений. Для каждого типа датчиков наносятся зоны его действия. В центре зоны необходимо отметить место установки самого датчика (рисунок 3, 4).

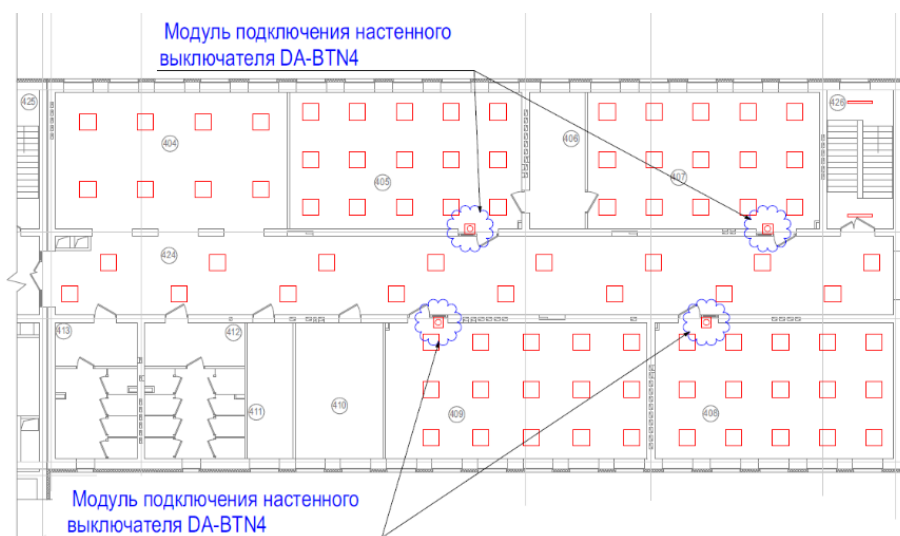


Рисунок 3 – Размещение ручного управления светом

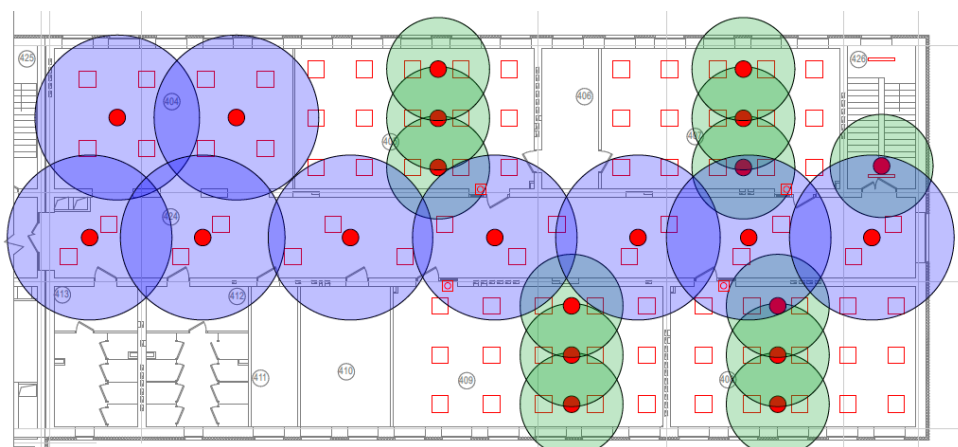


Рисунок 4 – Размещение автоматического управления светом

4. Введение условных обозначений функционального типа датчиков. На данном этапе на план наносятся условные обозначения датчиков, отслеживающих движение, улавливающих освещенностью, а также комбинированных датчиков.

5. Разделение на линии DALI. Когда оборудование и осветительные приборы выбраны, необходимо разделить площадь на линии DALI. Деление производится равномерно, для избежания появления сильно нагруженных, и наоборот, на половину пустых линий. После деления полученные линии проверяются на работоспособность (рисунок 5).

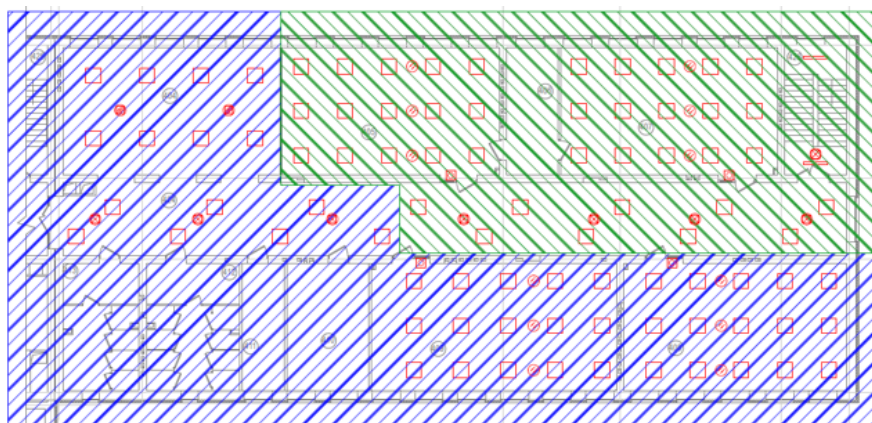


Рисунок 5 – Разделение на линии DALI

6. Анализ линий DALI. Для корректного функционирования линий DALI необходимо соответствие ряду критериев, таких как:

6.1 Количество линий, входящих в одну линию DALI, не должно превышать 64 штук.

6.2 На одну линию DALI не должно приходиться более 16 уникальных групп.

6.3 Максимальный ток линии DALI не должен превышать 250А.

6.4 Протяженность самой длинной ветви не может превышать 300м.

6.5 Линия DALI должна представляться топологией, кроме кольца (звезда, шина, смешанная).

7. Размещение шкафа управления освещением и прокладка шин DALI. После определения количества линий DALI, включенных в проект, выбирается подходящий шкаф управления освещением (рисунок 6). Необходимо выбрать место установки шкафа, подписать его и соединить кабельной шиной со всеми устройствами, входящими в состав этой шины. Если не оговорено место установки шкафа, выбирать необходимо из соображений экономии кабеля.

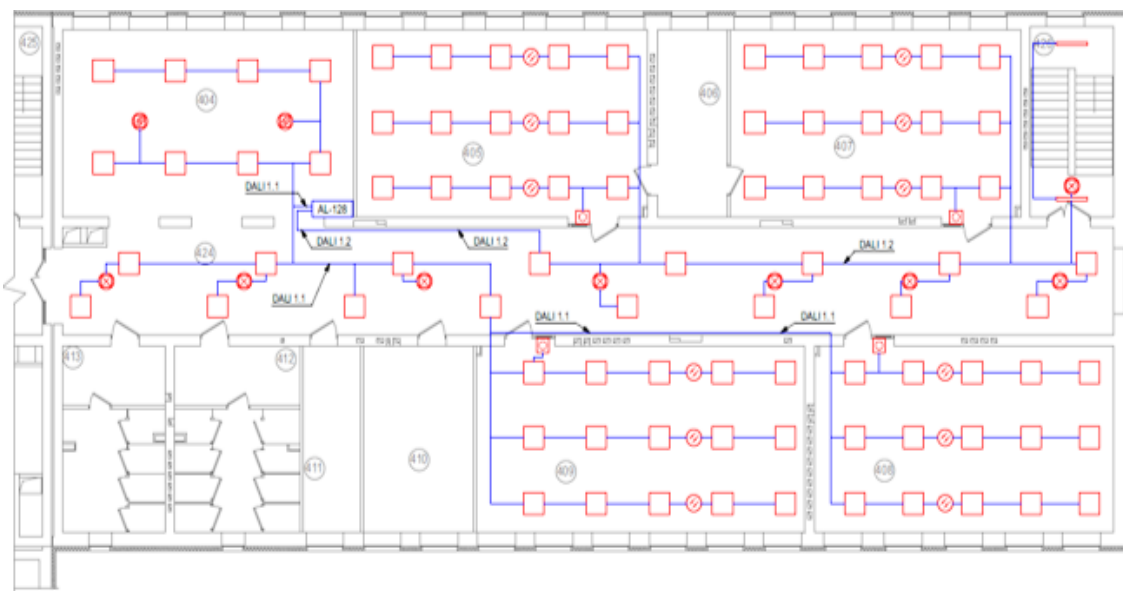


Рисунок 6 – Установка шкафа и подключение шины DALI

8. Присвоение порядкового номера всем элементам системы. В рамках линии все элементы имеют сквозную нумерацию, индивидуальную для светильников, датчиков, выключателей, например, CS 1.3.5 расшифровывается как «Комбинированный датчик, относящийся к шкафу 1, находящийся на линии 3, 5-й номер по порядку» (рисунок 7,8) [4, 5].

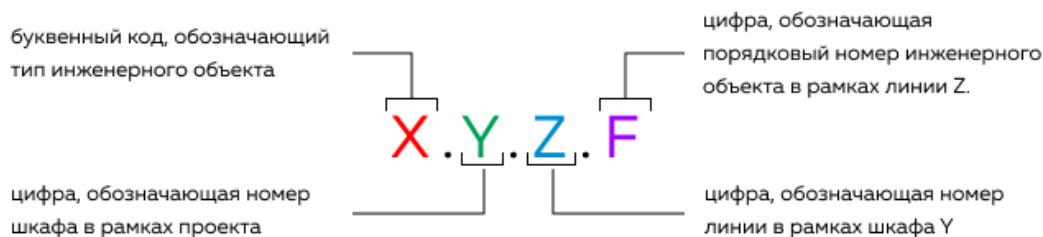


Рисунок 7 – Расшифровка порядкового номера элемента системы

Экономическая эффективность и окупаемость

Установка интеллектуальных систем управления освещением на промышленных предприятиях с использованием протокола DALI требует некоторых первоначальных вложений [5]. Но эти системы дают значительное снижение эксплуатационных расходов. Основные финансовые выгоды заключаются в:

1. Снижении потребления энергии за счет адаптивного управления освещением.
2. Сокращении расходов на техническое обслуживание за счет длительного срока службы светодиодных источников и самоконтроля их состояния.
3. Повышении производительности труда за счет лучшего качества освещения, что влияет на удобство и безопасность сотрудников.

Экономия энергии может варьироваться от 30% до 60% в зависимости от того, насколько она автоматизирована и в каких условиях она работает. Старая система освещения требовала бы частой замены ламп и обслуживания. Система DALI будет использовать светодиодные лампы со сроком службы от 50 000 до 100 000 часов — в 5–10 раз дольше, чем у обычных ламп.

Преимущества и недостатки использования системы DALI

К преимуществам можно отнести гибкость, масштабируемость, энергоэффективность, надежность, так как система позволяет индивидуально управлять каждым светильником или группой осветительных приборов, легко адаптируется к изменениям в рабочем пространстве, предоставляет возможность диммирования, сокращает эксплуатационные затраты, дистанционный мониторинг и управление через специализированное программное обеспечение [6, 7].

К недостаткам относятся высокие начальные затраты, ограничение по количеству подключаемых устройств, зависимость от кабельной инфраструктуры, сложность настройки и эксплуатации.

Заключение

Внедрение интеллектуальных систем управления освещением с использованием DALI станет основным вкладом в энергосбережение, автоматизацию процессов и снижение эксплуатационных расходов промышленных предприятий. Анализ показал, что использование DALI не только снижает потребление энергии, но и создает комфортные условия труда с гибким и удобным управлением освещением. Несмотря на то, что использование DALI дает весьма существенные преимущества, его применение требует базовых инвестиций, а также квалифицированного персонала для разработки, установки и настройки системы. Кроме того, ограничения по количеству подключенных устройств и длине кабельной сети могут потребовать дополнительных решений, таких как DALI-2 или интеграции с системами BMS.

Литература

1. DALI Alliance: [сайт]. – URL: <https://www.dali-alliance.org/> (дата обращения 23.03.2025).
2. DALI диммирование и его применение в освещении внутри и снаружи помещений: [сайт]. – URL: <https://goo.su/zmD8> (дата обращения 23.03.2025).

3. Разработка энергоэффективных систем: [сайт]. – URL: <https://inlnk.ru/jEV14a> (дата обращения 23.03.2025).
4. Рекомендации по интеллектуальному управлению освещением: [сайт]. – URL: <https://goo.su/Ну9Хui> (Дата обращения 23.03.2025).
5. Современные технологии управления: [сайт]. – URL: <https://inlnk.ru/jEV14a> (дата обращения 23.03.2025).
6. Управление освещением в коммерческих помещениях: системы DALIиKNX: [сайт]. – URL: <https://alpa.pro/upravleniya-osveshcheniyem-sistemy-dali-i-knx/> (Дата обращения 23.03.2025).
7. Энергоснабжение в освещении: [сайт]. – URL: <https://goo.su/9hJNZj> (дата обращения 23.03.2025).

УДК 621.3

КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ POWER CONSUMPTION MONITORING

Е. О. Лугавцов, А.Д. Бобко

Научный преподаватель – С.В. Константинова, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск
ef_bntu@bntu.by

E. Lugavtsov, A. Bobko

Supervisor – S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk

Аннотация: Данная работа рассматривает контроль электропотребления, выбор оборудования для контроля, влияние контроля на бизнес-процессы.

Abstract: This work examines the control of electricity consumption, the choice of monitoring equipment, and the impact of control on business processes.

Ключевые слова: контроль электропотребления, технологии, процесс.

Keywords: power consumption control, technology, process.

Введение

Контроль электропотребления становится все более актуальной задачей в условиях глобальных изменений климата, роста цен на энергоносители и стремления к устойчивому развитию [1].

Эффективное управление потреблением электроэнергии не только помогает снизить затраты для домохозяйств и предприятий, но и способствует снижению углеродного следа, что имеет важное значение для охраны окружающей среды.

Согласно данным международных организаций, значительная часть мировых энергетических ресурсов расходуется неэффективно. Это приводит к увеличению выбросов парниковых газов и усугублению проблемы изменения климата.

В связи с этим контроль электропотребления представляет собой необходимый инструмент для оптимизации использования электроэнергии [3, 4].

Основная часть

Основные аспекты контроля электропотребления

Мониторинг - это система непрерывного наблюдения за происходящими процессами явлениями в энергосистеме.

Мониторинг энергопотребления предусматривает непрерывный контроль, измерение, отслеживание, анализ потребления электроэнергии потребителями, позволяет контролировать качество электроэнергии.

Основные задачи систем мониторинга рассмотрены на рисунке 1 [2, 6].

Мониторинг потребления включает в себя:

- Умные счётчики- это устройства, которые позволяют в реальном времени отслеживать потребление электроэнергии. Они могут передавать данные на серверы для анализа и предоставления пользователю информации о расходах.



Рисунок 1 - Основные задачи систем мониторинга

По типу исполнения умные счетчики можно классифицировать как внешние устройства и интегрированные (включающие в себя в одном корпусе как измерительную, так и передающую части) (рисунок 2) [5, 6].



Рисунок 2-Умные счётчики

- Системы мониторинга представляют собой программное обеспечение, которое собирает данные с различных источников (счетчиков, датчиков и т.д.) и предоставляет отчеты о потреблении

Анализ данных основывается на двух основных направлениях:

- Исторический анализ: изучение данных о потреблении за прошлые периоды для выявления тенденций и аномалий.
- Прогнозирование: использование алгоритмов машинного обучения для предсказания будущих потребностей в электроэнергии на основе исторических данных.

Оптимизацию потребления подразделяется:

- **Энергоэффективные технологии:** внедрение устройств и систем, которые потребляют меньше энергии (например, LED-освещение, высокоэффективные электродвигатели).

- **Автоматизация:** использование систем управления зданием (BMS), которые автоматически регулируют освещение, отопление и кондиционирование воздуха в зависимости от текущих условий.

Управление спросом:

- **Программы управления спросом:** инициативы, направленные на снижение потребления в пиковые часы, что помогает избежать перегрузок в сети и снижает стоимость электроэнергии.

- **Временные тарифы:** тарифы, которые изменяются в зависимости от времени суток, поощряющие пользователей снижать потребление в часы пик.

Образование и осведомленность:

- **Информационные кампании:** обучение пользователей о том, как эффективно использовать электроэнергию и какие меры можно предпринять для снижения потребления.

- **Приложения для отслеживания:** мобильные приложения, которые помогают пользователям следить за своим потреблением электроэнергии и получать рекомендации по его снижению.

Преимущества контроля электропотребления.

Общая картина контроля энергопотреблением интеллектуальным устройством серии КМ представлена на рисунке 3 [7].



Рисунок 4 - Контроль электропотребления на базе интеллектуального устройства серии КМ

Преимущества контроля электропотребления является:

- **Снижение затрат:** эффективное управление позволяет существенно сократить расходы на электроэнергию.

- **Устойчивое развитие:** снижение потребления энергии способствует уменьшению углеродного следа и улучшению состояния окружающей среды.

- **Повышение надежности:** оптимизация потребления помогает предотвратить перегрузки и сбои в электросетях.

• **Комфорт и удобство:** автоматизированные системы управления создают более комфортные условия для пользователей.

Заключение

Контроль электропотребления является важным инструментом для достижения энергоэффективности и устойчивого развития. С помощью современных технологий и методов можно значительно улучшить управление энергетическими ресурсами, что принесет выгоду как отдельным пользователям, так и обществу в целом.

Литература

1. Контроль и учет электропотребления на предприятиях [сайт]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-i-uchyot-energopotrebleniya-na-predpriyatiyah> (дата обращения:12.03.2025).
2. Устройства мониторинга электроэнергии [сайт]. – URL: <https://www.proenergo.ru/statyi/ustroystva-kontrolya-energopotrebleniya/> (дата обращения:13.03.2025).
3. Методы и средства управления энергоснабжением [сайт]. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/6222/Методы%20и%20средства%20управления%20энергоснабжением%20.pdf?sequence=1> (дата обращения:14.03.2025).
4. Умные счетчики [сайт]. – URL: <https://electroshope.ru/umnye-schetchiki> (дата обращения:14.03.2025).
5. Приложения мониторинга [сайт]. – URL: https://avatars.mds.yandex.net/i?id=d166b43d409a286133051e8a522d6987_1-5249054-images-thumbs&n=13 (дата обращения:24.04.2025).
6. Задачи энергомониторинга [сайт]. – URL: <https://wirenboard.com/statics/content/content/63a422f32a376.png> (дата обращения:24.04.2025).
7. Устройства мониторинга электроэнергии [сайт]. – URL: <https://www.proenergo.ru/statyi/ustroystva-kontrolya-energopotrebleniya/> (дата обращения:24.04.2025).

УДК 628.9.04

**АНАЛИЗ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ СВЕТА ВО
ВНУТРЕННЕМ ОСВЕЩЕНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ
ANALYSIS OF COLOR CHARACTERISTICS OF LIGHT SOURCES IN IN-
DOOR LIGHTING OF INDUSTRIAL OBJECTS**

П.А. Чибисова, Д.В. Бердовский

Научный руководитель – В.Н. Калечиц, к.т.н.,
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

P. Chibisova, D. Berdovskiy
Supervisor – V. Kalechyts, Candidate of Technical Sciences,
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в данной статье описываются основные особенности цветовых характеристик источников света во внутреннем освещении промышленных объектов.

Abstract: This article describes the main features of the color characteristics of light sources in the indoor lighting of industrial objects.

Ключевые слова: цветовая температура, освещенность, яркость, источники света.

Keywords: color temperature, illuminance, brightness, light sources.

Введение

Эффективное внутреннее освещение промышленных объектов играет важнейшую роль в обеспечении безопасности труда, повышении производительности и улучшении качества выполняемых работ. Факторами, влияющими на качество освещения, восприятие цвета объектов, точность выполнения операций и общее психологическое состояние персонала, являются цветовая температура, индекс цветопередачи, насыщенность и яркость.

В этой статье рассмотрены основные аспекты цветовых характеристик света и их влияние на внутреннее освещение промышленных объектов.

Основная часть

Цветовая характеристика – это совокупность параметров, описывающих свойства цвета, его восприятие человеческим глазом. Она включает в себя: **оттенок, насыщенность, яркость.**

Эти параметры позволяют не только описать визуальное восприятие цвета, но и определить связь с физическими характеристиками света, такими как спектральное распределение и длина волны [1, 2].

Насыщенность – это характеристика света, отражающая степень приближения цвета к спектрально чистому, насыщенному оттенку.

Яркость – это световая величина, характеризующая интенсивность света, излучаемого или отражаемого поверхностью в определенном направлении, на единицу площади этой поверхности, проецируемой на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения

Цветовая температура – это основной параметр, определяющий цветовой оттенок света [3]. Она измеряется в градусах Кельвина (К) и характеризует спектральный состав излучения источника света. Чем ниже цветовая температура, тем более теплый и желтый свет излучает источник, а чем выше – тем холоднее и синее. Существуют основные диапазоны цветовой температуры:

1. тепло-белый свет (до 3300 К);
2. нейтрально-белый свет (3300–5000 К);
3. белый дневного света (выше 5000 К).

Тепло-белый свет используется для создания уютной атмосферы в жилых помещениях. Нейтрально-белый свет применяется в помещениях с многофункциональным назначением, так как способствует концентрации внимания, обеспечивает равномерное освещение рабочих поверхностей. Белый дневного света используется на промышленных объектах Республики Беларусь, где важны высокая видимость и точность цветопередачи для выполнения технологических процессов и обеспечения комфортных условий труда. Индекс цветопередачи – это количественная мера способности источника света передавать цвета объектов по сравнению с эталонным, которая варьируется от 0 до 100, где 100 – идеальная передача цветов. Источники света с высоким индексом цветопередачи (более 90) обеспечивают более реалистичное восприятие цветов, что особенно важно на промышленных предприятиях.

Влияние цветовых характеристик на освещение заключается в следующем:

1. цветовая температура и индекс цветопередачи влияют на эмоциональное восприятие пространства. Теплый свет создает уютную атмосферу, в то время как холодный свет может сделать пространство более функциональным и бодрым;

2. высокий индекс цветопередачи необходим в местах, где требуется точная оценка цветов и высокая функциональность освещения;

3. современные источники света, такие как светодиоды, имеют высокий индекс цветопередачи и высокую энергоэффективность при низком энергопотреблении, что делает их привлекательными для широкого использования.

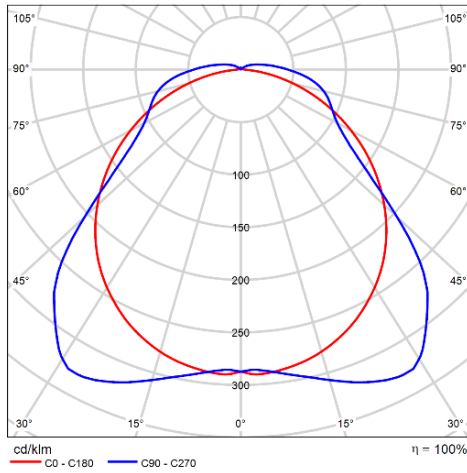
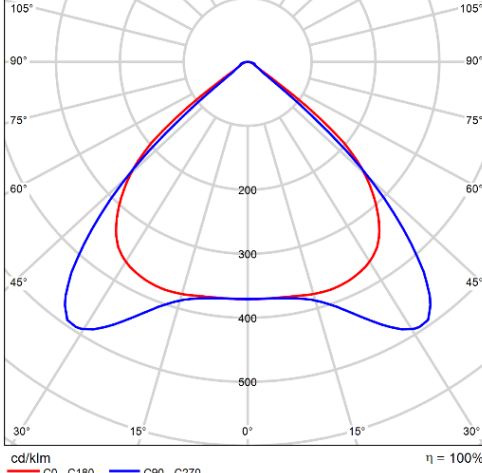
Для промышленных предприятий Республики Беларусь применяются источники света с цветовыми характеристиками, представленными в таблице 1.

Таблица 1. Цветовые характеристики источников света

Тип помещения	Цветовая температура(К)	Индекс цветопередачи	Особенности применения
1	2	3	4
Производственные цеха	4000–5000	Более 80	Высокая мощность светильников, равномерное освещение
Зоны точных операций	4000–5000	Более 80	Максимально точная цветопередача для контроля качества
Складные помещения	4000–4500	Более 80	Направленное освещение для экономии энергии
Аварийные зоны	3000–4000	Более 80	Резервное питание, комфортный свет при отключении основного

Одним из крупнейших производителей светотехнической продукции для промышленных предприятий является компания «PHILIPS». Поэтому для анализа цветовых характеристик были выбраны светильники WT120C G2 LED60S/840 PSU L1500[4] (далее WT120C) и 4MX850 491 LED40S/830 PSD WB SI (далее 4MX850) [1]. Данные светильников представлены в таблице 2.

Таблица 2. Технические данные светильников WT120C и 4MX850

Изображение светильника		
Номинальная мощность, Вт	43	24
Световой поток, лм	6000	4000
Коэффициент мощности	0,9	0,97
Цветовая температура, К	4000	3000
Степень защиты	IP65	IP20
Тип КСС		
Габариты ВxШxГ, мм	76x80x1515	50x63x1478

Для сравнения светильников с разной цветовой температурой использована программа DIALuxevo 13. Расчёт освещенности производится методом линейных изолукс. Его применяют для проверочных расчетов при определении фактической освещенности рабочей поверхности и сравнении ее с нормированным

значением. На рисунках 1,2 изображена рабочая поверхность с изолюксами, линиями, соединяющими точки с одинаковой освещённостью. Внизу рабочего окна программы (рисунок 1,2) расположена шкала настройки фиктивных цветов, которая позволяет настроить отображение изменением значений границ или числа отображаемых цветов. Комбинация установки диапазона и количества цветов позволяет получить нужное изображение расчетного объекта [3, 4].

В качестве примера промышленного помещения был выбран цех площадью 60 м². Согласно СН 2.04.03-2020, нормируемая освещённость для выбранного цеха составляет 400 лк [5]. На рисунке 1 представлен цех с четырьмя установленными светильниками WT120C, цветовая температура– 4000K, средняя освещённость–454 лк.



Рисунок 1 – Результаты светотехнического расчёта цеха со светильниками WT120C

На рисунке 2 установлено 6 светильников 4MX850, цветовая температура – 3000K, средняя освещённость – 421 лк.

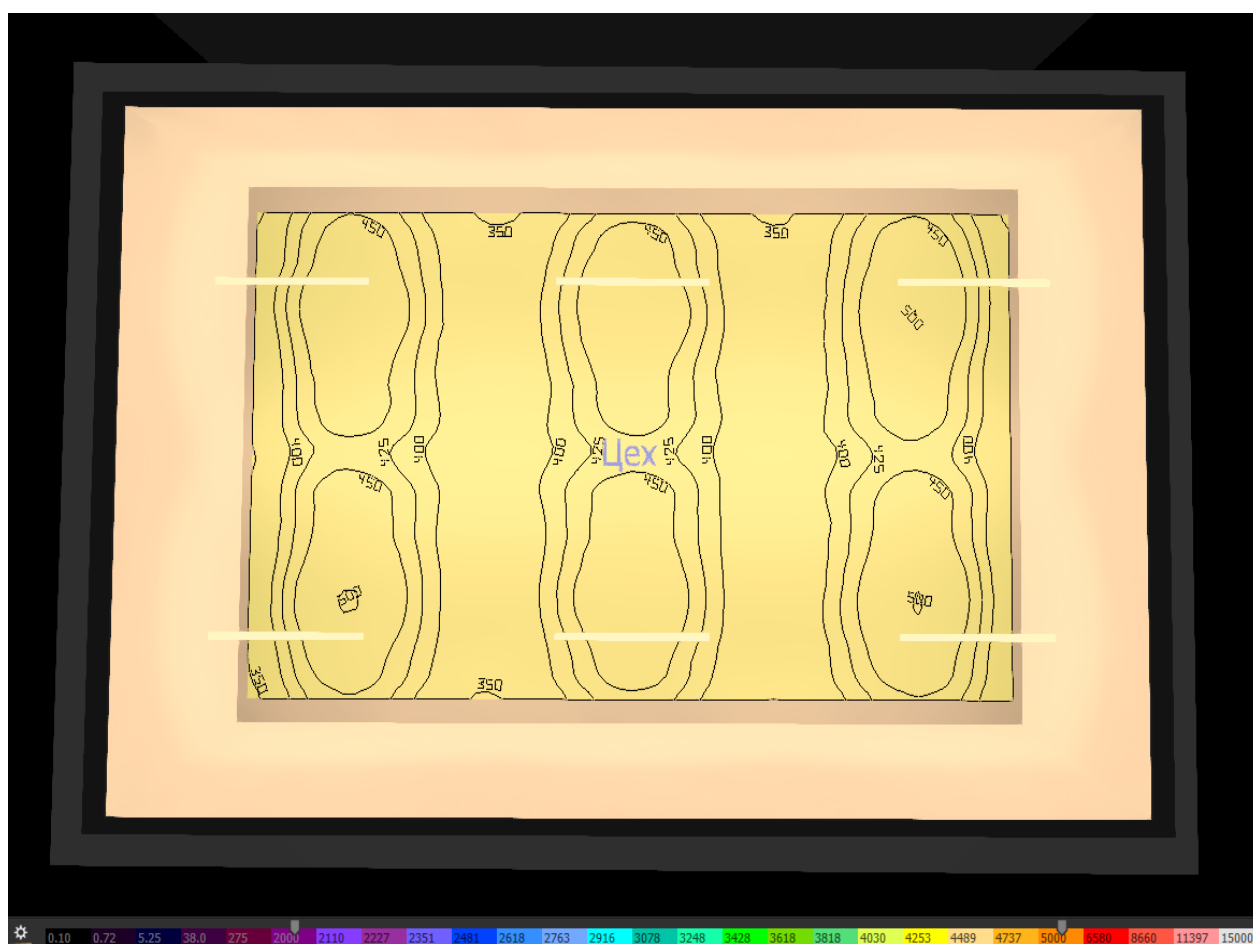


Рисунок 2 – Результаты светотехнического расчёта цехасосветильниками 4MX850

На основании рисунка 1 светильники с цветовой температурой 4000К излучают холодный белый свет, который воспринимается как более яркий и нейтральный. Этот свет способствует повышению концентрации и бодрости, что делает его предпочтительным для выполнения точных работ на промышленных предприятиях. Он обеспечивает более четкое и сфокусированное освещение, улучшая визуальное восприятие деталей [5].

На основании рисунка 2, светильники с температурой 3000К излучают теплый белый свет с желтоватым оттенком, создавая уютную и расслабляющую атмосферу, что делает их оптимальными для комнат отдыха рабочего персонала на предприятиях.

Из этого следует, что освещённость цеха с светильниками WT120С с цветовой температурой 4000К является более оптимальной для выполнения высокоточных работ на промышленных предприятиях. Документов, нормирующих цветовую температуру источников света промышленных помещений, в Республике Беларусь не создано.

Заключение

В промышленных помещениях оптимальная цветовая температура освещения находится в диапазоне примерно от 4000 К до 5000 К, что соответствует нейтральному или близкому к естественному белому свету. Такой диапазон обеспечивает комфортное восприятие цветов и деталей, что важно для точности и безопасности труда.

Литература

1. Philips [сайт]. - / Maxos LED, для промышленного сектора – URL: https://www.lighting.philips.ru/prof/indoor-luminaires/trunking/maxos-led/910629122626_EU/product– (дата обращения: 20.04.2025)..
2. ЭлектроКабельКомплект [сайт]. - /Особенности освещения промышленных помещений -Режим доступа :<https://www.ekk.by/articles/osobennosti-osvecheniya-promyshlennyh>– (дата обращения: 20.04.2025)..
3. FERON [сайт]. - / Цветовая температура и её влияние на освещение: что выбрать для дома и офиса? – URL: <https://feron.by/company/articles/165160/>– (дата обращения: 20.04.2025).
4. Philips [сайт]. - / CoreLine Waterproof – URL: https://www.lighting.philips.ru/prof/indoor-luminaires/waterproof-and-cleanroom/waterproof-luminaires/coreline-waterproof/LP_CF_WT120C_EU/family– (дата обращения: 20.04.2025).
5. СН 2.04.03-2020 [сайт]. - /Естественное и искусственное освещение. – URL: <https://normy.by/tnpa/1/6918.pdf>– (дата обращения: 20.04.2025).

УДК 628.9.04

ВЫБОР КОНФИГУРАЦИИ ЛИНИИ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СРАВНИТЕЛЬНЫХ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ СВЕТИЛЬНИКОВ**CHOOSING THE CONFIGURATION OF THE OUTDOOR LIGHTING LINE USING COMPARATIVE LIGHTING CALCULATIONS OF LUMINAIRES**

А.Д. Бобко, Е.О. Лугавцов

Научный руководитель – Калечиц В. Н., к.т.н.

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

Viachaslaukn@gmail.com

A. Babko, E. Lugavtsov

Supervisor – V. Kalechyts, Ph.D. of Engineering Sciences

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: В работе рассмотрен выбор конфигурации линии наружного освещения, сравнение светотехнических расчетов светильников.

Abstract: The paper considers the choice of the configuration of the outdoor lighting line, a comparison of lighting calculations of luminaires.

Ключевые слова: светильник, Dialux, освещённость, освещение.

Keywords: luminaire, Dialux, illumination, lighting.

Введение

Уличное освещение является неотъемлемой частью городской инфраструктуры, оказывая влияние на различные аспекты жизни горожан: от повышения безопасности и комфорта до формирования эстетического облика города. Для более эффективного использования электроэнергии применяют различные способы выбора оптимальных решений для наружного уличного освещения. Существует большое количество факторов, влияющих на освещённость улицы, в данной работе рассмотрели зависимость светотехнических данных от расположения светильников вдоль заданной улицы. Для рассмотрения зададим 4 варианта расположения световых мачт.

Основная часть

Для светотехнического расчета оптимизации уличного освещения в современных реалиях существуют различные программные обеспечения. К таким программам относятся: DIALux, ReluxProfessional, Calculux и FAEL-LITE. В данной работе использовали программное обеспечение DIALuxevo 12.0.

Программа DIALuxevo 12.0 может быть применена для внутреннего освещения, поэтому первым шагом на панели «Создать новый проект» выбрали пункт «Освещение улицы». Следующим шагом нужно задать параметры проезжей части, зелёных зон, а также тротуарных дорожек. В качестве примера рассмотрена улица с параметрами, представленными в таблице 1. В DIALuxevo 12.0 представлены европейские стандарты класса освещенности, поэтому в данной работе классы освещенности были выбраны близкие к нормативам в РБ.

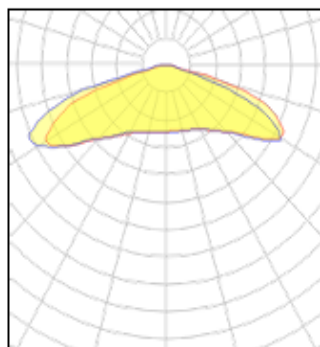
Таблица 1–Исходные данные улицы

Пешеходная дорожка 1			Пешеходная дорожка 2			Зеленая полоса 1		Зеленая полоса 2	
ширина	высота	Класс освещенности	ширина	высота	Класс освещенности	ширина	высота	ширина	высота
2,5m	0,15m	P1	2,5m	0,15m	P1	3,5m	0,15m	2,5m	0,15m
Проезжая часть									
дорожное покрытие		ширина проезжей части		число полос движения			класс освещенности		
CIE N1		9 m		2			M1		

Для освещения улиц светильник должен соответствовать требованиям степени защиты (IP) для обеспечения работы светильника в любую погоду.

Светильник рассматривался из числа ведущих европейских производителей. Для освещения данной улицы на сайте производителя был выбран наружный консольный светильник фирмы VARTON с параметрами, представленными на рисунке 1 [1]. При выборе учитывались способ монтажа светильника, степени защиты и тип КСС.

Световой выход 1



1 x LED

Номинальная мощность лампы

Световой поток 25650 lm190

Световая отдача 135 lm/WBт

ССТ 5000 K

CRI 70

LOR 100 %

Общий световой поток 25650 lm

Общая мощность 190

Вт

Монтаж

Консольный

Форма и размеры

Длина: 871 мм

Ширина: 350 мм

Высота: 127 мм

Регулируемость

фиксированный

Электрика

Мощность: 190 Вт

Защита

IP: 66

IK: 09

Рисунок 1 – Основные характеристики светильника VARTON

Добавили группу светильников на план улицы односторонним размещением справа, произвели оптимизацию расположения светильников командой «Оптимизировать все варианты». Во вкладке «Результат» были получены оптимальные варианты расположения светильников, вариантов оказалось несколько. Поэтому для сравнения заданных параметров задаёмся ограничениями расстояния между мачтами и высотой световых точек.

Провели те же расчеты для вариантов с односторонним расположением слева, двусторонним размещением и смешанным двусторонним размещением (шахматный порядок).

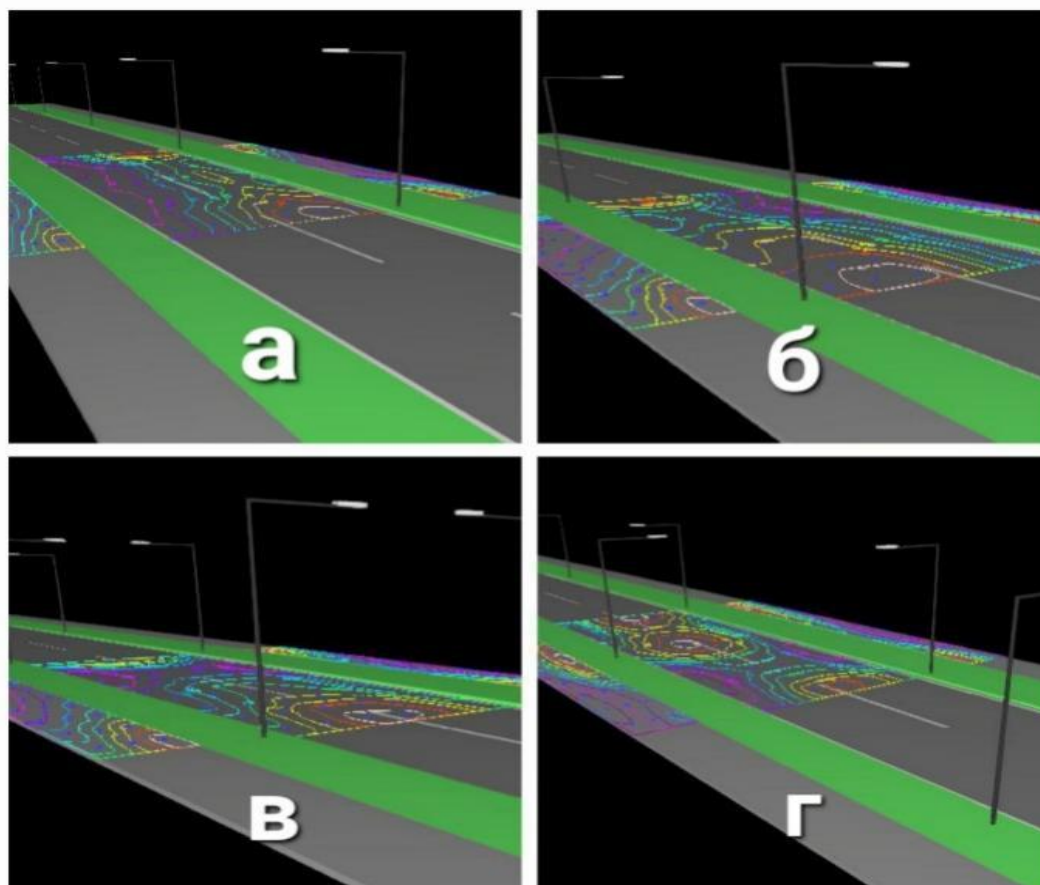


Рисунок 2 – Варианты расположения мачт светильников:

а – одностороннее расположение справа; б – одностороннее расположение слева;
в – двустороннее расположение справа; г – со смешанным двусторонним размещением
(шахматный порядок)

Получив 4 различных варианта расположения светильников обратили внимание на их световые параметры каждого и выбрали лучший [2].

Полученные данные представлены в таблице 2.

После сравнения полученных результатов (таблица 2) видно, что наилучшие показатели освещенности соответствуют двустороннему размещению и размещению в шахматном порядке. В Республике Беларусь основными показателями качества освещения дорог являются яркость и освещенность. В нашем случае результат этих вариантов получился одинаковым, так как высота и расстояние между светильниками подбирались одинаково.

Таблица 2—Сравнительная таблица полученных результатов

Способ расположения	с односторонним размещением справа	с односторонним размещением слева	с двусторонним размещением	со смешанным двусторонним размещением (шахматный порядок)
Проезжая часть 1				
Яркость L [кд/м ²]	3,27	3,29	6,56	6,56
Неравномерность освещения (мин/ср) U_0	0,71	0,62	0,81	0,83
Неравномерность освещения (мин/макс) U_1	0,8	0,71	0,77	0,83
Коэффициент ослепления TI	9	10		
Пешеходная дорожка 2				
Макс. освещённость E_m [лк]	26,32	15,87	42,19	42,19
Мин. освещённость E_{min} [лк]	21,65	12,76	34,65	35,89
Пешеходная дорожка 1				
Макс. освещённость E_m [лк]	18,04	26,38	46,42	46,42
Мин. освещённость E_{min} [лк]	14,66	22,89	38,15	39,27

Заключение

Полученные результаты можно учитывать при проектировании уличного освещения, однако их использование должно осуществляться лишь к подобным проектам улиц. В Республике Беларусь в соответствии с нормативными документами выбор схемы размещения осветительных приборов зависит от геометрии освещаемого участка: размещение пешеходных переходов, перекрёстки и пересечения дорог, железнодорожные переезды и другое [2]. Например, использование шахматного расположения мачт светильников не рекомендуется на закруглённых участках дороги, так как данное расположение затрудняет визуальное восприятие улицы [3]. Поэтому однозначного решения освещения для улиц различного типа не существует. В современных реалиях использование различных программ помогает разработать проект абсолютно для любой улицы в любой точке мира.

Литература

1. Поиск светильников [сайт]. – URL: <https://luminaires.dialux.com/ru#0> (дата обращения: 05.04.2025).
2. Наружное освещение городов [сайт]. – URL: <https://normy.by/tnpa/1/8036.pdf> (дата обращения: 05.04.2025).
- Освещённость проезжей части [сайт]. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/16493/Конопелько> (дата обращения: 10.04.2025).

УДК 621.311

РАЗВИТИЕ МИНСКОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ DEVELOPMENT OF MINSK ENERGY SYSTEM

Я.В.Тибеж

Научный руководитель – Е.А. Дерюгина, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

Y. Tibezh

Supervisor – A. Dziaruhina, Candidate of Technical Sciences
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: В современном мире энергетика имеет огромное влияние на уровень жизни людей и применяется в различных сферах промышленности. В данной работе рассмотрено развитие минской энергосистемы на разных периодах времени.

Abstract: In today's world, energy has a huge impact on people's living standards and is used in various industries. This paper examines the development of the Minsk energy system in different periods of time.

Ключевые слова: энергосистема, электрификация, электростанция, энергетическое хозяйство, развитие

Keywords: energy system, electrification, power plant, energy economy, development

Введение

До появления электричества в белорусских домах для освещения помещений применяли свечи и лучину, а в более поздний период и керосиновые лампы. Эти способы обладали существенными недостатками: в случае со свечами и лучиной освещение было очень дорогим и малоэффективным. Появление керосиновых ламп сделало освещение в домах более доступным и практичным, однако для керосиновых ламп была свойственна высокая пожароопасность, была необходима их постоянная заправка, а также они выделяли продукты горения, которые негативно влияют на здоровье человека и портят предметы интерьера. Помимо этого, такое освещение по-прежнему оставалось недешевым, и если в одной комнате горел свет, то в ней своими делами занималась вся семья. С появлением электрических ламп их преимущества были очевидны: они не требуют дополнительной работы по их уходу, настройке, электрические лампы быстро включались и выключались, а также были безопасны для человека. Для промышленных предприятий выгода проведения электричества также была очень значимой: проведение электричества давала возможность удлинить рабочий день, внедрить электрические станки, повысить автоматизацию производства. На фоне этих достоинств постепенная электрификация городов Беларуси была неизбежна. [1, 4]

Основная часть

История белорусской энергетики начинается ещё в дореволюционное время. В 1895 году построена и пущена в работу первая минская электростанция «Эльвод». Постройку станции инициировал губернатор Кароль Гуттен - Чап-

ский. Первоначально, в оснащение электростанции входили паровая машина системы Вестингауза на 100 лошадиных сил, две паровые машины на 50 лошадиных сил и динамо-машины напряжением 110 В постоянного тока. Поначалу «Эльвод» питал только центральные улицы, городские театры и несколько частных домов, но постепенно с ростом мощности электростанции увеличивалось количество потребителей и расширялась сфера применения за счет повсеместного перехода фабрик на электродвигатели. К 1930 году «Эльвод» выдавал более 3000 кВт электроэнергии и питал весь Минск. [2, 4]

Отдельным важным этапом в истории белорусской энергетики считается выполнение плана ГОЭЛРО, созданного в 1920 году. Этот план был первым долгосрочным проектом по развитию экономики страны, а его задачей ставилось сделать СССР одной из самых развитых стран в промышленном и технологическом отношении. За 10 лет выполнения плана общая мощность электростанций увеличилась в 2,5 раза по сравнению с показателями на 1913 год. План также подразумевал и внедрение инноваций в сферу энергетики: вместо локомотивов и дизельных станций вводились паротурбинные, происходил переход на переменный ток.

В 1934 году построена ТЭЦ-2. Главной особенностью станции было то, что она являлась вторым предприятием – самостоятельным организационно-обособленным субъектом. В отличие от БелГРЭС, полностью строившийся Наркоматом СССР в ходе выполнения плана ГОЭЛРО, ТЭЦ-2 был спроектирован и построен собственными силами республики. До 1944 года станция входила в хозяйство Минска. Также, в отличие от БелГРЭС, ТЭЦ-2 являлась коммунальной. Станция находилась в черте города и недалеко от потребителей тепловой и электрической нагрузок – заводов «Большевик», имени Октябрьской революции и Кирова, фабрики «Коммунарка», мясокомбината. Работала станция на местном топливе – кусковом торфе с добавлением до 30% фрезерного [1]. Расположение станции считалось удачным не только из-за близкого расположения к потребителям, но и по причине возможности глубокого ввода воздушных линий на 35, а затем и 110 кВ.

В 1940 году начались работы по пуску второй очереди ТЭЦ-2. К этому же году было отстроено много отдельных электростанций в районных центрах Минщины. Годовая выработка электроэнергии в регионе превысила 82 МВт·ч. Тяжелая и легкая промышленность в Минске были полностью электрофицированы. 25 мая 1940 года была утверждена схема электрификации белорусской ССР, в неё входила постройка ряда новых электростанций, в том числе и теплоэлектроцентралей.

Планы по развитию белорусской энергетики были сорваны началом Великой Отечественной войны в 1941 году. Совершенствование белорусских энергосистем остановилось на несколько лет.

Восстановление энергетики началось сразу после вывода немецко-фашистских захватчиков в 1944 году. 12 июля 1944 года управление Белорусского энергокомбината переносится из витебской БелГРЭС в Минск. В октябре 1944 это управление начало называться «Белорусэнерго». В его состав входили минские электростанции ГЭС-1 и ТЭЦ-2, а также БелГРЭС. В 1954 году начали образо-

вываться облэнерго, в работу которых входила электрификация областных городов, районных центров. В период с конца 1950 до начала 1960 годов происходит множество структурных преобразований в сфере энергетики, в результате которых образуются областные электрические сети, на основе которых возникли районные энергетические управления.

В 1946 году началось строительство новой ТЭЦ-3. Её создание напрямую связано с Минским тракторным заводом, который нуждался в электроэнергии. Первый пуск станции состоялся в 1951 году. На станции заработал турбоагрегат ПТ-25-90 мощностью 25 МВт и котел ТП-230. Строительство первой очереди ТЭЦ-3 завершилось к 1955 году, а второй – 1957 году. Мощность станции к этому времени выросла до 100 МВт. В 1966 – 1968 гг. сооружена водогрейная котельная с четырьмя котлами ПТВМ-100 [1]. Это дало возможность повысить уровень использования энергетического оборудования, а также улучшить экономичность ТЭЦ в целом. В октябре 1973 года станцию полностью перевели с угля на мазут.

30 сентября 1977 года начинает эксплуатироваться первый агрегат на ТЭЦ-4 – турбина ПТ-60 с котлом БКЗ-420. Второй агрегат Т-100/120 и котел БКЗ-420 пустили в работу в декабре 1978 года, в декабре 1979 года введен третий агрегат той же мощности. Позднее были введены новые энергоблоки: №4 и №5 с установками Т-250/300 8 октября 1985 и 30 декабря 1987 годов соответственно. С установкой энергоблока №5 достигнута проектная мощность электростанции в 900/780 МВт. Дальнейшее увеличение мощности электростанции было связано с отказом от планов постройки Минской АЭС. Вторая очередь включала в себя блок №6, состоявший из Т-250/300 и котла БКЗ-420, и блок №7 с водогрейной котельной 2хКВГМ-180 [3].

Первой электростанцией Минска, пущенной в работу после распада СССР, в 1999 году становится ТЭЦ-5. Мощность первого энергоблока составила 330 МВт.

Энергосистема Минска в дальнейшем продолжает развиваться в рамках Государственной комплексной программы модернизации. Данные меры обусловлены мировой тенденцией общего перехода на парогазовые технологии. В 2009 году на Минской ТЭЦ-3 начинает работать новый уникальный парогазовый блок мощностью 230 МВт. В 2011 году в рамках программы успешно переоборудована ТЭЦ-2: на ней установлены две ПГУ мощностью по 32,5 МВт. В 2012 году пущен второй блок электростанции ТЭЦ-5. Максимальная мощность на нем составила 430 МВт. В модернизации ТЭЦ-5 и ТЭЦ-2 принимала участие Китайская национальная корпорация по зарубежному экономическому сотрудничеству.

В 2020 году завершилась модернизация ТЭЦ-2, ТЭЦ-3 и ТЭЦ-4 с установкой новых электрокотлов. После реконструкции значительно увеличилась мощность электростанций. Производительность ТЭЦ-2 возросла до 90 МВт, ТЭЦ-3 – до 542 МВт а ТЭЦ-4 – до 1035 МВт.

На данный момент времени курс развития энергетики направлен на сокращение зависимости от внешних энергоносителей. С 2021 по 2023 год пущен 41 энергоисточник на местных видах топлива, к концу 2025 года планируется ввод в эксплуатацию еще 54.

10 ноября 2021 года в работу пущен первый блок Белорусской Атомной Электростанции. 13 мая 2023 года второй блок станции включен в энергосистему Минска. В систему БелАЭС входят два реактора ВВЭР-1200 суммарной мощностью в 2400 МВт. Постройка электростанции осуществлялась по российскому проекту «АЭС-2006», который являлся самым современным на момент строительства. Главной особенностью проекта были водо-водяные реакторы третьего поколения с улучшенными технико-экономическими показателями, объединяющие в себе продвинутые системы активной и пассивной безопасности.

Заключение

На сегодняшний день Минская областная энергосистема является самой мощной и крупной в Республике Беларусь. Среди стран СНГ и Балтии Минская тепловая система по размерам и сложности уступает только московской. Энергосистема Минска постоянно модернизируется, внедряются современные технологии, что повышает экономичность производства электроэнергии и уменьшает воздействие электростанций на окружающую среду.

Литература

1. Александров, И. Н. Белорусская энергетическая система (1931-1991) / И. Н. Александров – Мн.: Министерство энергетики Республики Беларусь, 1992
2. Министерство энергетики Республики Беларусь [сайт]. - /О ходе строительства БелАЭС. – URL: <https://www.minenergo.gov.by/belorususkaya-aes/> – (дата обращения: 29.04.2025).
3. Официальный сайт РУП «Минскэнерго» [сайт]. - /Историческая справка – URL: <https://web.minskenergo.by/istoricheskaya-spravka/> – (дата обращения: 29.04.2025).
4. Тибеж, Я.В. История и реконструкция первой минской электростанции / Я.В. Тибеж, Е.А. Дерюгина // Актуальные проблемы энергетики – 2024 [электронный ресурс]. - : материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов, Минск, 2025 г.: Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2025. – С. 110–112.

УДК 621.3

СОВРЕМЕННЫЕ КИТАЙСКИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ CHINA'S MODERN HIGH-SPEED RAILWAYS

Чжан Чжэнь

Научный руководитель – Е. А. Дерюгина, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Zhang Zhen

Supervisor – A. Dziaruhina, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: Рассматривается современное состояние развития и характеристики современных высокоскоростных железных дорог Китая. Изучаются система тягового электроснабжения, состав и значение ее обширной железнодорожной сети, а также связь высокоскоростных железных дорог Китая с современными энергетическими проблемами.

Abstract: The current development status and characteristics of China's modern high-speed railways are considered. The traction power supply system and the composition and significance of its extensive railway network is studied, as well as the connection between China's high-speed rail and contemporary energy issues.

Ключевые слова: Высокоскоростная железная дорога, система тягового электроснабжения, железнодорожная сеть, энергетика.

Keywords: High-speed railway, traction power supply system, railway network, energy.

Introduction

As the global economy develops and the population grows, energy issues have increasingly become a critical factor constraining human social progress. Over-reliance on traditional energy sources has led to resource depletion, environmental pollution, and other challenges. Finding clean, efficient, and sustainable energy solutions has become an urgent priority. In this context, energy consumption and transformation in the transportation sector have garnered significant attention. China's modern high-speed railways, as outstanding representatives of transportation modernization, have not only achieved remarkable results in improving transport efficiency and changing travel methods but also demonstrated unique value in energy utilization and innovation, closely related to contemporary energy issues.

Main part

China's high-speed railways refer to passenger-dedicated lines designed for speeds of 250 kilometers per hour (including reserved capacity) or more, with initial operational speeds of over 200 kilometers per hour. They feature high speed, high density, and high comfort, making them a crucial type of transportation infrastructure in contemporary China.

Currently, China's operational high-speed rail mileage has exceeded 46,000 kilometers, ranking first in the world and accounting for over 70% of the global total. [1] This extensive high-speed rail network covers 96% of cities with a population of over

500,000, significantly reducing travel time between cities and forming a relatively complete transportation system. It not only facilitates people's travel but also plays an irreplaceable role in promoting regional economic integration and driving social and economic development.

High-speed railways are highly complex integrated systems, primarily manifested in two dimensions: technical integration and system coordination. On the technical level, they integrate six core areas including locomotives and rolling stock, civil engineering, communication signals, and more. Each area comprises multiple layers of technical architecture: taking EMUs as an example, it covers 11 technical modules such as body structure, traction system, and braking control, involving over 20,000 precision components [2].

High-speed railways significantly enhance passenger efficiency through their high operating speeds, with capacity generally exceeding that of conventional railways by more than two times. Notable examples include: the annual bidirectional passenger capacity of China's Beijing-Shanghai High-Speed Railway reaching 160 million passengers; Japan's Shinkansen increasing its daily ridership by 125%; and South Korea's KTX system seeing a 67% increase in seats within a year. This leap in capacity is attributed to technical standards established by international conventions (such as the UIC's "High-Speed Rail Definition"), which unify core parameters like train performance and dispatch systems, systematically optimizing transport capacity and achieving economies of scale for networked high-speed rail operations.

China's high-speed railway traction power supply system, in providing power support for train operations, adopts a special technical solution based on its characteristics of high operation density, high speed, and stringent reliability requirements. This solution involves the use of overhead contact lines and traction substations. The traction substation converts the three-phase 220kV (330kV in Northwest China / 110kV in special areas) grid voltage through a traction transformer to $2 \times 27.5\text{kV}$ two-phase voltage. It then uses a fully parallel AT power supply method (self-coupled transformer connections to the contact line 27.5kV and positive feedline-27.5kV, with the neutral line grounded to the rail). On average, AT devices are installed every 10 to 15km along the overhead contact line at AT substations and sectional substations. Additionally, cross-connections are made to achieve parallel operation of similar lines in a double-track $2 \times 27.5\text{kV}$ power supply system.

Currently, China's high-speed rail uses a single-phase industrial frequency AC power supply with a rated voltage of 27.5kV and a frequency of 50 Hz, known as [3]. To achieve the speed targets for high-speed railways, sufficient energy must be available, making electric traction operation a critical component. Compared to conventional railways, high-speed railways require a larger power load, and the capacitive load is characterized by imbalance, fluctuation, and impact, necessitating different equipment and structural parameters. The traction power supply system for high-speed railways employs 27.5kV/50Hz AC, with a 220kV incoming line voltage and AT power supply methods to ensure stability and low energy consumption; the traction transformers use V/x connections to improve efficiency, and the overhead contact lines are made of magnesium-copper alloy to enhance durability; combined with GIS switchgear, comprehensive grounding systems, and joint-type phase-separated design,

these measures ensure safe and continuous power supply, supporting the efficient and reliable operation of high-speed railways.

High-speed railways, as high-energy-consuming modes of transportation, rely on traditional power grids for traction power supply and facility maintenance, leading to significant carbon emission pressures. Under China's "dual carbon" goals, the railway industry needs to shift towards clean energy to reduce carbon emissions. However, railway electrification is highly dependent on external power grids, especially in remote areas where issues such as unstable power supply and high maintenance costs are prevalent. Additionally, the extensive distribution of railways along the country presents a significant characteristic of dispersed energy demand, making it difficult for traditional centralized energy supply models to meet flexible energy usage needs. The dispersion and volatility of new energy sources further complicate the matching of energy supply and demand. Therefore, exploring the deep integration of new energy with railways is not only a key approach to alleviating contradictions in the energy structure but also an inevitable choice for achieving green and low-carbon transformation.

Currently, the application of new energy in the railway sector is dominated by photovoltaic power generation, covering scenarios such as rooftop photovoltaics at stations and self-powered systems for monitoring equipment along the line. For example, Shanghai Hongqiao Station generates 6.3 million kilowatt-hours annually, while Xiongan Station has completed a 6-megawatt distributed photovoltaic project. Non-electrified railway equipment like hydrogen fuel cell locomotives has entered the trial stage, but due to limitations in energy storage efficiency and insufficient supporting facilities, large-scale application remains challenging. Additionally, technologies that use solar energy and vibration energy to power low-power sensors along railway lines are gradually maturing, such as the photovoltaic monitoring system used on the Qinghai-Tibet Railway for early warning of issues. However, the proportion of new energy in traction power supply is still low, and large-scale wind and solar power grid integration faces challenges in frequency and voltage regulation. Moreover, technologies for collecting low-density energy sources like sound energy and braking energy are still in the experimental phase,

The integration of new energy sources in the future railway sector should focus on the "source-grid-load-storage" integration [4]. In the short term, the emphasis should be on developing small to medium-sized distributed photovoltaic systems to support self-powered needs for electrified equipment such as monitoring and snow melting along the route; in the long term, breakthroughs in key technologies like hydrogen locomotives and photovoltaic traction power supply are needed to promote collaboration between ultra-large photovoltaic bases and railway grids. Technically, it is necessary to enhance the durability of energy equipment in harsh environments such as high altitude and high humidity, develop DC drive equipment to reduce inverter losses, and optimize energy storage systems to address the volatility of new energy sources. Policy-wise, a cross-departmental collaboration mechanism needs to be established, with improved coordinated planning between the railway and energy sectors, and increased investment in demonstration projects. Ultimately, through the design of flexible energy systems, the self-sufficiency of railway energy can be achieved, providing a Chinese solution for global transportation decarbonization.

Conclusion

China's modern high-speed rail, as an outstanding achievement in the transportation sector, has achieved world-renowned results in technological innovation, transport efficiency, and service quality. The construction of its traction power supply system and extensive railway network embodies advanced engineering technology and scientific planning concepts. In the context of increasingly prominent energy issues, China's high-speed rail is closely linked to the energy sector, influenced by both energy supply and consumption structures, while also playing a positive role in energy conservation, smart grid development, and renewable energy integration. However, facing future opportunities and challenges, China's high-speed rail still needs to continuously innovate and optimize in energy utilization, enhance collaboration with the energy industry, and contribute more significantly to achieving sustainable transportation development and energy transition goals. By continuously improving the energy efficiency of high-speed rail, expanding the application scope of clean energy, and perfecting the energy supply guarantee system, China's high-speed rail is expected to continue leading and demonstrating in the process of promoting green economic and social development, becoming a model for collaborative development in global transportation and energy sectors.

References

1. China Statistical Yearbook 2023. – Beijing: China Statistics Press, 2023.
2. China Railway Electrification Engineering Standard. – Beijing: Railway Publishing House, 2020.
3. Outline of National Comprehensive Three-dimensional Transport Network Plan – Beijing: State Council, 2021.
4. Related research of China National Knowledge Network. – Beijing: Railway Publishing House, 2022.

УДК 621.31

ПИКОВО-РЕЗЕРВНЫЙ ЭНЕРГОИСТОЧНИК PEAK-RESERVE ENERGY SOURCE

Н.А. Попов

Научный руководитель – Климкович П.И., старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
power.st@bntu.by

N. Popov

Supervisor – P. Klimkovich, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: В данной статье рассматриваются основные функции пиково-резервных энергоисточников (ПРЭИ), их технологическая схема и основные защиты.

Abstract: This article discusses the main functions of peak-reserve energy sources (PRES), their technological scheme and basic protections.

Ключевые слова: газотурбинная установка, пиково-резервный энергоисточник, трёхфазный трансформатор, открытое распределительное устройство, компрессор, топливо, пункт подготовки газа.

Key words: gas turbine unit, peak-reserve power source, three-phase transformer, open switchgear, compressor, fuel, gas preparation point.

Введение

Сегодня обеспечение надежного энергоснабжения является ключевым фактором стабильной работы промышленных предприятий, медицинских учреждений, транспортных узлов и других объектов инфраструктуры. Несмотря на развитие современных энергосистем, аварийные ситуации, перегрузки сети и прочие факторы могут привести к временному прекращению производства, преобразования и распределения электроэнергии. Именно в таких ситуациях особую роль играют ПРЭИ, предназначенные для быстрого восстановления подачи электроэнергии в экстренных случаях. Таким образом эти установки обеспечивают бесперебойность питания важнейших потребителей, гарантируют стабильность работы энергосистемы. ПРЭИ представляет собой совокупность газотурбинных установок, оборудования, конструкций, устанавливаемых в зданиях и/или сооружениях используемых для производства электрической энергии. Газотурбинные установки (ГТУ) широко применяются в энергетике, авиации, нефтегазовой промышленности и отличаются высокой мощностью, компактностью и эффективностью работы.

Основная часть

Период времени, в течение которого происходит полный набор нагрузки с момента пуска ПРЭИ не превышает 15 минут с учетом времени на синхронизацию с энергосистемой.

ПРЭИ состоит из нескольких ГТУ и пункта подготовки газа (ППГ) (рис. 1).

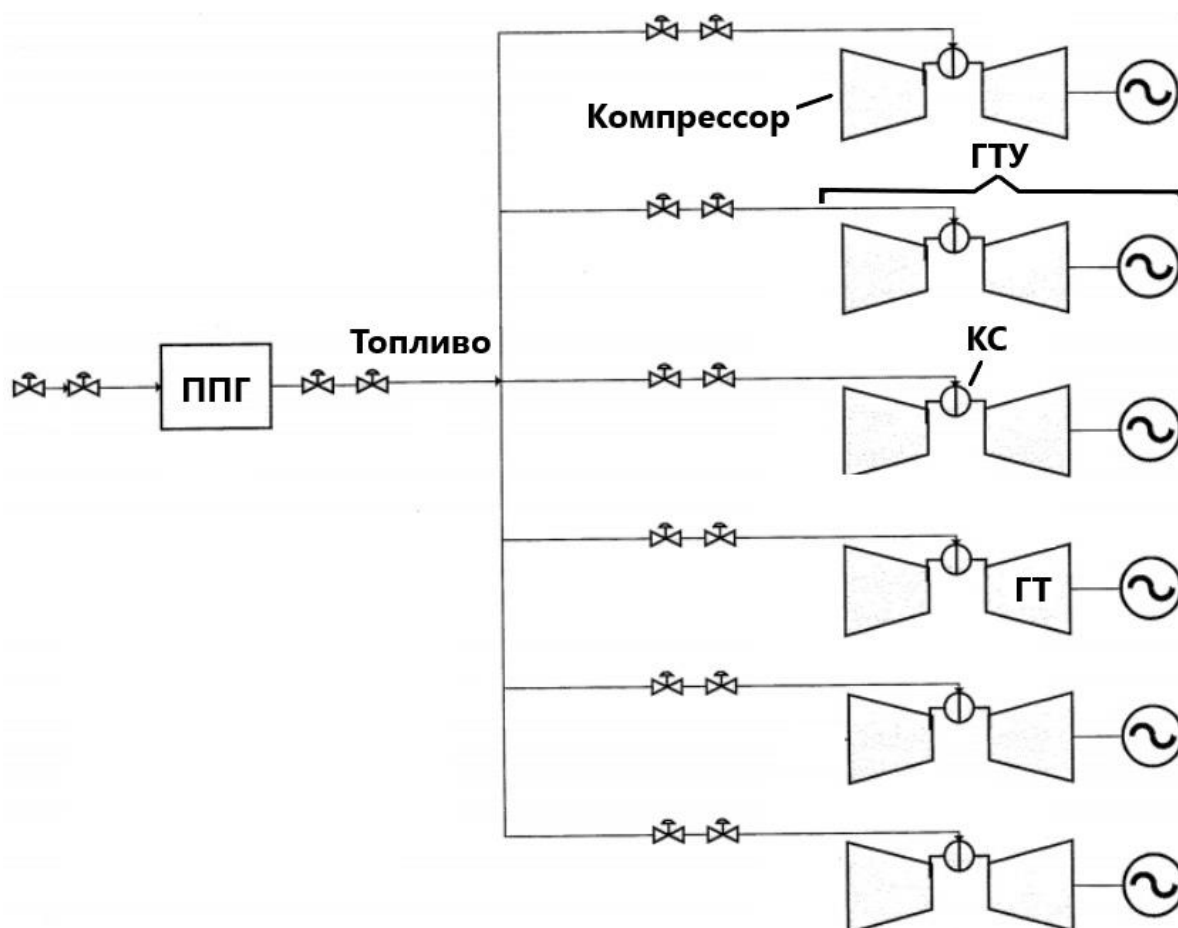


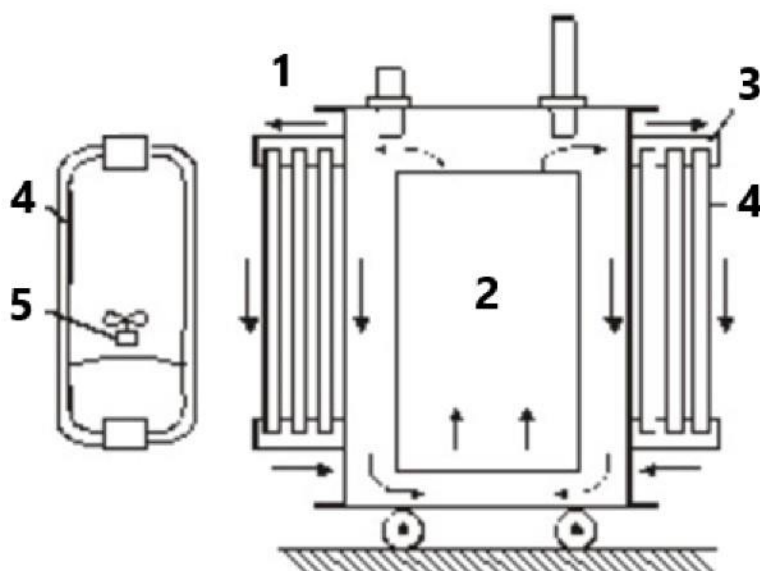
Рисунок 1 – Технологическая схема ПРЭИ

В газотурбинной установке компрессор сжимает воздух и направляет его в камеру сгорания. Туда же непрерывно подается жидкое или газообразное топливо от ППГ. Сгорание топлива создает горячий газ, который поступает в газовую турбину. Расширяясь в турбине, газ вращает ее лопатки. Турбина, в свою очередь, приводит в действие генератор, вырабатывающий электроэнергию. Отработанные газы выбрасываются в атмосферу.

В случае отсутствия внешнего электроснабжения пуск ГТУ осуществляется путем включения двух дизель-генераторных установок (ДГУ).

Электроснабжение потребителей ПРЭИ осуществляется от силового, масляного, трёхфазного трансформатора с системой охлаждения типа Д 1 [1]. Система охлаждения типа Д реализует масляное охлаждение с принудительным воздушным охлаждением и естественной циркуляцией масла через воздушные охладители (рисунок 2). В воздушных охладителях, смонтированных на радиаторных трубах, установлены вентиляторы, обеспечивающие принудительную конвекцию. Вентиляторы осуществляют забор воздуха снизу и обдув нагретой части радиаторных труб. Управление вентиляторами автоматизировано, осуществляется в зависимости от текущей нагрузки и температуры масла.

Связь выводов трансформатора и генераторного распределительного устройства (РУ) выполняется однофазными кабельными линиями с изоляцией из сшитого полиэтилена.



1 – бак; 2 – извлекаемая часть; 3 – коллектор;
4 – трубы радиаторов; 5 – электроventильаторы.
Рисунок 2 – Система охлаждения трансформатора Д

На открытом распределительном устройстве (ОРУ) устанавливаются элегазовые выключатели с пружинным приводом. Привод имеет включающую и отключающую пружины. Заход отключающей пружины производится во время включения выключателя, а заход включающей пружины – непосредственно после операции включения, электродвигателем, который питается переменным током.

На ОРУ в ячейке ГТУ ПРЭИ устанавливаются однополюсные разъединители пантографического типа, а также комплекты заземляющих ножей. Разъединители и заземляющие ножи оснащаются моторным приводом. Управление разъединителями и заземляющими ножами осуществляется с блоков управления, установленных на ОРУ. Управление разъединителями может осуществляться также с автоматизированного рабочего места системы контроля, защиты и управления (АРМ СКЗУ).

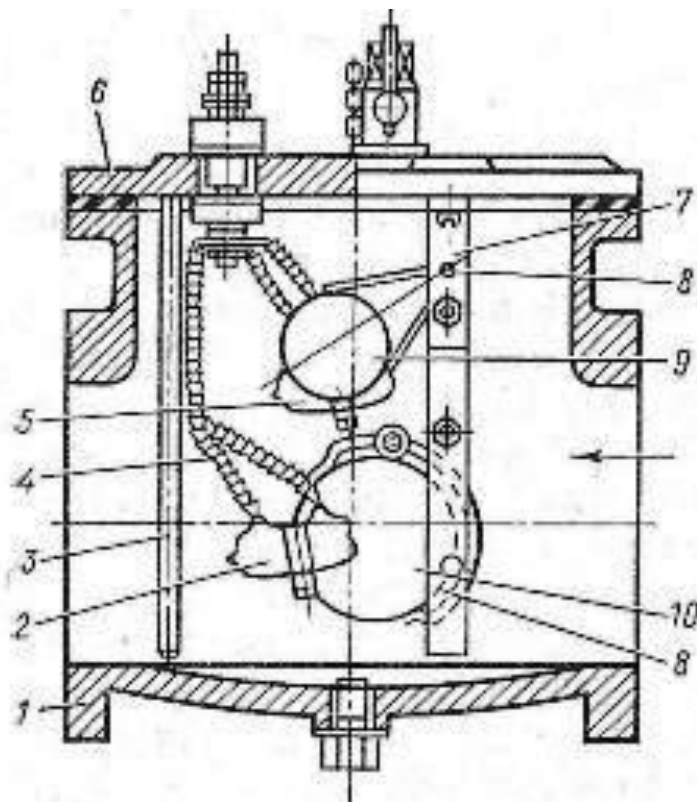
Для подключения устройств релейной защиты автоматики и измерений (РЗАИ) применяются измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Для защиты трансформатора используется широкий спектр устройств релейной защиты и автоматики (РЗА):

- дифференциальная защита;
- газовая защита;
- максимальная токовая защита;
- защита от замыканий на «землю» на ошиновке;
- защита от перевозбуждения;
- защита от перегрузки;
- защита от неполнофазного режима;
- автоматика охлаждения;
- автоматика и управление выключателей трансформатора;
- устройство резервирования при отказе выключателя (УРОВ).

Дифференциальная защита реагирует на все виды коротких замыканий (КЗ) и предназначена для защиты от внутренних повреждений трансформатора ГТУ ПРЭИ. Принцип действия дифференциальной защиты заключается в сравнении токов, входящих и выходящих из защищаемого объекта, по величине и по фазе. При внешнем КЗ ток втекающий в трансформатор, равен току, вытекающему из трансформатора к месту повреждения. Общая сумма токов практически равна нулю. В защите проходит небольшой ток небаланса, и защита не действует. При КЗ в зоне действия защиты по питающим присоединениям ток подтекает к месту повреждения, и в защите проходит сумма токов, под действием которой защита срабатывает.

С целью защиты от внутренних повреждений, трансформатор оснащается газовой защитой, основу которой составляет газовое реле поплавкового типа. Данное реле монтируется в маслопроводе, соединяющем бак трансформатора с расширителем, и осуществляет его защиту (рисунок 3) [2].



1 – корпус; 2 – контакты; 3 – стержень; 4 – изоляция выводов; 5 – контакты;
6 – крышка; 7 – рамка; 8 – ось; 9 – верхний поплавок; 10 – нижний поплавок.

Рисунок 3 – Газовое реле поплавкового типа

Принципом действия газовой защиты является регистрация признаков внутренних повреждений трансформатора, сопровождающихся газовыделением, перетоком масла из бака в расширитель или понижением уровня масла. Газовое реле реагирует даже на начальном периоде повреждения, на котором не может срабатывать никакая другая защита.

Защита от перевозбуждения предназначена для предотвращения повреждения трансформатора ГТУ ПРЭИ при появлении перевозбуждения. Перевозбуждение возникает при увеличении напряжения и понижении частоты, при этом увеличивается магнитная индукция. Появляющиеся при этом вихревые токи

приводят к нагреву металлических частей и повреждению изоляции. Защита реагирует на увеличение отношения напряжения к частоте на выводах трансформатора.

Заключение

ПРЭИ предназначены для быстрого восстановления подачи электроэнергии в экстренных случаях. Установки обеспечивают бесперебойность питания важнейших потребителей, гарантируют стабильность работы энергосистемы.

Литература

1. Energoboard. – URL: <https://energoboard.ru/information/408/> (дата обращения: 23.04.2025).
2. Школа для электрика. – URL: <https://electricalschool.info/main/elsnabg/885-gazovaja-zashhita-transformatorov.html> (дата обращения: 23.04.2025).

УДК 621.317.333

**СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
COMPARISON OF INSULATION TEST METHODS FOR ELECTRICAL
EQUIPMENT**

В.И. Глушич, Д.А. Власовец

Научный руководитель – Артёменко К.И., старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

artsiomenkakiryl@bntu.by

V. Hlushych, D. Vlasovets

Supervisor – K. Artsiomenka, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** Для обеспечения надежной работы электрооборудования необходима исправность его изоляции. С целью проверки и испытания её используют различные методы. В данной статье будут рассмотрены некоторые из них.*

***Abstract:** To ensure reliable operation of electrical equipment, its insulation must be in good condition. Various methods are used to check and test it. This article will discuss some of them.*

***Ключевые слова:** изоляция электрооборудования, методы испытания.*

***Keywords:** insulation of electrical equipment, testing methods.*

Введение

Испытание изоляции это один из важнейших этапов оценки состояния электрооборудования. Для обеспечения безопасности, надёжности и долговечности работы все дефекты должны быть устранены. Для качественной оценки состояния изоляции используют различные методы испытания, по результатам которых судят о исправности изоляции.

Основная часть

Различают несколько методов испытания состояния изоляции, каждый из которых применяется в зависимости от поставленной задачи, характеристик электрооборудования и условий его эксплуатации. Рассмотрим следующие методы: измерение сопротивления изоляции, испытание повышенным напряжением, метод измерения тока утечки, тангенса угла диэлектрических потерь.

1. Измерение сопротивления изоляции.

Любой изоляционный материал в электрооборудовании по существу является составляющей конденсатора [1]. Его обкладками с одной стороны служат токоведущие части, с другой наружные конструктивные элементы аппарата (к примеру корпус). Диэлектрической средой между его обкладками и выступает сама изоляция (бумага, слюда, волокно и т. д.). Параметры этой емкости зависят не только от используемых материалов, но и от состояния изоляции. Метод основан на измерении сопротивления изоляции между токоведущими частями и землёй или между фазами. Обычно для этих целей применяется мегаомметр. Основные преимущества и недостатки метода представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные преимущества и недостатки метода

Преимущества	Недостатки
Простота измерений	Невозможность определения характера дефектов
Высокая чувствительность к ухудшению состояния изоляции	Требование определенных знаний и сноровки при проведения измерений
Безопасность оборудования (при правильном выполнении не наносит вреда оборудованию)	Невозможность определить все типы повреждения такие как микротрещины
Быстрота выполнения измерений и оценки состояния изоляции	Зависимость результатов измерений от внешних факторов (температура, влажность, время поляризации)

2. Испытание повышенным напряжением.

К изоляции электрооборудования прикладывается повышенное напряжение, превышающее номинальное в 2-3 раза на непродолжительный промежуток времени. Различают испытание переменным и выпрямленным напряжением [2]. Метод позволяет определить электрическую прочность изоляции. Испытания проводятся как постоянным, так и переменным током. Основные преимущества и недостатки метода представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные преимущества и недостатки метода

Преимущества	Недостатки
Высокая чувствительность к дефектам	Риск пробоя изоляции
Безопасность при правильном измерении	Нечувствительность к микротрещинам и влажности изоляции
Универсальность	Требования к подготовке персонала

3. Метод измерения тока утечки.

Принцип метода заключается в том, что при приложении испытательного напряжения через изоляцию протекает ток утечки, который зависит от сопротивления изоляции. При наличии дефектов в изоляции таких как увлажнение, загрязнение и т.д. уменьшается её сопротивление, вследствие чего увеличивается ток утечки. Посредством измерения тока утечки оценивают состояние изоляции. Основные преимущества и недостатки метода представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные преимущества и недостатки метода

Преимущества	Недостатки
Можно использовать для ранней диагностики (позволяет определить ухудшение на ранней стадии)	Зависимость от внешних условий
Высокая точность метода	Не позволяет определить точный характер дефекта
Не разрушает изоляцию в ходе испытания	Невозможность выявить мгновенные пробой
Возможность постоянного мониторинга	Погрешность при старении материала

4. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan\delta$).

Угол диэлектрических потерь представляет собой отношение активной составляющей тока, проходящего через изоляцию при приложении к ней переменного напряжения к реактивной составляющей [1]. Чем выше этот угол, тем больше потерь энергии в изоляции, что свидетельствует о её старении или увлажнении. Основные преимущества и недостатки метода представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные преимущества и недостатки метода

Преимущества	Недостатки
Высокая чувствительность к увлажнённости изоляции	Высокая чувствительность к внешним факторам
Позволяет оценить общее состояние изоляции	Недостаточная чувствительность на ранних стадиях ухудшения состояния изоляции
Позволяет отследить динамику ухудшения	Не всегда указывает на конкретный дефект

5. Импульсные испытания.

Данный метод позволяет симитировать атмосферные и коммутационные перенапряжения. Суть заключается в приложении коротких высоковольтных импульсов. Основные преимущества и недостатки метода представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Основные преимущества и недостатки метода

Преимущества	Недостатки
Высокая точность	Сложность и высокая стоимость оборудования
Позволяет выявить дефекты на ранних стадиях	Риск повреждения исправной изоляции
Проверка стойкости изоляции к реальным условиям эксплуатации	Ограниченность применения (некоторое оборудование чувствительно к импульсным испытаниям)

Заключение

Каждый метод имеет свои недостатки и преимущества. Выбор того или иного метода зависит от множества факторов: напряжения, типа оборудования, условий эксплуатации и целей проверки. На ранних стадиях эксплуатации и при профилактическом обслуживании часто применяются методы измерения сопротивления изоляции и тока утечки. Для высоковольтных объектов более эффективен метод измерения тангенса угла диэлектрических потерь. Импульсные испытания и испытания повышенным напряжением чаще применяются на этапе заводских и приёмочных испытаний.

Наиболее полной диагностики можно достичь только при комплексном подходе, сочетающем несколько методов. Это позволяет достоверно выявить скрытые дефекты, оценить степень старения изоляции и предотвратить аварии в электроэнергетических системах.

Литература

1. Свойства и испытания электрической изоляции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electricalschool.info/>. – Дата доступа: 13.05.2025.
2. Методы испытаний изоляции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/>. – Дата доступа: 13.05.2025

УДК 621.311

**ПРОИЗВОДСТВО И ВЫДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ВЕТРЯНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ
PRODUCTION AND ELECTRICITY GENERATION AND OUTPUT
FROM WIND FARMS**

К. Д. Денисенков, А. М. Малайчук

Научный руководитель – В. А. Булат, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

bulat@bntu.by

K. Denisenkov, A. Malaichuk

Supervisor – V. Bulat, Associate Professor
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: исследование производства и выдачи электроэнергии на ветряных электрических станциях, виды используемых генераторов.

Abstract: study of the production and output of electricity from wind farms, the types of generators used.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, ветрогенератор, воздушные массы, ветропарк, ось вращения.

Keywords: wind power plant, wind turbine, wind generator, air masses, wind farm, axis of rotation.

Введение

В Республике Беларусь в настоящее время функционирует 109 ветроэнергетических установок (далее – ВЭУ), суммарная электрическая мощность которых достигает 114,9 МВт. Могилевская область занимает лидирующее положение в республике по количеству и установленной мощности ВЭУ, которые достигают 50%. Из 109 ветроэнергетических установок, расположенных в Беларуси, в Могилевской области находятся 57 установок мощностью 62,58 МВт. Также в Могилевском регионе ветроэнергетические установки преобладают и по количеству среди установок на возобновляемой энергии (далее – ВИЭ). Они занимают более 60% от общего числа установок ВИЭ.

В Дрибинском районе, деревне Пудовня располагается ветропарк из 9 ВЭУ. Общая установленная мощность которого достигает 9 МВт.

В Новогрудском районе возле деревни Большие Лезневичи находится второй по высоте ветряк в Республике Беларусь, построенный в 2017 году. Мощность ветряка достигает 3,3 МВт, а высота башни составляет 117 метров. Самый мощный ветряк расположен в Лиозненском районе. Он был построен в 2019, его мощность достигает 3,49 МВт, а высота башни – 100 метров.

В настоящее время в Могилевской области введена в эксплуатацию новая ветроэнергетическая установка (ВЭУ) вблизи деревни Асмоловичи в Мстиславском районе. Высота достигает 142 метра, мощность – 3,4 МВт, верхняя точка лопасти – 210 метров, а размах лопастей – 136 метров. Данная ветроэнергетиче-

ская установка является самой высокой не только в Беларуси, но и на всем пространстве СНГ. На расположение данной ветроэнергетической установки повлияли несколько факторов. Во-первых, в этом районе расположена зона активного движения воздушных масс. Большая часть всех ветряков в Республике Беларусь расположены именно в этой зоне. Во-вторых, выбрана холмистая местность для построения крупнейшей ветроэнергетической установки. При этом территория не пересекает пути миграции перелетных птиц.

В наши дни выработанная электроэнергия от новой ВЭУ поступает в единую энергетическую систему. Предприятия и жилые дома таких городов, как Кричев, Климовичи и Мстиславль, являются основными потребителями электроэнергии от новой ВЭУ.

Основная часть

Ветрогенераторы можно классифицировать на две группы: с вертикальной и горизонтальной осью вращения.

Современные ветрогенераторы с горизонтальной осью вращения могут иметь две или три лопасти, однако встречаются экземпляры и с большим количеством лопастей. Лопасти располагаются не в центре тяжести турбины, а сбоку, что позволяет значительно повысить устойчивость к нагрузкам. Также лопасти ветрогенератора с горизонтальной осью вращения оснащены молниезащитой. При попадании молнии, молниезащита преобразует ее энергию в ступицы. Угол лопасти можно изменять дистанционно, он, в свою очередь, изменяется при помощи поворотных подшипников, а устройство дистанционной регулировки встроено в турбину.

Не менее важной проблемой является устойчивость лопастей к нагрузкам. Лопасти в современных ветрогенераторах с горизонтальной осью вращения могут достигать размаха в 100 метров и более, а конструкция таких лопастей должна быть наиболее тонкая и гибкая. В связи с этим, большое влияние на них оказывает аэродинамическая нагрузка, что может привести к деформации лопастей. Однако еще в 1986 году Либстон предложил сместить оси лопастей в плоскости ротора, что позволило сместить аэродинамический центр поперечного сечения лопасти с центром двигателя. Также было установлено, что лопасти с обратной стреловидностью меньше изгибаются под воздействием боковой нагрузки.

Конструкция ветрогенераторов с горизонтальной осью вращения имеет несколько характерных физических особенностей. Ротор ветряка с горизонтальной осью вращения, состоящий из двух или трех длинных лопастей, соединены с горизонтальным валом. Лопасти не имеют плоскую форму, а наоборот имеют аэродинамическую форму для лучшего восприятия подъемной силы ветра. Подъемная сила образует вращающий момент, вызывающий вращение.

Еще одним компонентом генератора является мотогондола, соединенная с ротором. Она содержит в себе рабочие компоненты, обеспечивающие работу электрогенератора ветряной турбины. К таким компонентам относят: редуктор, генератор, тормоз и контроллер. Ротор ветрогенератора, как правило, вращается с меньшей скоростью. Редуктор, расположенный между ротором и генератором,

преобразует не высокочастотное вращение лопастей во вращение с более высокой частотой, которое более эффективно для привода электрогенератора (в среднем, если ротор вращается со скоростью 20 оборотов в минуту, то генератору для выработки электроэнергии требуется 1000 оборотов в минуту).

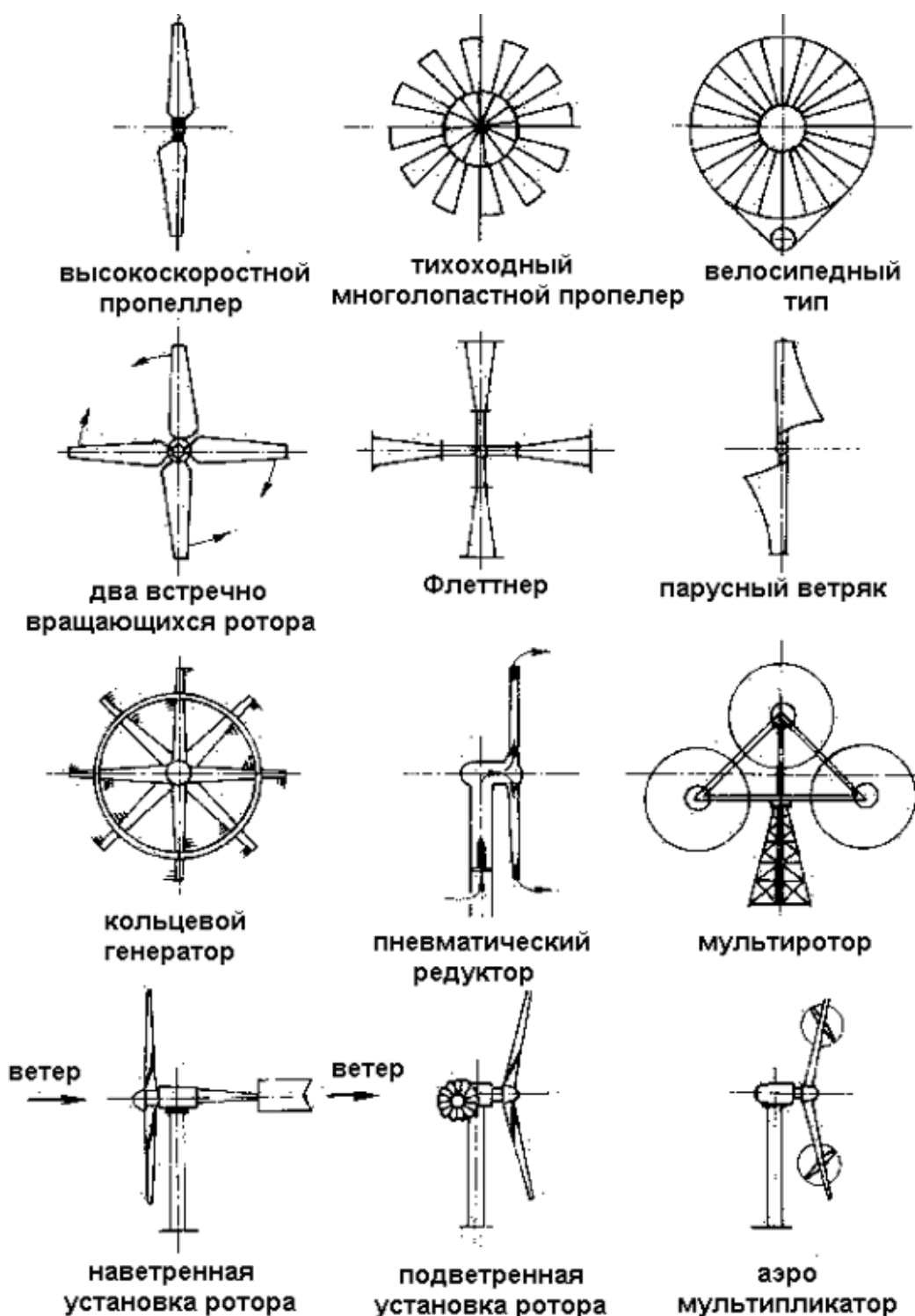


Рисунок 1 – Конструктивно-кинематическая схема лопастной системы ветрогенератора с горизонтальной осью вращения

У ветрогенераторов с вертикальной осью вращения конструкция несколько проще, чем у генераторов с горизонтальной осью вращения благодаря тому, что

у первых нет узлов ориентации на потоки ветра. В ветрогенераторах с вертикальной осью вращения могут применяться специальные устройства для поднятия рабочих лопастей и создания сопротивления. Это, в свою очередь, образует вращающий момент. В установках для данных устройств могут применяться турбинные элементы. Роторы Савониуса также могут использоваться, однако предпочтение отдается ротору Дарье, который способен достигать значительно большую быстроходность и большую мощность, нежели ротор Савониуса. Ротор Дарье имеет один значительный недостаток: малый начальный момент. Для устранения этого недостатка применяются различные соединения ротора Дарье со статорами различных типов.

Сооружение ветроэнергетических установок требуют не только большого денежного вклада, но и больших усилий на этапе строительства. Одним из самых сложных этапов является установка лопастей на ветрогенератор. Из-за сложности их установки был создан целый последовательный алгоритм. Сперва готовят опорный столб и проверяют его на надежность и антикоррозионные свойства, предусматривают особое боковое крепление для безопасной и долговременной фиксации лопастей. Следующим шагом устанавливают опорную трубу турбины. Турбину вставляют в эту трубу и крепят несколькими болтами через отверстия. Опору ветрогенератора защищают от коррозии с помощью холодного цинка, что позволяет намного увеличить срок службы опоры. Следующим этапом является подвод силового кабеля через крышку, и запуск электромагнитного тормоза. Он важен для безопасности и общего обслуживания ветрогенераторной установки на открытом воздухе. После этих этапов собирают лопасти под углом 90 градусов по отношению к плоскости вращения генератора, устанавливают турбины на опорный столб, и установка вводится в эксплуатацию.

Заключение

В данной работе показано, что в данное время в Беларуси идет активный рост количества ветроэнергетических установок. Лидирующее место занимает Могилевский регион, именно в нем располагается порядка 50% ветроэнергетических установок всей страны. Место строительства ветроэнергетических установок было выбрано не случайным образом. В представленных окрестностях должна быть расположена зона активного движения воздушных масс. Лучше всего для возведения крупной ветроэнергетической установки выбрать холмистую местность, для еще более активного движения воздушных масс.

Литература

1. Департамент по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации РБ: [сайт]. - URL: <https://energoeffect.gov.by> (дата обращения: 28.04.2025).
2. Бокарева А. Н. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРНЫХ СТАНЦИЙ // Вестник науки. – 2019. – Т. 4. – №. 9 (18). – С. 93-99.
3. Experimental analysis of a horizontal-axis wind turbine with swept blades using PIV data: [сайт]. - URL: <https://wes.copernicus.org/articles/9/1617/2024/wes-9-1617-2024.pdf> (дата обращения: 14.05.2025).
4. Horizontal Axis Wind Turbines: [сайт]. - URL: <https://www.windustry.com/horizontal-axis-vs-vertical-axis> (дата обращения: 14.05.2025).

УДК 621.317.333

НОВЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ
NEW TECHNICAL SOLUTIONS IN AUTOMATIC EXCITATION CONTROL SYSTEMS

К.И. Курилович, Д.С. Антонович

Научный руководитель – Артёменко Е.А., ассистент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

power.st@bntu.by

K. Kurilovich, D. Antonovich

Supervisor – A. Artsiomenka, Assistant
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: для обеспечения надежной работы электрических сетей необходимо использование систем автоматического регулирования возбуждения синхронных машин. Системы автоматического регулирования возбуждения постоянно нуждаются в новых технических решениях, поэтому в данной статье рассмотрены новые технические решения в системах автоматического регулирования возбуждения.

Abstract: to ensure reliable operation of electrical networks, it is necessary to use automatic excitation control systems for synchronous machines. Automatic excitation control systems are constantly in need of new technical solutions therefore this article discusses new technical solutions in automatic excitation control systems.

Ключевые слова: новые технологии, системы автоматического регулирования возбуждения, электрические системы и сети, искусственный интеллект, электроника.

Keywords: new technologies, automatic excitation control systems, electrical systems and networks, artificial intelligence, electronics.

Введение

Системы автоматического регулирования возбуждения (АРВ) предназначены для регулирования тока возбуждения в синхронных машинах. Данные системы являются одним из важных элементов на электрических станциях, так как благодаря основным свойствам АРВ станция может работать безопасно и эффективно. Отсюда вытекает потребность совершенствовать и модернизировать системы АРВ.

Основная часть

Чаще на электрических станциях используют системы АРВ, в основе которых лежат аналоговые регуляторы, что накладывает ряд ограничений на работу самой системы. Основными ограничениями являются: трудности при диагностике системы; жесткие настройки, которые не адаптируются к изменениям режима в сети; низкая скорость работы при переходных процессах.

Современные требования к надежности систем АРВ включают в себя повышенную точность удержания напряжения на заданном уровне, а также интеграцию с цифровыми подстанциями и современными системами Smart Grid. Для

осуществления этой интеграции необходимо заменять системы, в основе которых лежат аналоговые регуляторы, на современные цифровые аппараты, в основе которых лежат микропроцессоры, что позволяет воссоздавать сложные алгоритмы, как ПИД, а также осуществление модального управления. На рис.1 изображена схема ПИД-регулятора.

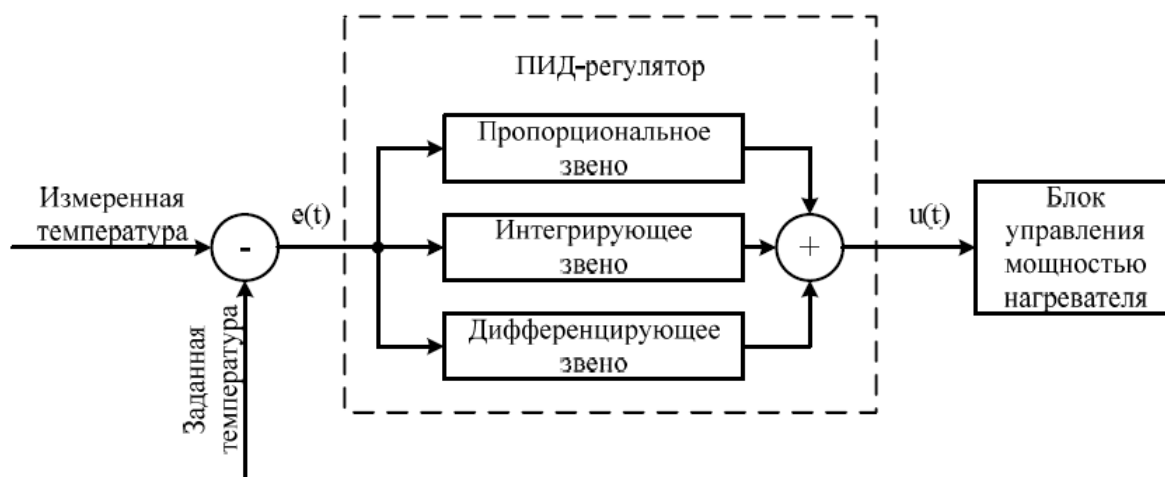


Рисунок 1 – Схема ПИД-регулятора

Общий подход к синтезу управляющих воздействий методом модального управления изображен на рисунке 2. Стоит понимать, что в случае модального регулирования играет большую роль сам модальный регулятор, которые осуществляет регулирование координат электропривода самостоятельно. Модальный регулятор – устройство, которое имеет характеристики суммирующего усилителя. На вход данного регулятора подается обратная связь с определенными коэффициентами по всем координатам электропривода.

Микропроцессорные регуляторы адаптируют параметры во время работы системы, а также регуляторы можно настраивать на самодиагностику и на прогнозирование состояния работы электрооборудования.

Также внедрение искусственного интеллекта существенно увеличивает производительность систем регулирования возбуждения. Алгоритмы нейросетей имеют свойство прогнозировать протекание аварийных режимов в системе, что уменьшает риск возникновения данных аварий в сети в будущем. Данные алгоритмы могут позволить оптимизировать коэффициенты регулятора исходя из режима работы системы. Также для регулирования параметров в условиях неопределенности, учитывая определенных ранее прогнозов, можно использовать нечеткую логику (Fuzzy Logic). Все перечисленное является элементами искусственного интеллекта и, согласно исследованиям, ИИ-регуляторы существенно снижают время реакции на 20-30% в сравнении с привычными ПИД-регуляторами.

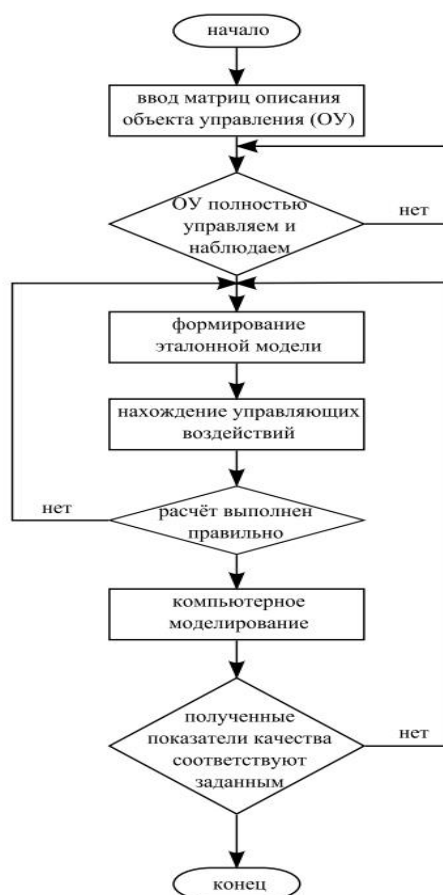


Рисунок 2 – Общий подход к синтезу управляющих воздействий методом модального управления

Существенно повысить качество регулирования и быстродействие регуляторов позволяет внедрение современной электроники в системы АРВ. Одним из способов осуществить данные цели является замена машинных возбудителей на тиристорные, что способствует снижению потерь механической энергии, а в случае этого повышается КПД регулятора. Также для быстрого регулирования тока возбуждения могут использоваться IGBT-инверторы, которые изображены на рисунке 3.

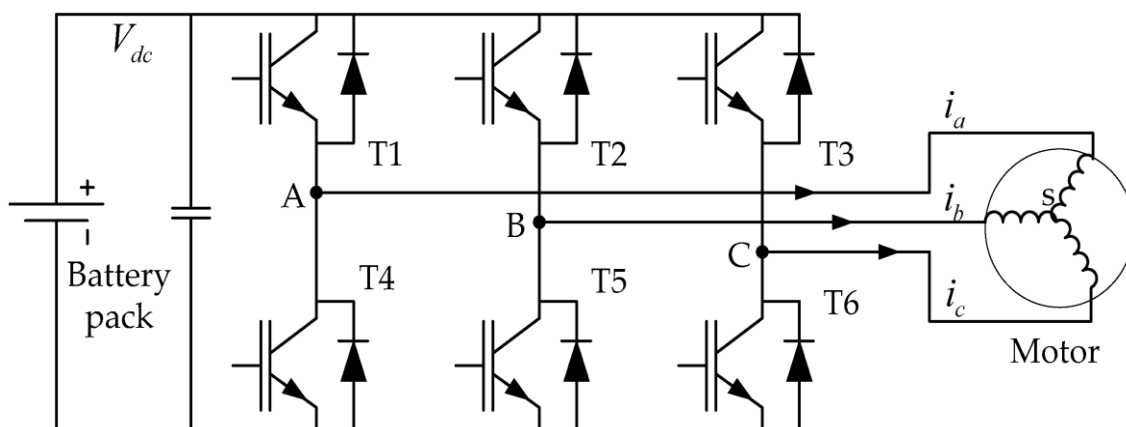


Рисунок 3 – IGBT-инвертор

Использование активных выпрямителей напряжения в системах АРВ позволяет существенно снизить влияние высших гармоник в сети. На рисунке 4 изображен активный выпрямитель.

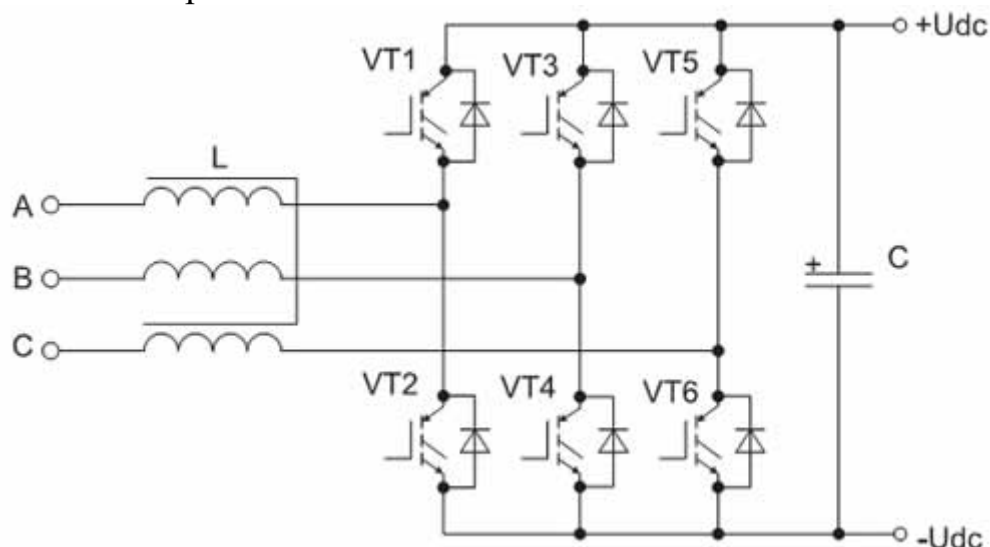


Рисунок 4 – Активный выпрямитель напряжения

Заключение

Появление цифровых систем АРВ увеличивает пропускную способность ЛЭП, что увеличивает качество передачи электроэнергии, а внедрение адаптивных алгоритмов увеличивает стабильность работы оборудования при изменении нагрузки. Внедряемые новые технологии в системы АРВ увеличивают качество регулирования возбуждения, что приводит к повышению устойчивости энергосистем.

Литература

1. Кудрин Б. И. Автоматическое регулирование возбуждения: Учебник для техникумов. – 3-е изд., доп. – М.: Энергоатомиздат, 2018. – 238 с.: ил.
2. Современные направления развития систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов электростанций [Информационный ресурс] / Режим доступа: <http://sovremennye-napravleniya-razvitiya-sistem-avtomaticheskogo-regulirovaniya-vozbuzhdeniya-sinhronnyh-generatorov-elektrostantsiy>. Дата доступа: 20.04.2025/

УДК 621.311

РЕЗИСТИВНО ЗАЗЕМЛЁННАЯ НЕЙТРАЛЬ В ВОЗДУШНЫХ И КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ
RESISTIVELY GROUNDED NEUTRAL IN OVERHEAD AND CABLE NETWORKS

М.В. Уласевич, А.С. Мисуно

Научный руководитель – А.Г. Губанович, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

power.st@bntu.by

M. Ylasevich, A. Misuno

Supervisor – A. Gubanovich, Associate Professor

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: Метод резистивного заземления подтверждён мировым опытом как надёжное решение для современных сетей среднего напряжения, подверженных однофазным замыканиям на землю (ОЗЗ). Низкоомное заземление обеспечивает быстрое отключение повреждённых участков, снижение перенапряжений и высокую электробезопасность. Высокоомное заземление допускает длительную работу сети с ОЗЗ, подавляет феррорезонансные процессы и способно гасить дугу самостоятельно.

Abstract: The resistive grounding method has been confirmed by international experience as a reliable solution for modern medium-voltage networks subject to single-phase earth faults. Low-resistance grounding ensures quick disconnection of damaged areas, reduced overvoltage and high electrical safety. High-resistance grounding allows long-term operation of the network with an single-phase earth faults, suppresses ferroresonance processes and is able to extinguish the arc independently.

Ключевые слова: однофазное замыкание на землю, резистивное заземление нейтрали, низкоомное заземление, высокоомное заземление, релейная защита, феррорезонансные процессы.

Keywords: single-phase earth fault, resistive neutral grounding, low-resistance grounding, high-resistance grounding, relay protection, ferroresonance processes.

Введение

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) представляют собой наиболее распространённый тип аварий в распределительных сетях среднего напряжения (6–35 кВ). Возникновение ОЗЗ сопровождается дуговыми перенапряжениями, которые могут достигать 6–8 кратных значений от номинального напряжения. По статистике, на их долю приходится до 80% всех аварийных отключений. Такие повреждения сопровождаются появлением опасных перенапряжений, феррорезонансных процессов, а также могут вызывать пробой изоляции электрических машин. Отсутствие своевременного устранения ОЗЗ значительно увеличивает риск пожаров и повреждений электрооборудования. Это ведёт к большим финансовым потерям. В условиях постоянного роста энергопотребления и увеличения в сетях доли кабельных линий с высокими ёмкостными токами проблема эффек-

тивной защиты от ОЗЗ становится ещё более актуальной. Анализ эксплуатационных данных показывает, что в сетях с низкоомным заземлением нейтрали, регулярность перехода однофазного замыкания на землю в междуфазные короткие замыкания снижается порядка на 60-70% в сравнении с традиционными системами с изолированной нейтралью.

Одним из эффективных методов повышения надёжности работы электрических сетей и защиты от ОЗЗ является резистивное заземление нейтрали. Целью данной работы является анализ режимов резистивного заземления, их особенностей, преимуществ и недостатков, а также рассмотрение возможных схем реализации в воздушных сетях 6–35 кВ.

Основная часть

При ОЗЗ в сети с резистивным заземлением нейтрали через все присоединения проходят собственные ёмкостные токи, а в повреждённой линии – дополнительный активный ток, создаваемый резистором. Это позволяет эффективно решать такие задачи как:

- селективно определить повреждённый участок сети и сразу принять меры по устранению повреждения;
- существенно снизить уровень дуговых перенапряжений и исключить феррорезонансные явления.

Эксплуатация резистивного заземления нейтрали сети позволяет снизить уровень перенапряжений и создаёт предпосылки для построения и точной настройки релейной защиты от ОЗЗ. Резистивное заземление нейтрали положительно влияет на надёжность оборудования и повышает также безопасность для людей и животных, которые могут оказаться в зоне падения провода воздушной ЛЭП.

В зависимости от величины сопротивления резистора, времени его работы различают два режима: низкоомное и высокоомное заземления.

Низкоомное заземление характеризуется ограниченным временем действия резистора. Сопротивление выбирается таким образом, чтобы обеспечить достаточный ток для срабатывания релейной защиты и для селективного отключения поврежденного элемента сети.

К достоинствам низкоомного резистивного заземления следует отнести следующие факторы:

- обеспечивает быстрое и избирательное отключение дефектного элемента, что уменьшает зону воздействия повреждения;
- благодаря высокой скорости срабатывания предотвращает переход из однофазного замыкания(ОЗЗ) в сложные виды КЗ, такие как двойное кз на землю или междуфазное короткое замыкание;
- сокращается продолжительность воздействия повышенного напряжения на изоляцию неповреждённых фаз, что существенно снижает риск её пробоя и продлевает срок эксплуатации оборудования;
- резистивное заземление минимизирует возникновение дуговых перенапряжений, повышая общую устойчивость сети к аварийным режимам, что существенно увеличивает надёжность защиты.

Однако, также выделяются такие недостатки как:

- требуются дополнительные инвестиции в монтаж и обслуживание резистивного заземления нейтрали, это увеличивает расходы;
- сеть не может длительно функционировать в режиме ОЗЗ тока КЗ в некоторых случаях может привести к более масштабным повреждениям оборудования;
- повышается количество срабатываний защитных устройств, что усиливает нагрузку на коммутационные аппараты и может влиять на бесперебойность электроснабжения.

При высокоомном заземлении резистор может оставаться включённым длительное время, пока не будет устранено повреждение. В таком режиме резистор эксплуатируется до тех пор, пока обслуживающий персонал не выявит поврежденный элемент или соберет временную схему электроснабжения потребителей.

При правильном выборе сопротивления заземляющего резистора эффект накопления зарядов на фазах сети при дуговом перемежающемся ОЗЗ сводится к минимуму, и перенапряжения на неповрежденных фазах при повторных зажиганияах дуги не превышают значений $(2,4 - 2,5) U_{\text{фном}}$.

К преимуществам высокоомного заземления нейтрали относятся:

- данная система эффективно подавляет нежелательные резонансные явления, тем самым повышая стабильность работы электрической системы;
- при малых значениях тока ОЗЗ в зоне повреждения обеспечивается самогашение электрической дуги, что способствует самостоятельной ликвидации части замыканий;
- практически полностью исключается возникновение нестабильных дуговых ОЗЗ, снижая вероятность повторных аварийных ситуаций;
- уменьшение амплитуды перенапряжений позволяет реализовать селективное отключение повреждённого участка без значительных колебаний параметров сети.

К недостаткам относятся:

- требуется установка резистивного заземления нейтрали, что увеличивает капитальные и эксплуатационные расходы;
- усиление тока в месте повреждения может спровоцировать прерывистые дуговые ОЗЗ, усложняющие локализацию аварии;
- в переходных режимах неповрежденных фаз возникают кратковременные перенапряжения, которые могут достигать 2,5 номинального фазного напряжения;
- превышение напряжения увеличивают риск вторичных пробоев в элементах с повреждённой изоляцией;
- существуют технические ограничения по допустимой суммарной емкостной составляющей тока, что затрудняет масштабирование системы.

Комбинированное заземление включает высокоомный резистор присоединённый параллельно дутогасящему реактору. Такой подход позволяет минимизировать ошибки, возникающие при настройке реактора и значительно повышает эффективность защитных устройств.

На практике для сетей среднего напряжения с резервированием рекомендуется применение низкоомного заземления. Оно обеспечивает:

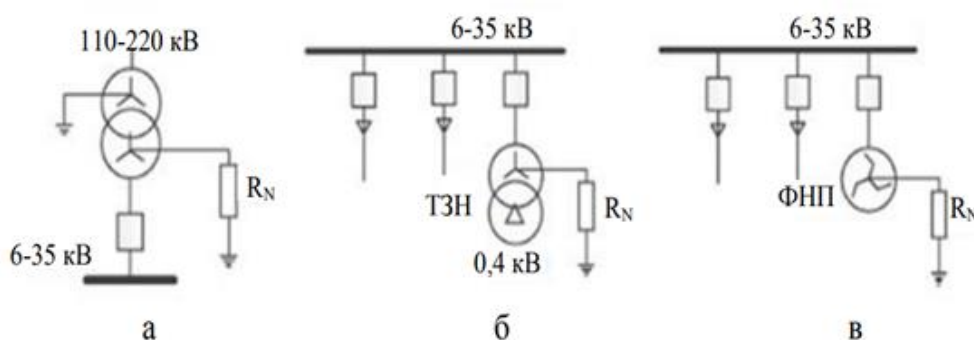
- ограничение перенапряжений;
- высокую электробезопасность;
- устойчивую работу релейной защиты.

Высокоомное заземление в таких условиях может привести к росту токов ОЗЗ на 40% и, при длительной работе резистора, к снижению электробезопасности по сравнению с изолированной нейтралью.

Если рассматривать возможность заземления нейтрали в смешанной сети, то предпочтение можно отдать также низкоомному заземлению нейтрали.

В современных электрических сетях применяются три основные схемы подключения резисторов:

1. В нейтраль силового трансформатора 220 (110)/10 кВ (рис. 1, а);
2. Через нейтраль специального трансформатора заземления нейтрали (ТЗН) (рис. 1, б);
3. Через фильтр нулевой последовательности (ФНП) с zigzag-образной схемой (рис. 1, в).



а – нейтрали обмотки силового трансформатора; б – ТЗН; в – ФНП со схемой «zigzag»

Рисунок 1 – Схемы подключения резистора в сети 10 кВ

Схема нейтрали обмотки силового трансформатора (рис. 1, а) – наиболее простой вариант, однако при этом имеет недостаток: при отключении питающего трансформатора теряется резистивное заземление секции шин. Этот недостаток отсутствует у схемы (рис. 1, б, в);

В схеме присоединения через нейтраль ТЗН (рис. 1, б) исключается воздействие переходных процессов, возникающих при несимметричном КЗ в сети 110 кВ на 10 кВ. Сравнение подключения схем резисторов выявило, что гибридные системы с комбинацией ТЗН и адаптивным управлением сопротивлением повышают селективность защиты примерно на 25-30%.

Схема (рис. 1, в) аналогична варианту с ТЗН, обладает высокой стабильностью и надёжностью. Интеграция резисторов через фильтр нулевой последовательности показывает повышенную устойчивость к переходным процессам, что особенно актуально для сетей с распределённой генерацией.

Сравнительный анализ показывает, что схемы с использованием ТЗН или ФНП позволяют снизить перенапряжения до $3,6 U_{\phi}$, что на 22% ниже, чем в схеме с силовым трансформатором.

Заключение

Резистивное заземление нейтрали представляет собой эффективное техническое решение для повышения надёжности и электробезопасности сетей 6–35 кВ. Наиболее целесообразным в условиях распределительных воздушных сетей является применение низкоомного заземления особенно для кабельных сетей. Несмотря на дополнительные затраты на оборудование и монтаж, данный подход обеспечивает высокую эффективность работы релейной защиты и способно значительно снизить риски аварий, повреждений оборудования, токоведущих и повысить безопасность персонала. Высокоомное заземление, хоть и позволяет сохранить работоспособность сети при ОЗЗ, однако при этом сопровождается рисками роста токов повреждений и перенапряжений, что обуславливает его применение для воздушных сетей. Если сравнивать схемы подключения резисторов, то варианты с ТЗН и ФНП обеспечивают повышенную стабильность, что делает их более предпочтительными в использовании. Резистивное заземление является общепринятой и надёжной практикой в системах электроснабжения.

Литература

1. Лазаревич, И. А. Особенности работы РЗА в сетях с резистивно заземленной нейтралью / И. А. Лазаревич ; науч. рук. Е. А. Дерюгина // Актуальные проблемы энергетики 2018 [Электронный ресурс] : материалы студенческой научно-технической конференции / сост.: И. Н. Прокопеня, Т. А. Петровская. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 435-436. (дата обращения: 30.04.2025).
2. Лоскутов А.А., Кузина О.В. Анализ применения резистивного заземления нейтрали в распределительных электрических сетях на основе имитационного моделирования. – Нижний Новгород: НГТУ, 2019. – 61 с.
3. Охременко, А. Ю. Резистивное заземление нейтрали воздушной электрической сети напряжением 10-35 кВ / А. Ю. Охременко // Наука - образованию, производству, экономике : материалы Третьей международной научно-технической конференции : в 2 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск : БНТУ, 2006. – Т. 1. – С. 13-15.
4. Евдокунин Г. А., Гудилин С. В., Корепанов А. А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6 – 10 кВ // Электричество, 1998.

УДК 621.316.9

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ DIFFERENTIAL PROTECTION OF TRANSFORMERS

И.С. Ясковец, Д.С. Чурко

Научный руководитель – В.Ю. Румянцев, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

power.st@bntu.by

I. Yaskovets, D. Churko

Supervisor – V. Rumyantsev, Associate Professor

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: В статье рассматриваются схемы дифференциальной защиты трансформаторов и их принцип работы. Особое внимания уделяется реле.

Abstract: The article examines the differential protection schemes of transformers and their operating principle. Particular attention is paid to the relay.

Ключевые слова: трансформатор, дифференциальная защита, реле.

Keywords: transformer, differential protection, relay.

Введение

Дифференциальная защита играет очень важную роль в реализации защиты трансформатора. На них устанавливают продольные дифференциальные защиты, которые сравнивают токи в фазах в начале и в конце объекта защиты. Так некоторые защиты могут фиксировать повреждения за 30-50 мс. Однако, трансформаторы подвержены различным неисправностям, которые могут привести к серьезным авариям, поэтому обеспечение надежной защиты трансформаторов является очень важной задачей в области электроэнергетики.

Основная часть

Реле используется в дифференциальных защитах не только для контроля за электрооборудованием, но и для его защиты. Рассмотрим реле типа РНТ. Его основными элементами является промежуточный трансформатор (НТТ) и исполнительный орган. Схема реле типа РНТ изображена на рисунке 1.

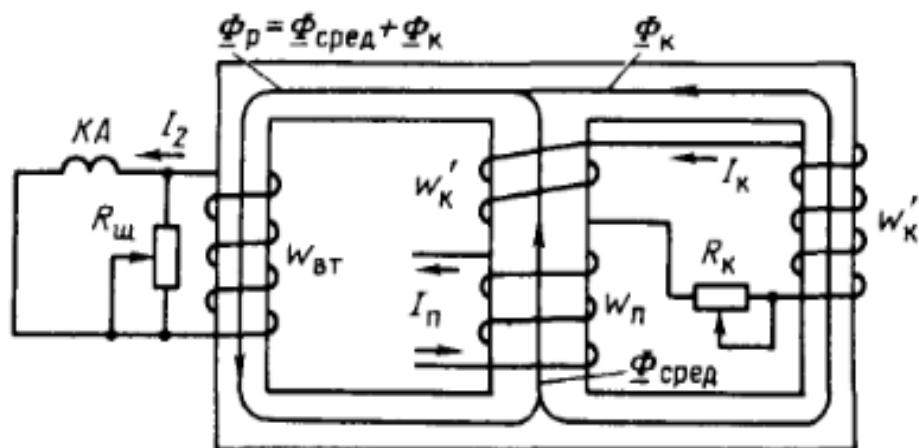


Рисунок 1 – Схема выполнения реле РНТ

В трансформаторе на левом стержне расположена вторичная обмотка, к которой подключено исполнительное реле. На среднем и правом стержне располагаются две секции короткозамкнутых обмоток. Они в свою очередь используются не только для защиты от бросков намагничивающих токов, но и токов небаланса в переходном режиме.

При возникновении повреждения в контролируемой зоне ток в первичной обмотке I_1 мгновенно переходит в синусоидальный. После этого происходит быстрая трансформация тока из первичной обмотки w_1 во вторичную $w_{в2}$. В свою очередь магнитные потоки среднего и правого стержней суммируются и образуют поток в левом стержне. При всем этом ток I_2 возрастает до того момента, пока не превысит ток срабатывания данного реле.

При значительных повреждениях ток в первичной обмотке становится синусоидальным, а магнитные потоки среднего и правого стержней складываются. Их сумма формирует поток в левом стержне. На рисунке 2 представлены графики, отражающие коэффициент смещения при синусоидальном и несинусоидальном токах.

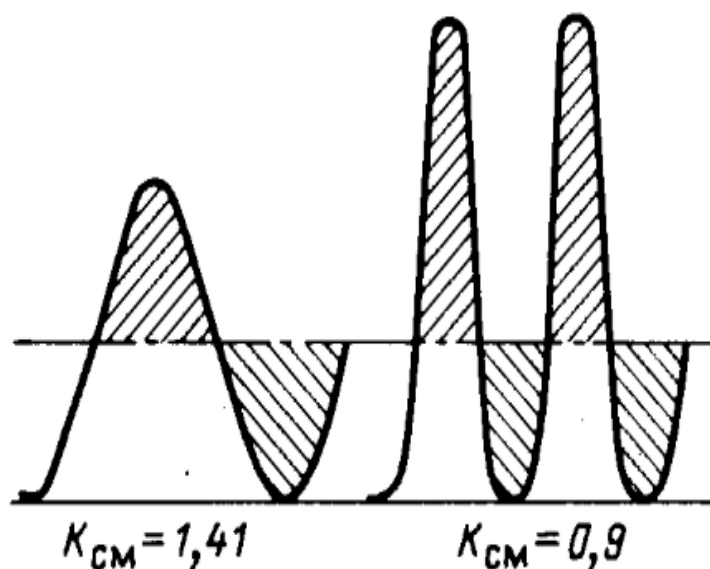


Рисунок 2 – Кривые смещения

В среднем стержне апериодическая составляющая генерирует первичный ток, формируя непериодический магнитный поток. Данный поток распределяется между левым и правым стержнями, что приводит к снижению эффективности преобразования энергии в трансформаторе. Наличие апериодических потоков в центральном и левом стержнях негативно влияет на передачу переменного тока. Экспериментально установлено, что увеличение числа витков в короткозамкнутой обмотке или снижение её сопротивления усиливает эффект двойной трансформации, что повышает воздействие апериодических токов на срабатывание релейной защиты. Интересно, что регулирование активного сопротивления в цепи короткозамкнутой обмотки (без изменения числа витков) позволяет управлять степенью двойной трансформации.

Для повышения эффективности и чувствительности дифференциальных систем применяются реле с тормозным эффектом, такие как ДЗТ. В отличие от

классических реле типа РНТ, устройства ДЗТ оснащаются дополнительными тормозными катушками. Ключевым условием нулевого тока короткого замыкания во вторичной обмотке является не только корректное подключение уравнительных и рабочих обмоток, но и точный расчёт витков для компенсации дисбаланса вторичных токов. На рисунке 3 рассмотрена схема с одной тормозной обмоткой типа ДЗТ-11.

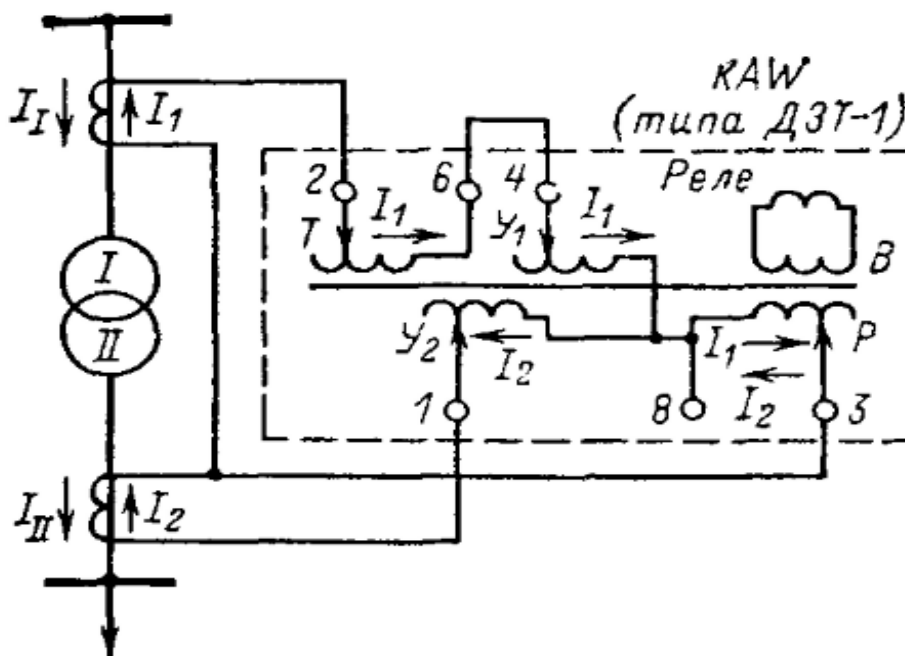


Рисунок 3 – Принципиальная схема дифференциальной защиты с реле ДЗТ-11

Тормозная обмотка, через которую проходит сквозной ток, создаёт магнитное намагничивание сердечника, что приводит к увеличению тока срабатывания реле. В конструкции трансформатора вторичная обмотка размещается на левом стержне с подключённым исполнительным реле, тогда как средний и правый стержни содержат секции короткозамкнутых обмоток, выполняющих двойную функцию: защиту от бросков намагничивания и переходных небалансных токов. Графическая зависимость, которая изображена на рисунке 4, демонстрирует прямую зависимость между ростом сквозного тока и порогом срабатывания реле, что обеспечивает эффективное подавление токов небаланса.

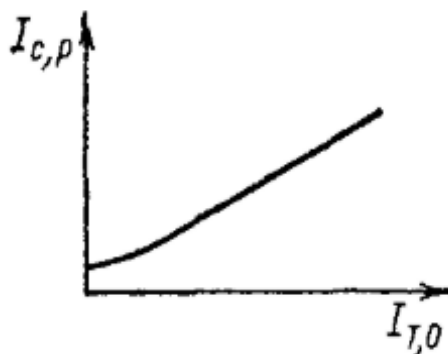


Рисунок 4 – Тормозная характеристика зависимости тока срабатывания от тока в тормозной обмотке

Для мощных трансформаторов применяются усовершенствованные системы защиты, такие как ДЗТ-23 и ДЗТ-21, использующие инновационный принцип подавления бросков намагничивания и небалансных токов. Эти устройства отличаются повышенным быстродействием и низким энергопотреблением.

Стоит отметить, что паузы между мгновенными значениями выпрямленного тока короткого замыкания и током срабатывания РО, очень малы. Это можно увидеть на рисунке 5.

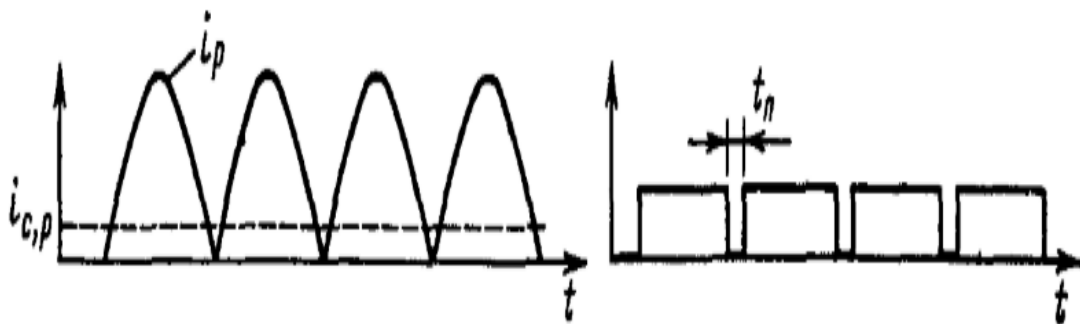


Рисунок 5 – Временные диаграммы

Таким образом, оценивая с помощью специальной схемы продолжительность пауз, защита может отличить режим броска тока намагничивания от режима КЗ в зоне срабатывания защиты.

Заключение

Важную роль в надежности электрических сетей играют трансформаторы, а в них наличие защит от повреждений. С учетом быстрого и качественного развития технологий, с учетом требований к надежности энергетических систем, дальнейшее совершенствование методов дифференциальной защиты будет способствовать повышению уровня безопасности.

Литература

1. Защита силовых трансформаторов [Электронный ресурс] / Дифференциальная защита. – Режим доступа: <https://spbet.narod.ru/studies/rz2.htm>. – Дата доступа: 03.05.2025.
2. Булычев А. В, Иванов Е. Н, Осипова В. С. Защиты трансформаторов. – Чебоксары: ИПК РЗА, 2023. – С. 10 – 19.
3. Релейная защита трансформаторов [Электронный ресурс] / Дифференциальная защита. – Режим доступа: <https://electricalschool.info/relay/1947-relejnjaja-zashhita-i-avtomatika.html> – Дата доступа: 03.05.2025.
4. Защита трансформаторов [Электронный ресурс] / Дифференциальная защита. – Режим доступа: <https://leg.co.ua/info/transformatory/zaschita-transformatorov-35-220-kv.html> – Дата доступа: 03.05.2025.
5. Голанцов Е. Б, Молчанов В. В. Дифференциальные защиты трансформаторов с реле. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – С. 6 – 14.

УДК 621.317.333

**СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ
СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ
MODERN COOLING SYSTEM FOR SYNCHRONOUS GENERATORS**

Д.Г. Яцухно

Научный руководитель – Я.В. Потачиц, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

potachitsyaroslav@bntu.by

D. Yatsukhno

Supervisor – Y. Potachits, Associate Professor

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в данной работе произведено исследование систем охлаждения синхронных генераторов, также рассмотрены системы, которые находятся на первых этапах внедрения в электроэнергетику, проблемы внедрения, принцип работы преимуществ и недостатки всех методов, представленных в этом исследовании.

Abstract: in this paper, a study of synchronous generator cooling systems is carried out, and the systems that are in the early stages of implementation in the electric power industry, the problems of implementation, the principle of operation, the advantages and disadvantages of all the methods presented in this study are also considered.

Ключевые слова: системы охлаждения, синхронные генераторы, сверхпроводящие генераторы, воздушное охлаждение, криоохлаждение, водяное охлаждение, водородное охлаждение.

Keywords: cooling systems, synchronous generators, superconducting generators, air cooling, cryocooling, water cooling, hydrogen cooling.

Введение

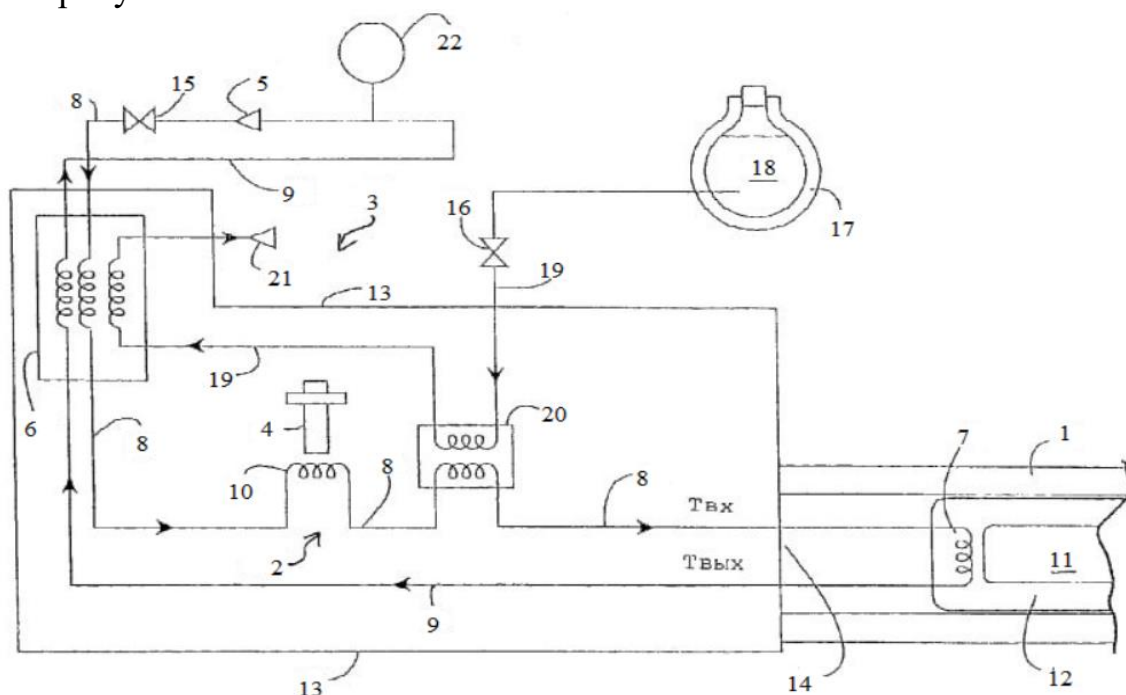
Системы охлаждения синхронных генераторов являются неотъемлемой частью бесперебойной работы электрических машин. Они осуществляют отвод тепла от нагретых частей машины и тем самым увеличивают коэффициент полезного действия, надежность и срок службы генератора. Принцип отвода тепла напрямую зависит от вида системы охлаждения. Чаще в работе применяют классические системы охлаждения, что включает в себя: воздушное охлаждение, водородное и водяное. В этой работе рассмотрены водяная и криогенная системы охлаждения генераторов.

Основная часть

Система водяного охлаждения часто применяется в работе. Данное охлаждение применяется в генераторах большой мощности, так как они требуют интенсивный отвод тепла. Следует выделить два вида водяного охлаждения: прямое охлаждение обмоток, когда по полым проводникам циркулирует дистиллированная вода, и косвенное, когда отвод тепла происходит благодаря теплообменникам. Несмотря на высокую теплоемкость воды и компактность данного метода охлаждения, возрастает риск коррозии металлов и засорений.

В синхронных и сверхпроводящих генераторах применяется криогенное охлаждение. Как правило его используют для повышения коэффициента полезного действия и увеличения мощности генератора. Для охлаждения высокотемпературных сверхпроводниковых обмоток, которые могут включать в себя YBCO (оксид иттрия-бария-меди), используется жидкий азот или криокулеры. При наличии низкотемпературных сверхпроводников из ниобий-титана в охлаждении принимает участие жидкий гелий. Принцип работы данной системы охлаждения заключается в помещении обмотки ротора в криостат (создается вакуум с тепловым экраном). Охлаждение проходит посредством работы криокулера или за счет жидких хладагентов (LHe , LN_2). В момент, когда обмотки охлаждены до сверхпроводящего состояния, в работу включается тепловой экран и снижает притоки тепла, которые подводятся к обмоткам. В случае же с традиционными генераторами с криоохлаждением водород или гелий циркулирует по каналам в статоре и роторе. Если используется водород, то тепло отводится во вторичный контур (в воду или воздух) и радиатор, а в случае гелия криокулер будет поддерживать низкие температуры. Далее рассмотрен подробно принцип работы системы криогенного охлаждения генератора.

Схема криогенной установки для сверхпроводящего генератора изображена на рисунке 1.



1 – сверхпроводящий синхронный генератор; 2 – основная криогенная установка; 3 – временная криогенная установка; 4 – блок для охлаждения текущего хладагента; 5 – компрессор; 6 – теплообменник; 7 – сверхпроводящая катушка; 8 – входной трубопровод; 9 – возвратный трубопровод; 10 – ВТС генератора; 11 – ротор; 12 – ВТС катушки обмотки возбуждения; 13 – холодильная камера; 14 – холодильная установка; 15 – клапан потока; 16 – клапан потока; 17 – резервуар; 18 – временная охлаждающая среда; 19 – трубопровод; 20 – теплообменник; 21 – отвод; 22 – резервуар.

Рисунок 1 – Схема внедрения системы криогенного охлаждения в сверхпроводящий генератор

Криогенное охлаждение имеет ряд преимуществ и недостатков. При охлаждении проводников азотом или гелием сопротивление уменьшается. Благодаря

этому снижаются потери на нагрев и повышается коэффициент полезного действия. Использование сверхпроводящих обмоток позволяет пропускать токи без перегрева и дает возможность создавать мощные и компактные генераторы. Стоит отметить экологичность данного варианта охлаждения генераторов. Снижение потерь мощности обеспечивает снижение энергопотребления и выбросов углекислого газа. К недостаткам можно отнести высокую стоимость, проблемы в надежности и обслуживании, ограниченный срок службы сверхпроводников и сложность в интеграции в существующие сети.

Заключение

Современные системы охлаждения генераторов способствуют повышению эффективности работы генератора, его надежности и долговечности. Выбрать вид охлаждения можно с помощью мощности генератора, но у каждой системы есть свои недостатки и преимущества в работе. Также данная тема имеет перспективные направления в роли криогенного охлаждения, благодаря чему появляется возможность создавать более мощные генераторы для энергетики в будущем.

Литература

1. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины: Учебник для техникумов. – 3-е изд., доп. – М.: Энергоатомиздат, 2018. – 238 с.: ил.
2. Системы охлаждения генераторов [Информационный ресурс] / Режим доступа: https://gigavat.com/generator_sistemi_ohlaghdeniya.php, Дата доступа: 20.04.2025

УДК 621.315.1

СРАВНЕНИЕ КОМПАКТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПЛОСКИМ ВЕРТИКАЛЬНЫМ И ПАРАБОЛИЧЕСКИМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПРОВОДОВ В ФАЗЕ

COMPARISON OF COMPACT POWER TRANSMISSION LINES WITH FLAT VERTICAL AND PARABOLIC ARRANGEMENT OF WIRES IN PHASE

С.Ю. Паншин, Д.В. Телица

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

astarginsky@bntu.by

S. Panshyn, D. Tselitsa,

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: на сегодняшний день компактные линии электропередачи, благодаря способности передавать электроэнергию на большие расстояния со сравнительно небольшими потерями, являются передовым решением в сфере электроэнергетики. В данной статье приведено сравнение двух компактных линий электропередачи с разным расположением проводов расщепленных фаз, что позволит выяснить, какую из них выгоднее использовать.

Abstract: Today, compact power transmission lines, due to their ability to transmit electricity over long distances with relatively low losses, are an advanced solution in the field of electric power industry. This article presents a comparison of two compact power transmission lines with different split-phase wiring arrangements, which will help to find out which one is more profitable to use.

Ключевые слова: компактная ЛЭП, линия, электропередача, воздушная линия.

Key words: compact transmission line, power line, overhead line.

Введение

Компактные линии электропередач (ЛЭП) в нынешнее время получают все большее распространение ввиду своих особенностей: они имеют уменьшенную конструкцию, по сравнению с традиционными, обладают меньшей индуктивностью и большей емкостью и, как следствие, сниженным волновым сопротивлением и повышенной натуральной мощностью [1]. Однако при возведении компактных ВЛ требуется учет ряда требований, нехарактерных для традиционных ВЛ. Так для строительства компактных ЛЭП применяется специальная линейная арматура, межфазные изолирующие распорки, а также полимерные изолирующие траверсы. Все это в совокупности позволяет добиться максимального сближения фаз, а также максимального увеличения пропускной способности.

В современном мире проблема отведения все больших участков земель под ЛЭП является одной из основных для энергетики. Традиционные высоковольтные ЛЭП не только требуют немалых площадей для строительства, но и имеют большие охранные зоны, что ограничивает обработку земель. В городах же ввиду дороговизны земельных участков строительство ВЛ совершенно невыгодно.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что применение компактных ЛЭП является одним из наиболее перспективных вариантов повышения эффективности электропередачи.

Основная часть

Для анализа эффективности использования сравним компактные ЛЭП с плоским вертикальным и параболическим расположением проводов расщепленных фаз. Сравнение произведем на основе расчета параметров, полученного при помощи программы PARM. Исходные данные для расчета представим в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета компактных ЛЭП

Параметр	Плоское вертикальное	Параболическое
Номинальное напряжение U , кВ	220	220
Расстояние между проводами фаз D , м	3,1	2,0
Количество проводов в фазе n	5	5
Радиус провода r , см	1,12	1,12
Удельное реактивное сопротивление X_0 , Ом/км	0,118	0,118
Допустимый ток в линии I , А	605	605

Для расчета также требуется знать координаты проводов, которые можно определить при помощи исходных схем расположения проводов расщепленных фаз компактных ЛЭП [2, с. 263] и имеющихся данных. Координаты расположения проводов расщепленных фаз плоской вертикальной и параболической линий представим на рисунках 1 и 2 соответственно.

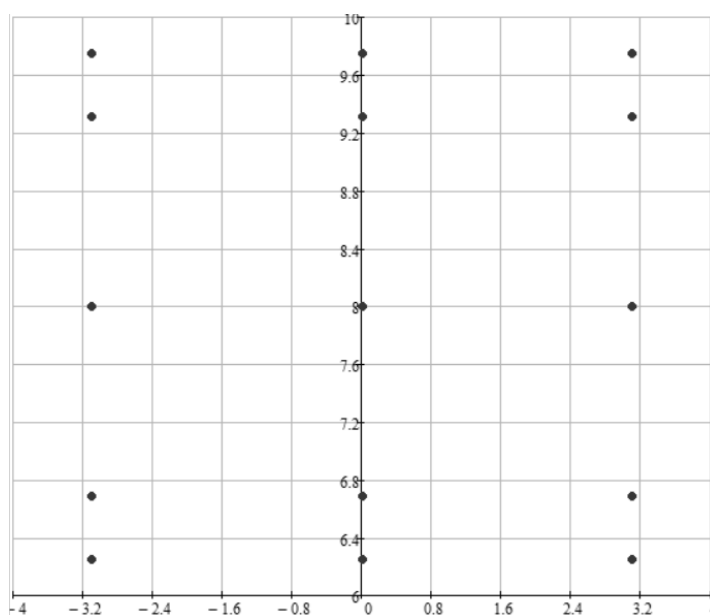


Рисунок 1 – Координаты расположения проводов расщепленных фаз плоской вертикальной компактной ЛЭП

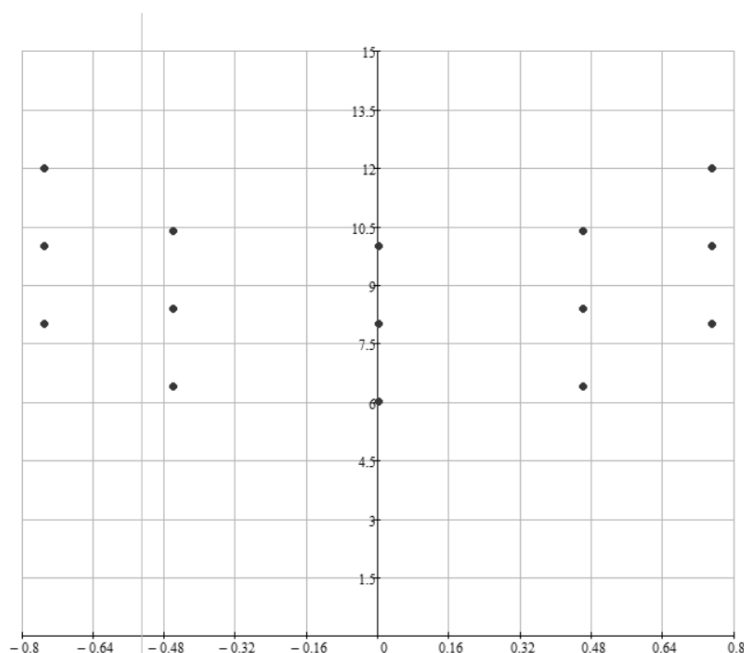


Рисунок 2 – Координаты расположения проводов расщепленных фаз параболической компактной ЛЭП

Полученные в результате расчета данные представим в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Результаты расчета компактной ЛЭП с плоским вертикальным расположением проводов расщепленных фаз

Фаза	Z , Ом/км	Y , См·10 ⁻⁶ /км	ΔP , кВт/км	Q_3 , квар/км	Z_B , Ом	S_n , МВА
А	0,1398	8,6641	0,60	136,90	127,03	127,01
В	0,1173	10,5347	0,21	169,97	105,54	152,87
С	0,1397	8,6641	0,55	136,90	127,00	127,04
ВЛ	0,1298	9,1684	2,29	443,77	118,97	406,84

Напряженность электрического поля в поперечном сечении линии на высоте 1,8 м над уровнем земли составило $E_{MAX} = 6,704$ кВ/м.

Таблица 3 – Результаты расчета компактной ЛЭП с параболическим расположением проводов расщепленных фаз

Фаза	Z , Ом/км	Y , См·10 ⁻⁶ /км	ΔP , кВт/км	Q_3 , квар/км	Z_B , Ом	S_n , МВА
А	0,1122	13,6260	0,75	211,67	90,73	177,82
В	0,1071	18,1823	1,13	293,35	76,74	210,26
С	0,1144	13,1238	0,75	202,58	93,95	172,84
ВЛ	0,1053	14,6191	2,47	707,60	84,87	570,26

Напряженность электрического поля в поперечном сечении линии на высоте 1,8 м над уровнем земли составила $E_{MAX} = 8,073$ кВ/м.

Заключение

Из полученных результатов видно, что конструкция ЛЭП с параболическим расположением проводов расщепленных фаз позволяет передавать на 40,2% большую мощность и обладает на 18,9% меньшим волновым сопротивлением, чем конструкция с плоским вертикальным расположением проводов. При этом

компактная ВЛ с параболическим расположением проводов имеет на 37% большую зарядную мощность и на 17% большую напряженность электрического поля в поперечном сечении линии на высоте 1,8 м над уровнем земли. Отсюда следует, что при выборе одной из рассмотренных компактных линий следует опираться на то, какой результат необходим. В случае, если необходимо передавать большее значение мощности, невзирая на большую зарядную мощность, необходимо выбрать линию с параболическим расположением проводов в расщепленной фазе. Если же задача состоит в использовании линии с как можно меньшей зарядной мощностью, то выбор следует сделать в пользу ЛЭП с плоским вертикальным расположением проводов в фазе.

Литература

1. Федин, В.Т, Электропередачи переменного тока повышенной мощности / В.Т. Федин, Ю.Д. Головач, Г.И. Селиверстов, М.С. Чернецкий – Минск: Наука и техника, 1993. – 310 с.
2. Поспелов, Г.Е, Передача энергии и электроэнергии: Учебное пособие для студентов энергетических специальностей вузов / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2003. – 544 с.

УДК 621.315.1

СРАВНЕНИЕ ОДНОЦЕПНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 220 КВ С ТРЕХ-КОАКСИАЛЬНЫМИ РАДИАЛЬНЫМИ СХЕМАМИ С ТРЕМЯ И ШЕСТЬЮ ПРОВОДАМИ В ФАЗЕ**COMPARISON OF 220 KV SINGLE-CHAIN OVERHEAD LINES WITH THREE-COAXIAL RADIAL CIRCUITS WITH THREE AND SIX WIRES IN PHASE**

И.Н. Адамович, К.Д. Сырцов

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

astarginsky@bntu.by

I. Adamovich, K. Sirtsov

Supervisor – Starzhinsky A.L., Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в работе с помощью программы «*PARM*» исследуются одноцепные воздушные линии 220 кВ, в которых провода скомпонованы по трем окружностям с общим центром и расположены на одинаковом расстоянии.

Abstract: in the work, using the *PARM* program, single-chain 220 kV overhead lines are investigated, in which the wires are arranged in three circles with a common center and are located at the same distance.

Ключевые слова: компактная линия, трехкоаксиальная схема, радиальная схема, натуральная мощность, частота отказов.

Keywords: compact line, three-coaxial circuit, radial circuit, natural power, failure rate.

Введение

Увеличение пропускной способности электропередачи издавна является актуальной проблемой в электроэнергетике, ведь ее решение позволило бы решить такие задачи, как снижение экономических затрат на сооружение линий электропередач, повышение устойчивости и надежности всей передачи и т.д.

Одним из способов решения задачи является изменение конструктивных особенностей линий, направленное на сближение проводов ее фаз и которое должно осуществляться с учетом различных технических ограничений, например, таких как: изменение расстояний между проводами из-за оледенения линий и раскачиваний, возможных перенапряжений между фазами, электромагнитными силами, создаваемыми токоведущими частями.

Линии, выполненные с учетом всех таких ограничений, называют компактными.

Компактные линии делятся на два типа:

- 1) коаксиальные;
- 2) сеточные.

Воздействие электромагнитного поля вокруг воздушной линии значительно ниже. Фактическое снижение воздействия зависит от конструкции выбранной компактной линии.

Создание компактной высоковольтной линии происходит благодаря уменьшению расстояний между проводами фаз в пролете с помощью стяжек непроводящих электрический ток. Одним из примеров таких служат стержневые полимерные изоляторы, применяемые в пролетах.

Основная часть

Произведем сравнение двух типов ЛЭП компактных конструкций, называемых трехкоаксильными радиальными – с тремя и шестью проводами в расщепленной фазе. Специфика данных линий в том, что они содержат в своем контуре одинаковое количество проводов разноименных фаз, прямо или наоборот чередующихся. В это же время провода разноименных фаз находятся на одном луче, проведенном из центра окружности. Такое расположение позволяет значительно скомпенсировать разнонаправленные силы ЭМ поля и тем самым улучшить параметры передачи.

Исследование произведем с помощью программы «PARM». В качестве объекта исследования примем линию 220 кВ, выполненную проводами сечением 240/32. На основании справочных конструктивных параметров компактных линий [1] нарисуем систему координат и определим координаты каждого провода в отдельности (рисунок 1).

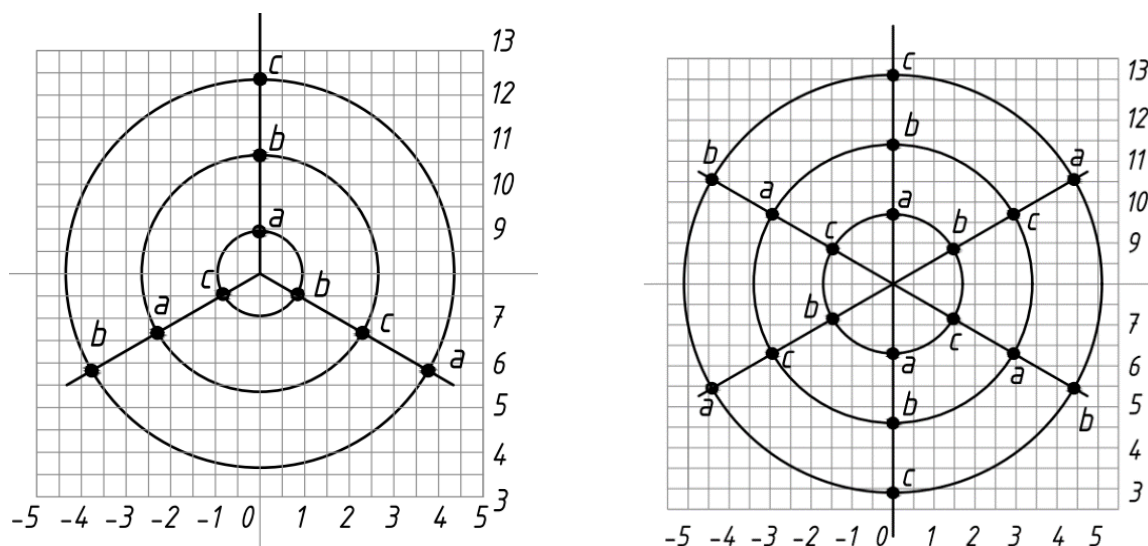


Рисунок 1 - Одноцепные трехкоаксильные радиальные схемы с тремя и шестью проводами в фазе

Задав положения проводов для двух вариантов в программе, выполним расчет. Результаты сведем в таблицу 1.

Таблица 1 - Результаты расчетов в программе PARM

№	Напряжение, кВ	Радиус провода, см	Кол-во проводов в фазе	P_n , МВт	Z_b , Ом	$E_{\text{макс}}$, кВ/м
1	220	1,08	3	433,47	111,62	3,83
2			6	692,57	61,24	5,22

Заключение

Как следует из результатов расчета, с увеличением количества проводов в трехкоаксиальной схеме произошло увеличение натуральной мощности с 433,47

до 692,57 МВт (59,7%), волновое сопротивление понизилось с 111,62 Ом до 61,24 Ом (45%). Однако вместе с тем произошло увеличение напряженности ЭМ поля на 35,8%. Можно заключить, что мощность линий рассмотренной конструкции напрямую зависит от того, сколько проводов в фазе.

Использование линий компактной конструкции позволяет значительно увеличить натуральную передаваемую мощность по сравнению с традиционными, линиями. Так, для класса напряжения 220 кВ натуральная мощность одноцепных линий составляет порядка 150 МВт, что значительно меньше полученных в расчете.

Литература

1. Александров, Г. Н. Воздушные линии электропередачи повышенной пропускной способности / Г. И. Александров // Электричество. – 1981. – № 7. – С. 1–6.
2. Поспелов Г.Е. Электрические системы и сети: Учебник / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, П.В. Лычев – Минск: УП «Технопринт», 2004. - 720 с.

УДК 621.315.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМПАКТНОЙ ЛИНИИ
НА ИТОГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**
**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF COMPACT LINE PARAME-
TERS ON THE FINAL CHARACTERISTICS**

К.В. Райская

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
astarginsky@bntu.by

K. Raiskaya

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: проведена оценка влияния погодных и конструктивных параметров на предел передаваемой мощности компактной ВЛ 220 кВ.

Abstract: an assessment of the influence of weather and design parameters on the limit of the transmitted power of a 220 kV compact overhead line has been carried out.

Ключевые слова: ВЛ-220 кВ, угол сдвига фаз напряжений, изолирующая траверса, экологичность ЛЭП, компактная линия, погодные факторы.

Keywords: OL-220 kV, stress phase shift angle, insulating traverse, environmental friendliness of the transmission line, compact line, weather factors.

Введение

Увеличение мощности и дальности передачи электроэнергии является не только одной из центральных проблем энергетики, но одной из важнейших экономических проблем. В связи с этим стоит задача улучшения линий электропередачи, которые служат для объединения отдельных электроэнергетических систем, использования удаленных энергоресурсов, рациональной организации потоков топлива в стране.

Основная часть

В качестве исследуемой примем трёхконтурную двухцепную компактную линию со следующими параметрами:

- номинальное напряжение $U = 220$ кВ;
- расстояние между проводами фаз $D = 6,5$ м;
- радиус провода $r = 2,16$ см;
- допустимый ток в линии $I = 610$ А;
- удельное активное сопротивление $R_0 = 0,011$ Ом/км.

Геометрические координаты компактной линии отобразим на рисунке 1.

Расчёт произведём в программном комплексе PARM (разработчик – БНТУ, кафедра «Электрические системы») при среднестатистических вероятностях погодных условий: хорошая погода-81%, снег-9%, дождь-6%, изморозь-4%.

Результаты расчёта приведены в таблице 1.

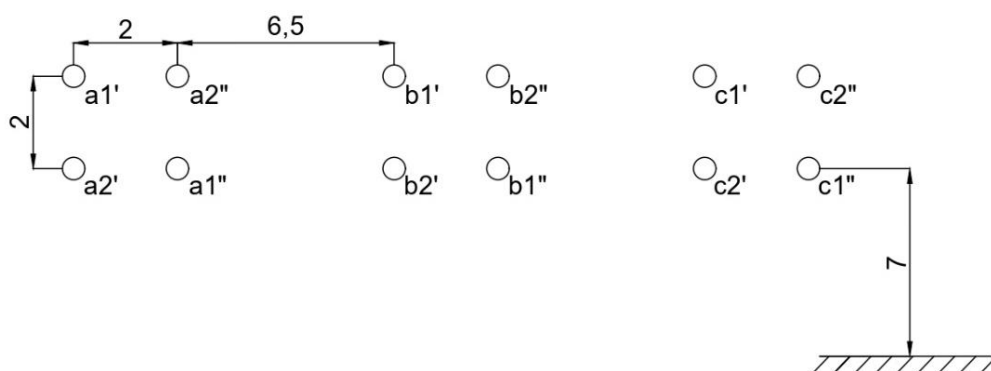


Рисунок 1 – Расположение проводов компактной ВЛ-220 кВ

Таблица 1 – Результаты расчёта компактной линии

Цепь	Фаза	Z , Ом/км	Y , $\text{См} \cdot 10^{-6}$	ΔP , кВт/км	Q_3 , квар/км	Z_B , Ом	$P_{\text{НАТ}}$, МВт
1	А	0,139	8,347	1,51	134,67	129,19	124,88
	В	0,139	8,339	1,50	134,55	129,29	124,79
	С	0,139	8,341	1,50	134,57	129,23	124,85
	ВЛ	0,139	8,343	4,50	403,79	129,23	374,51
2	А	0,157	8,341	1,50	134,56	137,09	117,69
	В	0,164	8,340	1,50	134,54	140,32	114,98
	С	0,165	8,347	1,51	134,66	140,46	114,87
	ВЛ	0,160	8,343	4,50	403,77	138,60	349,22

$E_{\text{МАХ}}=1,318$ кВт/м. Диапазон напряжённости поля на проводах $14,137 \div 14,181$ кВ/см. Напряжённость лежит в допустимых пределах.

Рассмотрим влияние погодных условий на передаваемую линией мощность, для этого искусственно увеличим вероятность таких погодных явлений как снег, дождь и изморозь. Имеем следующие вероятности: хорошая погода-5%, снег-15%, дождь-70%, изморозь-10%. Результаты отобразим в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчёта компактной линии при ухудшении погодных условий

Цепь	Фаза	Z , Ом/км	Y , $\text{См} \cdot 10^{-6}$	ΔP , кВт/км	Q_3 , квар/км	Z_B , Ом	$P_{\text{НАТ}}$, МВт
1	А	0,139	8,356	6,07	134,67	129,13	124,94
	В	0,139	8,348	6,03	134,55	129,23	124,85
	С	0,139	8,349	6,04	134,57	129,17	124,90
	ВЛ	0,139	8,351	18,14	403,79	129,17	374,69
2	А	0,157	8,350	6,04	134,56	137,02	117,75
	В	0,164	8,348	6,03	134,54	140,25	114,04
	С	0,165	8,355	6,07	134,66	140,39	114,92
	ВЛ	0,160	8,351	18,14	403,77	138,53	349,39

$E_{\text{МАХ}}=1,318$ кВт/м. Диапазон напряжённости поля на проводах $14,137 \div 14,181$ кВ/см.

По полученным данным можно сделать вывод о том, что погодные условия не сильно влияют на натуральную мощность компактной линии: мощность увеличилась всего на 0,05%. Напряжённость лежит в допустимых пределах.

Рассмотрим влияние высоты компактной ЛЭП при хороших погодных условиях на передаваемую мощность, для этого увеличим высоту опор на 20 метров от исходной из рисунка 1. Результаты отобразим в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчёта компактной линии при увеличении высоты ЛЭП

Цепь	Фаза	Z, Ом/км	Y, См·10 ⁻⁶	ΔP, кВт/км	Q _з , квар/км	Z _в , Ом	P _{нат} , МВт
1	A	0,139	8,344	1,50	134,60	129,22	124,85
	B	0,139	8,339	1,50	134,54	129,29	124,79
	C	0,139	8,343	1,50	134,60	129,21	124,86
	ВЛ	0,139	8,342	4,50	403,74	129,24	374,50
2	A	0,157	8,343	1,50	134,60	137,08	117,70
	B	0,164	8,339	1,50	134,53	140,31	114,99
	C	0,165	8,343	1,50	134,60	140,50	114,83
	ВЛ	0,160	8,342	4,50	403,73	138,61	349,19

$E_{\text{MAX}}=0,022$ кВт/м. Диапазон напряжённости поля на проводах 14,142÷14,182 кВ/см.

По полученным данным можно сделать вывод о том, что высота ЛЭП не сильно влияет на натуральную мощность компактной линии: мощность уменьшилась всего на 0,01%. Зато за счёт увеличения высоты максимальная напряжённость на отметке в 1,8 метра от поверхности земли уменьшилась аж в 60 раз и удовлетворяет норме напряжённости для человека ($E_{\text{MAXнорм}}=0,025$ кВ/м).

В настоящее время идёт активное внедрение изолирующих траверс, они позволят сократить расстояние между крайними проводами на рассматриваемой ЛЭП-220 кВ с 19 метров до 10 метров. Но такое решение требует дополнительных мер, например - установка межфазных изолирующих распорок для предотвращения схлёстывания проводов. Результаты отобразим в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчёта компактной линии при уменьшении расстояния между проводами

Цепь	Фаза	Z, Ом/км	Y, См·10 ⁻⁶	ΔP, кВт/км	Q _з , квар/км	Z _в , Ом	P _{нат} , МВт
1	A	0,141	8,270	1,43	133,38	130,45	123,68
	B	0,143	8,196	1,36	132,23	131,84	122,37
	C	0,141	8,271	1,43	133,43	130,46	123,67
	ВЛ	0,141	8,245	4,22	399,04	130,92	369,69
2	A	0,156	8,274	1,43	133,43	137,26	117,54
	B	0,163	8,196	1,36	136,65	140,99	114,43
	C	0,168	8,267	1,43	136,49	142,56	113,18
	ВЛ	0,161	8,245	4,22	136,25	139,58	346,76

$E_{\text{MAX}}=1,435$ кВт/м. Диапазон напряжённости поля на проводах 13,885÷14,234 кВ/см.

По полученным данным можно сделать вывод о том, что применение изолирующих траверс не сильно влияет на натуральную мощность компактной линии: мощность уменьшилась всего на 0,01%. Но данное мероприятие позволяет

существенно сократить просеку для установки компактной ЛЭП, что имеет благоприятный экологический эффект.

Рассмотрим влияние угла сдвига векторов фаз (Θ , град) на сближенных проводах, расчёт произведём для углов 0° , 60° , 120° , 180° . Результаты отобразим в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты расчёта компактной линии при изменении угла сдвига векторов фаз

Θ , град	Цепь	Z, Ом/км	Y, См·10 ⁻⁶	ΔP , кВт/км	Q _з , квар/км	Z _в , Ом	P _{нат} , МВт
0°	1	0,351	3,540	0,01	171,35	314,74	153,78
	2	0,351	3,540	0,01	171,34	314,74	153,78
60°	1	0,311	5,182	0,05	229,70	244,97	197,58
	2	0,312	5,182	0,05	229,69	245,18	197,41
120°	1	0,212	7,415	1,54	345,92	168,62	287,04
	2	0,227	7,433	1,54	345,90	174,67	277,10
180°	1	0,139	8,343	4,50	403,79	129,23	374,51
	2	0,160	8,343	4,50	403,77	138,60	349,22

По полученным результатам можно судить о том, что из всех исследуемых мероприятий угол сдвига векторов фаз в наибольшей степени влияет на предел передаваемой мощности. Максимальное же своё значение она приобретает при угле 180° , т.е. когда вектора сближенных фаз находятся в противофазе, это достигается за счёт того, что на отдельном контуре к каждому проводу цепи с обеих сторон примыкают провода с противоположным направлением напряжения.

Заключение

В результате исследований мы получили, что единственным мероприятием для регулирования предела передаваемой мощности является изменение угла сдвига фаз сближенных проводов. Для данной конструкции фазы максимальное значение достигается при 180° . Погодные условия, высота опор ЛЭП и применение изолирующих траверс никак не влияют на передаваемую мощность. Но вместе последние два мероприятия позволяют повысить экологичность ЛЭП, а также использовать землю под линией для собственных нужд, так как значение напряжённости поля меньше нормативного.

Литература

1. Федин, В.Т, Электропередачи переменного тока повышенной мощности / В.Т. Федин, Ю.Д. Головач, Г.И. Селиверстов, М.С. Чернецкий – Минск: Наука и техника, 1993. – 310 с.

2. Управляемые самокомпенсирующиеся электропередачи и регулирование параметров и режимов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vunivere.ru/work48956/page2/>– Дата доступа: 04.04.2025.

3. Соколов, П.С. Особенности конструкции и эксплуатации компактных воздушных линий нового поколения в России / П. С. Соколов, В. Ю. Мирошник, П. В. Беляев. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eepir.ru/article/kompaktnye-vl-v-rossii/>– Дата доступа: 04.04.2025.

УДК 621.311

**СОВРЕМЕННЫЕ И ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ
НАПРЯЖЕНИЯ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ
MODERN AND TRADITIONAL METHODS OF VOLTAGE REGULATION:
EFFICIENCY, PROBLEMS AND PROSPECTS**

Э.Д. Мацулевич, А.М. Тарасова

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
astarginsky@bntu.by

E. Matsulevich, A. Tarasova

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: В статье рассматриваются основные методы регулирования напряжения в электрических сетях. Кратко приведены принципы работы, диапазоны регулирования, преимущества и ограничения каждого метода.

Abstract: The article reviews the main methods of voltage regulation in power grids. It briefly summarizes the principles of operation, regulation ranges, advantages and limitations of each method.

Ключевые слова: электрическая сеть, регулирование напряжения, РПН, ПБВ, компенсация реактивной мощности, конденсаторные батареи, реакторы, АРВ, статические синхронные компенсаторы.

Keywords: Power grid, voltage regulation, regulation under load, switch without excitation, reactive power compensation, capacitor banks, reactors, automatic excitation regulator, static synchronous compensators.

Введение

Электрические сети являются основой функционирования всей энергосистемы, обеспечивая передачу электрической энергии на большие расстояния и распределение между потребителями разного рода.

Качество электроснабжения напрямую зависит от ряда факторов. К ним относятся: уровень напряжения сети, качество и надежность электрических элементов распределительных сетей, а также климатические условия. Но ключевым показателем работы энергосистемы является напряжение и его стабильность.

Поэтому выбор способа регулирования напряжения – это важная задача при проектировании электрических сетей с целью обеспечения стабильной работы энергосистемы. Существуют различные способы регулирования напряжения, позволяющие решить проблемы, связанные с несоответствием отклонения напряжения нормам качества, с потерями напряжения в электрических сетях при передаче электроэнергии и с неравномерной нагрузкой фаз.

Цель настоящей работы – рассмотреть современные методы регулирования напряжения в электросетях, проанализировать их применение и проблемы, связанные с внедрением новых технологий.

Основная часть

Отклонение напряжения выше допустимого значения приводит к сбою работы электроустановок, уменьшению срока их службы и перегреву ЛЭП. То есть отклонение напряжения влияет на всю энергосистему в целом. И поэтому напряжение в сети должно поддерживаться в допустимом диапазоне, обеспечивающем нормальную работу как бытовых, так и промышленных потребителей.

Согласно ГОСТ 32144-2013, допустимые положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии при медленном изменении напряжения не должны превышать 10 % номинального значения.

Регулирование напряжения – это процесс намеренного изменения уровня напряжения в точках электрической системы с помощью специальных технических устройств. Регулирование напряжения применяется для обеспечения стабильности и качества электроснабжения, так как постоянно изменяющееся напряжение сказывается на работе электрооборудования и энергоснабжении потребителей.

Для поддержания требуемых уровней напряжения используются различные методы регулирования, которые можно классифицировать по принципу воздействия:

- изменение коэффициента трансформации с помощью регулирования под нагрузкой (РПН) или переключателя без возбуждения (ПБВ), установленных на трансформаторах;
- компенсация и регулирование реактивной мощности, что возможно с помощью реакторов, конденсаторных батарей;
- регулирование напряжения на стороне генерации электроэнергии с помощью автоматического регулирования возбуждения;
- применение статических синхронных компенсаторов (STATCOM).

Использование трансформаторов для регулирования напряжения на вторичной стороне является наиболее распространённым методом регулирования напряжения из-за своей надёжности и доступности. Однако регулирование происходит ступенчато и в ограниченном диапазоне. РПН позволяет изменять коэффициент трансформации, не отключая трансформатор от сети, что обеспечивает быстрое изменение напряжения и не прерывает электроснабжение потребителей. По средствам РПН регулирование находится в пределах $\pm 16\%$. ПБВ осуществляет регулирование при полном отключении нагрузки. Он имеет более низкие пределы регулирования – $\pm 5\%$, что не подходит для мгновенного изменения напряжения и чаще используется для предварительного задания напряжения определённого уровня. Например, для сезонного регулирования напряжения, которое меняется в зависимости от нагрузки. С помощью этих двух устройств можно увеличивать и понижать напряжение на более подходящее для потребителей значение и обеспечивать стабильную работу всей сети.

Реактивная мощность (Q) – это электрическая нагрузка, которая, циркулируя между источниками энергии и потребителями, не выполняет полезную работу. Это приводит к нагреву проводов и потерям мощности. При избытке реактивной мощности напряжение на шинах повышается, а при недостатке – напряжение на шинах снижается. Тогда регулирование напряжения заключается в

управлении реактивной мощностью. Если напряжение падает, то в сеть вводят конденсаторные батареи, которые повышают напряжение за счёт генерации реактивной мощности, компенсируя индуктивную составляющую нагрузки, что повышает напряжение в сети. Обратное происходит при росте напряжения – подключают реактор, который поглощает избыточную реактивную мощность, что компенсирует ёмкостную составляющую и напряжение понижается.

Устройства автоматического регулирования возбуждения генераторов (АРВ) обеспечивают быстрое увеличение тока возбуждения синхронной машины при удалённых коротких замыканиях, которые как правило приводят к снижению напряжения. АРВ позволяет быстро регулировать напряжение и предотвращает недопустимые отклонения напряжения в сети, тем самым повышая устойчивость режима работы сети.

Статические синхронные компенсаторы (STATCOM) – это современное устройство для управления реактивной мощностью, что позволяет быстро и точно регулировать напряжение в электрических сетях. Данный компенсатор обеспечивает плавное регулирование напряжения в широком диапазоне, имеет малые габариты и высокую надёжность по сравнению с реакторами и конденсаторными батареями. Так этот STATCOM является электронным устройством, **то на отклонения напряжения он** реагирует за миллисекунды, что значительно быстрее традиционных устройств компенсации реактивной мощности. Однако он имеет высокую стоимость и сложен в эксплуатации в сравнении с традиционными устройствами.

Анализируя классические методы регулирования напряжения такие как: трансформаторы с РПН и ПБВ, конденсаторные батареи, реакторы и АРВ, можно с уверенностью сказать, что они ещё долго останутся основой регулирования напряжения благодаря своей надёжности, простоте обслуживания и невысокой стоимости. Однако развитие возобновляемых источников энергии, увеличение числа потребителей и рост требований к качеству электроэнергии вынуждает изобретать более точные и быстродействующие методы регулирования, а также применять современные цифровые технологии для автоматизации процесса регулирования напряжения.

В будущем развитие технологий регулирования напряжения будет связано с автоматизацией процессов и внедрением интеллектуальных сетей, поэтому можно ожидать значительного улучшения надёжности и стабильности работы электрических сетей. Но уже на данном этапе развития технологий есть возможность сочетания классических и современных устройств регулирования напряжения. Например, трансформаторы с РПН и STATCOM. Такой комплексный метод не требует больших затрат на переоборудование всей подстанции, но при этом позволяет более эффективно регулировать напряжение.

Заключение

Таким образом, рассмотренные традиционные методы регулирования напряжения достаточно эффективны и используются повсеместно, благодаря своей надёжности, невысокой стоимости и простоте обслуживания, но они огра-

ничены по диапазону регулирования и скорости реакции. Регулирование напряжения в электрических сетях – это одно из значимых направлений для обеспечения стабильной энергосистемы и повышения качества электроэнергии.

Поэтому оптимальным путём развития данной области является комплексное применение методов регулирования напряжения, при котором классические и современные устройства регулирования будут работать в единой системе. Это обеспечит устойчивую работу электрических сетей и существенно повысит эффективность регулирования напряжения, уменьшая потери электроэнергии и улучшая качество электроснабжения потребителей.

Литература

1. Поспелов, Г. Е. Электрические системы и сети: Учебник / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, П. В. Лычев – Минск : УП Технопринт, 2004. – 720 с.
2. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : Межгосударственный стандарт : дата введения 01.04.2016 / Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь. – Изд. официальное. – Москва : Стандартиформ, 2018. – 124 с.
3. Образовательный сайт Школа для электрика [Электронный ресурс]: Регулирование напряжения в энергосистеме. – Режим доступа: <https://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/1140-regulirovanie-naprijazhenija-v.html>. – Дата доступа: 11.04.2025.

УДК 537.523.3

ВЛИЯНИЕ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НА КОРОНУ
THE EFFECT OF WEATHER CONDITIONS ON THE CROWN

И.В. Прилуцкий

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к. т. н., доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

astarginsky@bntu.by

I. Prilutsky

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: в данной работе представлен эффект короны и его зависимость от погодных условий.

Abstract: this paper presents the corona effect and its dependence on weather conditions.

Ключевые слова: эффект короны, погодные условия, зависимость, ионизация, коронный разряд.

Keywords: the crown effect, weather conditions, dependens, ionization, corona discharge.

Введение

Коронный разряд – это самостоятельный газовый разряд, возникающий в резко неоднородных полях у электродов с большой кривизной поверхности.

Коронный разряд применяется в разных областях, например, в очистке воздуха, фильтрах, электрофотографии и так далее.

Основная часть

Коронный разряд формируется следующим образом:

происходит ионизация молекула воздуха, вследствие чего вылетает электрон;

2) электрон получает ускорение в электрическом поле вблизи острия, и достигает достаточного заряда энергии, чтобы вызвать лавинообразную ионизацию.

Если электродом, на котором возникает корона, является катод, то эффект будет называться отрицательной короной и ионизация будет направлена в сторону анода. При достижении ионизацией области в которой напряжённость не является достаточной для дальнейшего прохождения процесса, происходит рекомбинация электронов с молекулами воздуха, в следствие чего образуются отрицательные ионы. Эти же отрицательные ионы являются носителями тока в области, не охватываемой эффектом короны.

Если электродом является анод электроны движутся к острию, а ионы наружу от острого конца. В области, не обладающей достаточной напряжённостью, носителями зарядов остаются положительные ионы, движущиеся в сторону катода [1].

Коронный заряд зависит от ряда параметров, влияющих на воздух:

– температура, если она повышается, то плотность воздуха уменьшается и в связи с эти необходимо меньшее напряжение для возникновения явления короны;

Из расчёта зависимости коронного разряда от погодных условий Беларуси за 2024 год получилась следующая картина, представленная на рисунке 1.

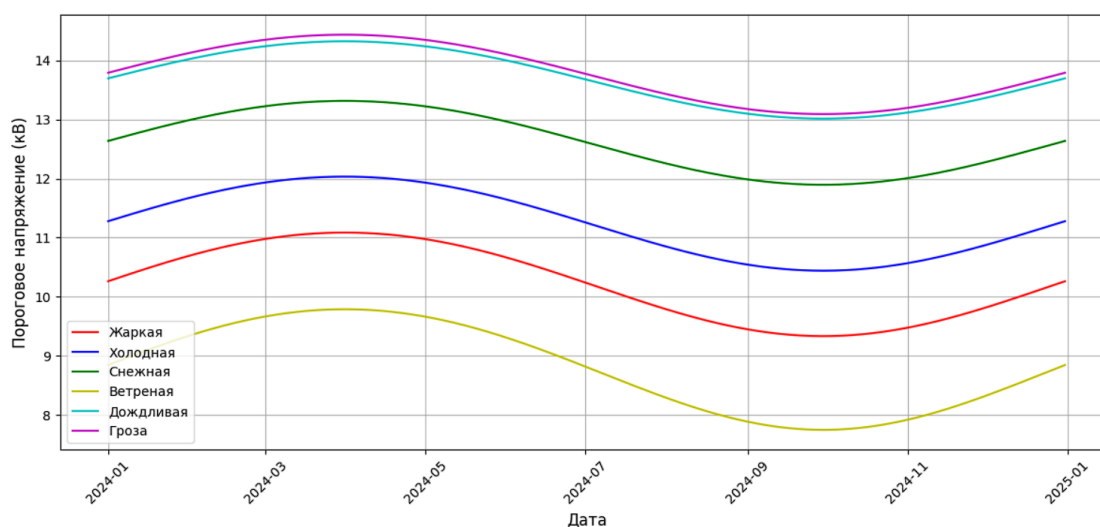


Рисунок 1 – зависимость коронного разряда от погодных условий в Беларуси за 2024 год

На графике наблюдаются кривые описывающие критическое напряжение в различную погоду, а именно в жаркую, холодную, снежную, ветреную, дождливую погоду и грозу. Как видно из графика, наименьшее значение возникновения коронного разряда приходится на ветреную погоду в октябре и составляет около 7,8 кВ, а наибольшее значение приходится на грозы в апреле и достигает 14,5 кВ.

Заключение

Отличительной чертой коронного разряда является повышение потерь электроэнергии, из чего вытекает необходимость увеличения диаметра проводов, а следственно повышение экономических затрат.

Для большей надёжности защиты от короны, нужно учитывать зависимость данного эффекта от других параметров, таких как давление, температура, влажность, диэлектрическая проницаемость воздуха, которые разнятся в ту или иную погоду и пору года. Предугадать погоду является затруднительной задачей, поэтому необходимо учитывать погоду прошлых лет, чтобы иметь диапазон значений для дальнейшего их применения в расчётах.

Литература

1. Коронный разряд - возникновение, особенности и применение, эффект короны на проводах ЛЭП [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electricalschool.info/electrojavlenija/2020-koronnyy-razryad.html>. – Дата доступа: 27.03.2025.
2. Потери на корону: усредненные, удельные, расчет, табличные значения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pue8.ru/uchet-elektroenergii/2-3-2-poteri-na-koronu.html>. – Дата доступа: 27.03.2025.

УДК 621.311

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ С ВОЗНОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ
FREQUENCY CONTROL IN THE POWER SYSTEM WITH RENEWABLE SOURCES OF ENERGY

Э.В. Шеколайт

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
astarginsky@bntu.by

A. Shekolajt

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: данная статья содержит информацию об одном из главных показателей энергосистемы – частоты, способах регулирования и поддержания её допустимых значений.

Abstract: this article contains information about one of the main indicators of the energy system – frequency, methods of regulating and maintaining its permissible values.

Ключевые слова: частота, отклонение, регулирование, АЧР.

Key words: frequency, deviation, regulation, AFU.

Введение

За последнее столетие людьми было сделано множество научных и технических достижений, создано огромное количество технологий и инноваций, а с каждым годом промышленность продолжает набирать обороты. Одной из причин, что способствовала данному процессу, является использование электроэнергии. Современную жизнь невозможно представить без данного вида энергии, так как она используется в очень широком диапазоне начиная от повседневной жизни (освещения, бытовой техники, транспорта и др.) до различных отраслей промышленности (металлургии, машиностроения, химической и др.). Всё больше возрастает производство, распределение и потребление электроэнергии, делая ее важной и неотъемлемой составляющей нынешнего времени, что в свою очередь означает о необходимости стандартизации и контроля качества данного вида энергии.

Основная часть

Нормы качества электрической энергии (КЭ) в системах электроснабжения общего назначения изложены в ГОСТ 32144-2013. Рассмотрим такой критерий, как отклонение значения основной частоты напряжения электропитания от номинального значения, Δf , Гц:

$$\Delta f = f_m - f_{nom}, \quad (1)$$

где f_m – значение основной частоты напряжения электропитания, Гц;

f_{nom} – номинальное значение частоты напряжения электропитания, Гц.

Номинальное значение частоты напряжения в Республики Беларусь равно 50 Гц. Нормально допустимые и предельно допустимые отклонения частоты в

синхронизированной системе нормированы и не должны превышать $\pm 0,2$ Гц и $\pm 0,4$ Гц соответственно. Нормирование отклонения напряжения необходимо по той причине, что часть электроприёмников (в основном электродвигатели) имеет зависимость параметров от частоты напряжения. К примеру, электродвигатели переменного тока имеют зависимость частоты вращения n от частоты напряжения f :

$$n = \frac{60f}{p}, \quad (2)$$

где p – количество пар полюсов электродвигателя.

А мощность P электродвигателей, работающие с питательными электронасосами собственных нужд тепловых электрических станций, имеет следующую зависимость:

$$P = f^m, \quad (3)$$

где $m = 2 \dots 4$.

Данная зависимость показывает, какую опасность создаёт отклонение частоты для нормальной работы станции, как она влияет на её производительность. Таким же образом имеется зависимость не только активной мощности электроприёмников, но и реактивной мощности от частоты напряжения. Отсюда следует, что и сама частота зависит от равновесия генерируемой и потребляемой активной мощности. Вследствие этого по направлению и скорости её изменения можно понять: в системе избыток или же недостаток активной мощности

Из вышесказанного следует, что частота напряжения является определяющим фактором для многих параметров энергосистемы, а значит её регулирование (поддержание в нормированных пределах) является важной задачей.

Процесс регулирования частоты состоит из двух частей: первичного и вторичного регулирования. Первичное регулирование заключается в изменении мощности турбин с помощью автоматических регуляторов частоты вращения. Данные регуляторы скорости имеют 2 характеристики: астатическую и статическую. Рассмотрим только статическую (рисунок 1), так как астатическая характеристика непригодна при параллельной работе генераторов.

Как видно из рисунка при понижении частоты до $f_1 < f_{\text{ном}}$, увеличивается генерируемая мощность с P_0 до P_1 , т.е. мощность изменяется так, чтобы поддерживался необходимый уровень частоты напряжения. В этом и заключается принцип регулирования.

Электрические станции, участвующие в первичном регулировании (не регулирующие), не способны поддерживать необходимое значение частоты в энергосистеме, поэтому в системе выделяются несколько станций (регулирующие), что участвуют во вторичном регулировании, а остальные – в первичном. Данный процесс представлен на рисунке 2.

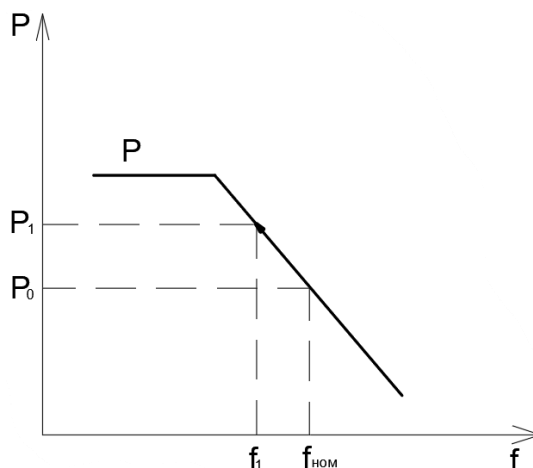


Рисунок 1 – Статическая характеристика регуляторов скорости

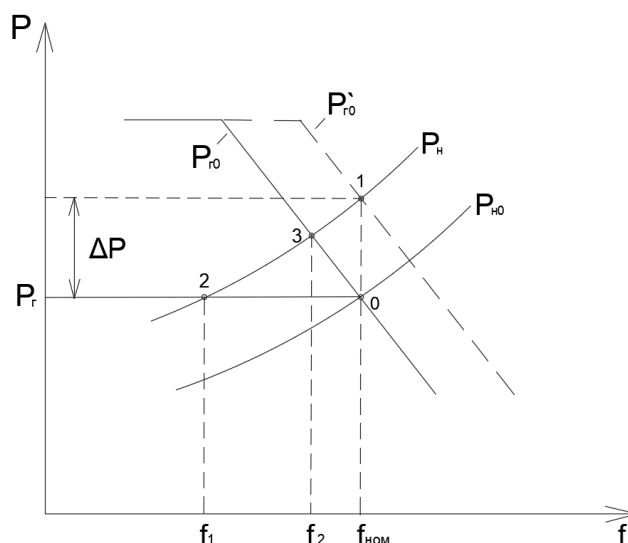


Рисунок 2 – Процесс первичного и вторичного регулирования

На рисунке 2 изображены усредненная характеристика регуляторов скорости генераторов $P_{г0}$ и статическая характеристика нагрузки $P_{н0}$, а в точке 0 при номинальной частоте $f_{ном}$ имеется равновесие мощностей: потребляемой и генерируемой. Из-за роста потребляемой мощности происходит переход из точки 0 в точку 1, что есть новое положение статической характеристики нагрузки $P_{н}$. Если регуляторы скорости включены, то произойдет переход из точки 1 в точку 3 с набором части нагрузки генераторами, а частота примет значение f_2 , которое будет находиться между номинальным значением $f_{ном}$ и значением f_1 , что достигается при отключенных регуляторах скорости ($f_1 < f_2 < f_{ном}$). Если же имеются устройства вторичного регулирования, то характеристика $P_{г0}$ будет смещаться до значения $P'_{г0}$, соответствующее частоте $f_{ном}$.

При выборе регулирующих станций опираются на следующие характеристики: широкий диапазон регулируемой мощности и необходимой скорости набора нагрузки. Для вторичного регулирования удобно использовать гидроэлектростанции, но если их нет или недостаточно, то применяются тепловые электростанции.

Таким образом, задачей первичного регулирования является остановка понижения или повышения частоты, а вторичного – восстановить частоту до номинального значения.

При аварийных ситуациях, когда от системы отключается часть генерирующих мощностей, происходит отключения межсистемных связей или разделение энергосистемы на отдельные части из-за нарушения устойчивости работы системы, и последующим за ними дефицитом или избытком активной мощности возникает повышение и понижение частоты, что может привести к отключению тепловых агрегатов или к лавине частоты. Для предотвращения данных последствий применяют автоматическую частотную разгрузку (АЧР), которая состоит из двух подсистем: АЧР-1 и АЧР-2.

При действии АЧР-1 потребители отключаются ступенями без выдержки времени при изменении частоты на 0,1-0,2 Гц на ступень, верхняя установка – 49 Гц. При работе АЧР-2 потребители отключаются с выдержкой по времени 3÷5 с на ступень, начальная ступень – до 10 с. АЧР-2 имеет единую установку по частоте равную или несколько больше верхней установки АЧР-1.

В последнее время в энергетическую систему внедряется все больше возобновляемых источников энергии, такие как солнечные панели и ветрогенераторы, что обуславливается неисчерпаемостью солнечной энергии, независимостью от других энергоресурсов (угля, газа, мазута и т.д.) и относительно высокой экологичностью. Но при этом есть и ряд недостатков: зависимость от внешних условий (погоды, времени суток, поры года и др.), высокие затраты на создание, обслуживание (в результате повышается конечная стоимость электроэнергии), относительно низкий КПД данных установок и др.

Среди минусов так же нужно выделить и проблему регулирования частоты в таких системах. В отличие от традиционной энергосистемы, где основная масса источников генераторов есть синхронные генераторы, мощность которых мы можем регулировать за счет изменения количества подаваемого рабочего тела (в основном пара), системы с возобновляемыми источниками энергии не позволяют таким образом регулировать мощность установок, т.к. она в основном зависит от погодных условий, т.е. уменьшается управляемость, инертность системы. Это означает, что в любой момент времени мощность вырабатываемая этими источниками может быть избыточна или недостаточна, для покрытия баланса мощностей (не соответствовать нагрузке потребителей).

Для избежания дисбаланса в энергосистемах с нетрадиционных источниками используют накопители энергии, силовую электронику и быстродействующие контроллеры. Накопители (аккумуляторы) позволяют изымать электроэнергию при её избытке и выдавать при недостатке в системе, что позволяет уменьшить дисбаланс мощности. Силовая электроника и быстродействующие контроллеры позволяют имитировать инерцию вращающихся масс, то есть стабилизирующий эффект на сеть. При этом важно помнить о регулирующей роли нагрузки. Можно назвать несколько примеров данного регулирования: регулирование тарифа на электроэнергию при её избытке или недостатке, учет графиков нагрузки энергосистемы, использование более энергоэффективных приборов.

На сегодняшний день, кроме постепенного внедрения возобновляемых источников энергии, вводятся так же и интеллектуальные сети, позволяющие по-

лучить данные о производстве и потребления электроэнергии, важных параметрах и величинах, что оказывают весомый вклад в работу энергосистемы. Данный контроль позволяет найти оптимальный вариант в вопросе спроса и предложение (баланса мощностей), а также обнаружить неучтенных потребителей, если таковые имеются.

Заключение

Таким образом, отклонение частоты от номинального оказывает существенное влияние на множество протекающих в энергосистеме процессов, поэтому оно является одним из основных критерием качества электроэнергии и нормируется в ГОСТ 32144-2013. Для поддержания номинального значения частоты применяют совмещенное первичное и вторичное регулирование, а при аварийных ситуациях применяется АЧР, что способствует повышению устойчивости энергосистемы и предотвращению нежелательных последствий для неё. В последнее время внедряются новые источники энергии, использование которых усложняет процесс регулирования частоты, но наряду с ними появляются новые методы и устройства учета производства/потребления, которые тоже оказывают влияние на проблему регулирования частоты напряжения и способствуют более эффективному контролю данного параметра.

Литература

1. Роецкая, Д. Ю. Сравнение первичного и вторичного регулирования частоты в энергосистеме путем построения математических моделей в MATLAB Simulink / Д. Ю. Роецкая. - Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2022. - № 7 (402). - С. 35-38. - URL: <https://moluch.ru/archive/402/88969/> (дата обращения: 06.04.2025).
2. Павлов Г.М. «Автоматическая частотная разгрузка энергосистем». Второе издание. - РАО «ЕЭС России» Центр подготовки кадров энергетики (СЗФ АО «ГВЦ Энергетики»), 2002. - 86 с.
3. K. Dehghanpour, S. Afsharnia Electrical demand side contribution to frequency control in power systems: a review on technical aspects / Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2015. - Volume 41 (pages 1267-1276) — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114007886?via%3Dihub> (дата обращения: 12.04.2025).

УДК 621.311

**НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ И ПУТИ ЕЕ СНИЖЕНИЯ
NON-SINUSOIDAL VOLTAGE AND WAYS TO REDUCE IT**

В.В. Смоленский, Д.В. Полонский

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

astarginsky@bntu.by

V. Smolensky, D. Polonsky

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: данная статья содержит информацию об одном из главных показателей качества электрической энергии – несинусоидальности напряжения, способах уменьшения её влияния на энергосистему.

Abstract: This article contains information about one of the main indicators of the quality of electric energy - non-sinusoidal voltage, ways to reduce its impact on the power system.

Ключевые слова: несинусоидальность, напряжение, фильтрокомпенсирующие устройства, качество электроэнергии, компенсация реактивной мощности, трехфазный компенсатор реактивной мощности.

Key words: non-sinusoidality, voltage, filter-compensating devices, power quality, reactive power compensation, three-phase reactive power compensator.

Введение

В данной статье рассмотрены и описаны причины возникновения и методы снижения несинусоидальности напряжения. Данная проблема имеет высокое влияние на технико-экономическую составляющую энергетики. В связи с внедрением на предприятия новых технологий, а также расширением самих предприятий, вследствие чего увеличивается количество устройств с нелинейной вольтамперной характеристикой, таких как: сварочные установки, электродуговые печи, силовые трансформаторы, вентильные преобразователи, газоразрядные лампы и другие. В связи с этим стоит острый вопрос по снижению влияния несинусоидальности в сетях переменного тока в кратчайшие сроки.

Основная часть

Качество электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения нормируется в соответствии с действующим межгосударственным стандартом ГОСТ 32144 – 2013. Рассмотрим один из показателей качества электроэнергии (КЭ), как несинусоидальность.

Трехфазное напряжение, находящееся в фазном смещении равным 120° , называется симметричным. При нарушении симметрии в многофазной системе, трехфазную можно разложить на три симметричные составляющие – систему прямой последовательности и накладываемые на нее системы обратной и нулевой последовательности.

Гармонические составляющие напряжения, как правило, обусловлены нелинейной нагрузкой потребителей в энергосистеме. Что приводит к искажениям кривой переменного тока, а в следствии приводит к изменению кривой напряжения в электрических сетях отличной от требуемой частоты.

Одним из основных показателей несинусоидальности напряжения является коэффициент гармонических составляющих:

$$k_U = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} 100\% \quad (1)$$

где $U_2, U_3, U_4, \dots, U_n$ – действующие значения высших гармоник;
 U_1 – действующее значение основной гармоники(1-ой).

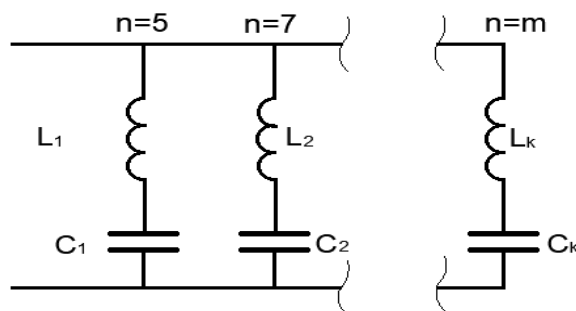
Согласно ГОСТ 32144 – 2013 k_U для электрических сетей 0,38 кВ не должно превышать 8.0%; для сетей 6 – 25 кВ 5%; 35 кВ – 4%; 110 кВ и более – 2%.

Основными источниками искажения напряжения являются частотные преобразователи, выпрямители и импульсные источники питания, сварочные аппараты, дуговые печи, энергосберегающие и LED-лампы.

Рассмотрим последствия несимметрии напряжений:

- 1) дополнительные потери мощности. Повышение коэффициента несимметрии приводит к увеличению потерь рассеивания;
- 2) перегрев и вибрации, приводящие к преждевременному старению всех деталей;
- 3) снижение КПД установок;
- 4) возникают ошибки в измерительных приборах из-за искажения формы сигнала;
- 5) перегрузки электродвигателей.

Одним из способов для снижения пагубного влияния гармоник является использование пассивных (резонансных) фильтров, которые конфигурируются под каждый отдельный случай таким образом, чтобы подавлять определенные гармоники. Схема пассивного фильтра указана на рисунке 1.



n – порядок гармоники

Рисунок 1 – Схема пассивного фильтра

Суммарное сопротивление звена можно найти из выражений:

$$n_p = \frac{f_p}{f_0}, \quad (2)$$

где f_p – резонансная частота звена; f_0 – основная частота сети.

$$X_{зв} = X_L - X_C \quad (3)$$

где X_L , X_C – сопротивления элементов звена основной гармоники.

$$X_L = X_{L(n)} / n_p, \quad (4)$$

$$X_C = X_{C(n)} n_p. \quad (5)$$

где $X_{L(n)}$, $X_{C(n)}$ – сопротивление резонансной гармоники.

$$X_{зв} = \frac{1-n_p^2}{n_p^2} X_C \quad (6)$$

С учетом того, что $n_p > 1$, можно сказать, что суммарное сопротивление звена будет иметь емкостной характер ($X_{зв} < 0$).

Резонансный фильтр является эффективным методом компенсации гармоник в узком спектре. Однако использование такого устройства для компенсации широкого спектра является материал затратной задачей, т.к. пассивные фильтры не могут менять регулируемые ими параметры.

Активные фильтры гармоник – это современные электронные устройства, предназначенные для динамического подавления гармонических искажений в реальном времени. Они компенсируют несинусоидальные токи, создаваемые нелинейными нагрузками. Активный фильтр – это система, подключаемая параллельно к установке и работающая как «идеальный» генератор тока, способный одновременно генерировать токи разных частот (обычно в диапазоне 50 Гц ÷ 2500 Гц). С помощью внешних трансформаторов тока (ТТ), установленных в точке системы, где требуется снижение искажения тока, активный фильтр измеряет гармонические составляющие тока и «впрыскивает» (с фазовым углом 180°, то есть в противофазе) такие же гармонические токи по амплитуде и частоте, как и измеренные.

Заключение

Пассивные фильтры хорошо показывают себя, когда система работает стабильно и не появляется нужды в компенсации новых гармонических составляющих. Их использование в системах с динамическим изменением гармонических искажений экономически не имеет смысла. Активные же фильтры это современное решение проблемы гармонических искажений в динамических системах с постоянно изменяющейся нагрузкой.

Литература

1. Абрамович, Б. Н. Коррекция коэффициента мощности в сетях нефтепромыслов с помощью активного фильтра / Б. Н. Абрамович. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:127373252>.
2. Богачев, В. С. Повышение качества энергии в сетях электропитания потребителей // М : Электро. - 2011. - № 1. – С. 47-51.
3. Магеррамов, Р. В. Активные и пассивные электрические фильтры / Р. В. Магеррамов. Текст : непосредственный // Молодой ученый. 2017. – № 2(136). С. – 148-152. – URL: <https://moluch.ru/archive/136/38046/> (дата обращения: 01.05.2025).

УДК 621.3.051

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
MODERN METHODS OF MONITORING AND DIAGNOSTICS OF OVER-HEAD POWER TRANSMISSION LINES

К.И. Курилович, Д.Г. Яцухно

Научный руководитель – Ю. В. Суходолов, доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
elsyst@bntu.by

K. Kurilovich, D. Yatsukhno

Supervisor – Yu.V. Sukhodolov, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: исследование методов контроля и диагностики качества электроэнергии на высоковольтных линиях электропередачи, рассмотрен принцип действия каждого из представленных методов.

Abstract: the study of methods for monitoring and diagnosing the quality of electricity on high-voltage power transmission lines, the principle of operation of each method is considered.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, метод линейной сети, метод сети прямого подключения, широкополосная связь по линиям электропередачи.

Keywords: wireless sensor network, linear network method, direct connection network method, broadband communication via power transmission lines.

Введение

С точки зрения надежности и стабильности линии электропередачи являются неотъемлемой частью энергосистемы. Благодаря данному компоненту осуществляется передача электроэнергии от источника к потребителю, что требует введения новшеств в сфере обеспечения надежности работы линий крупной энергосистемы. В связи с этим была введена в эксплуатацию беспроводная сенсорная сеть, основной задачей которой является мониторинг высоковольтных линий, сбор данных о датчиках, находящихся в энергосистеме, а также передача некоторых команд управления. Эта сеть несовершенна, так как имеет низкую скорость передачи данных, исходя из этого была разработана широкополосная связь по линиям электропередачи. Данная технология работает по принципу сбора информации от групп опор и направления сигналов на ближайшую подстанцию. В этой работе рассмотрен принцип действия беспроводной сенсорной сети, широкополосной связи по линиям электропередачи, а также математические модели перечисленных систем.

Основная часть

Беспроводная сенсорная сеть состоит из множества датчиков, расположенных на протяжении линии электропередачи. Это позволяет держать контроль над аварийными ситуациями на линиях, а также автоматизировать энергосистемы. Существует две модели беспроводной сенсорной сети: модель линейной сети и модель сети прямого подключения.

На рисунке 1 изображена модель линейной сети. Подстанции 1 и 2 подключены к центру управления посредством оптоволоконна.

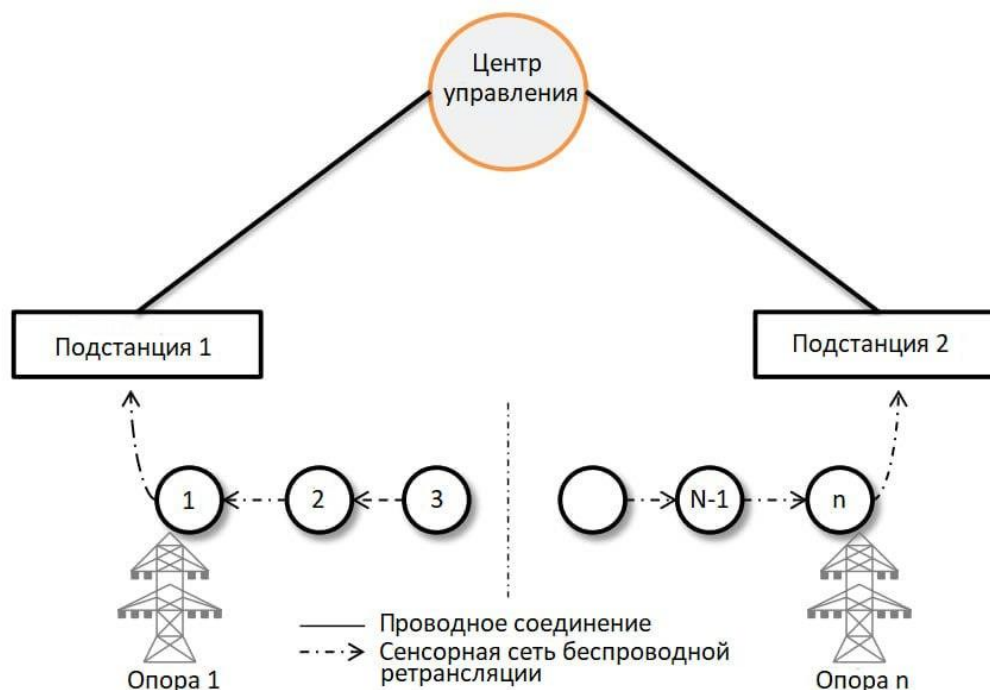


Рисунок 1 – Модель линейной сети

Ретрансляционный узел собирает данные от датчиков и передает на другой узел, находящийся рядом с подстанцией на концах ЛЭП. В зависимости от длины высоковольтной линии количество ретрансляционных узлов вычисляется по формуле:

$$T_{LNM} = \frac{S_d}{R_i} \cdot \left[1 + 2 + \dots + \frac{n_{\text{relay}}}{2} \right] = \frac{S_d}{R_i} \cdot \sum_{x=1}^{\frac{n_{\text{relay}}}{2}} x,$$

где R_i – скорость передачи данных Кбит/с,

S_d – размер передаваемого сигнала, n_{relay} – количество узлов ретрансляции на линии.

Основным недостатком данной модели сети является невозможность передачи сигнала на большие расстояния.

Рисунок 2 показывает модель сети прямого подключения. Данная сеть основана на прямых беспроводных линиях связи между ретрансляционными узлами и центром управления. Исходя из того, что станции могут находиться на большом расстоянии от ретрансляционных узлов, для подобных связей, как правило, используются такие технологии, как: GSM, 3G, 4G, и 5G.

Для определения максимального времени задержки используют формулу:

$$T_{\max_{DLNM}} = \text{MAX}(T_{r1}, T_{s1}),$$

где T_{r1} – временная задержка группы узлов ретрансляции;

T_{s1} – временная задержка группы узлов подстанции:

$$T_{r1} = \frac{K \cdot (K + 1) \cdot S_d}{2 \cdot R_{Short}} + \frac{K \cdot S_d}{R_{Short}} + \frac{(2 \cdot K + 1) \cdot S_d}{R_{Long}};$$

$$T_{s1} = \frac{\left[K_{sub1} \right] \cdot \left[K_{sub1} + 1 \right] \cdot S_d}{2 \cdot R_{Short}}.$$

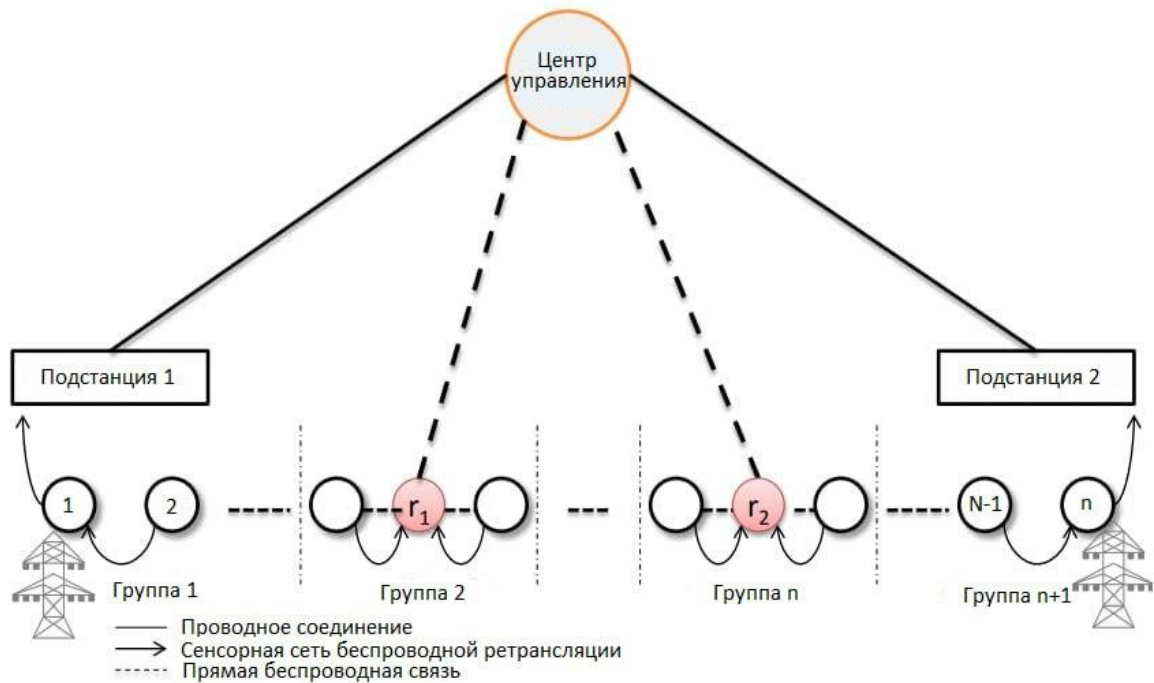


Рисунок 2 – Модель сети прямого подключения

Путем установки широкополосной связи, изображенными на рисунке 3, между высоковольтными линиями электропередачи происходит процесс преобразования в интеллектуальную ЛЭП.

Основным отличием данного метода от двух предыдущих является наличие в схеме блоков BPL, расположенных вдоль линии протяженностью до 100 км на определенном расстоянии (от 1 до 25 км) друг от друга. Блоки BPL являются своего рода модемами, которые могут создавать, принимать и передавать сигналы на другие устройства BPL.

Максимальная временная задержка для данного метода рассчитывается по формуле:

$$T_{\max_{BPL}} = \text{MAX} \{ T_{BPL1}, T_{s1} \},$$

где T_{BPL1} – временная задержка группы ретрансляционных узлов, T_{s1} – временная задержка группы ретрансляционных узлов:

$$T_{BPL1} = \frac{K \cdot (K + 1) \cdot S_d}{2 \cdot R_{Short}} + \frac{(K + 1) \cdot S_d}{R_{Short}} + \frac{\left[\frac{n_{BPL}}{2} \right] \cdot \left[\frac{n_{BPL}}{2} + 1 \right] \cdot [K + 1] \cdot S_d}{R_{BPL}};$$

$$T_{s1} = \frac{\left[K_{sub1} \right] \cdot \left[K_{sub1} + 1 \right] \cdot S_d}{2 \cdot R_{Short}},$$

где R_{BPL} – скорость передачи данных по проводной линии с помощью блоков BPL, R_{short} – скорость передачи данных на короткие расстояния при ретрансляции сигнала, n_{BPL} – количество блоков BPL на линии, K_{sub1} – количество узлов, взаимодействующих с подстанцией 1.

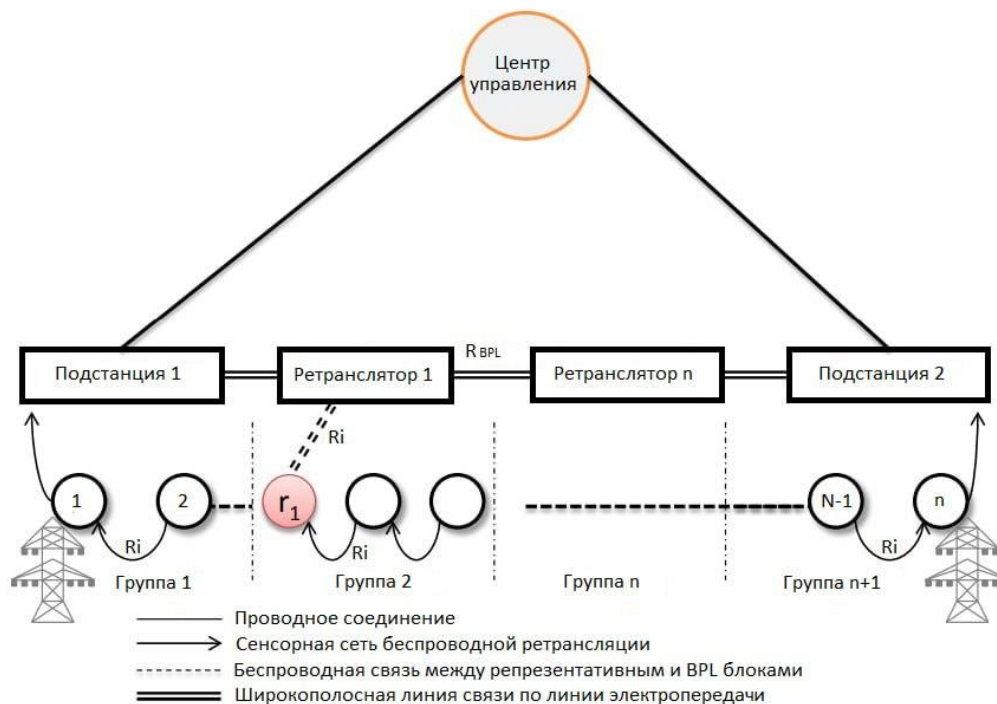


Рисунок 3 – Широкополосная связь по линиям электропередачи

Заключение

Данные линии электропередачи являются надежными и стабильными, также считаются неотъемлемой частью энергосистемы. Совершается передача электроэнергии от источника к потребителю и приводит к введению новшеств в сфере обеспечения надежности работы линий крупной энергосистемы. Благодаря этому в эксплуатацию ввели беспроводную сенсорную связь, которая в свою очередь имела задачу мониторинга высоковольтных линий, сбора данных о датчиках, находящихся в энергосистеме, а также передачу некоторых команд управления. Недостатки этой сети заключаются в том, что она имеет низкую скорость передачи данных, на основании этого была разработана широкополосная связь по линиям электропередачи. Эта разработка работала исходя из сбора информации от групп опор и направления сигналов на ближайшую подстанцию.

Литература

1. Monitoring High Voltage Power Lines Using Efficient WSN [Информационный ресурс] / Режим доступа: <https://www.hrpub.org/download/20200430/AEP2-18115689.pdf>, Дата доступа: 15.02.2025.
2. Широкополосная связь по линиям электропередачи [Информационный ресурс] / Режим доступа: <https://oneproxy.pro/ru/wiki/broadband-over-power-line.pdf>, Дата доступа: 16.02.2025.

УДК 621.311

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛА НАГРУЗКИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ dQ/dE

ASSESSING THE STABILITY OF A LOAD NODE USING THE PRACTICAL CRITERION dQ/dE

А.А. Кандыбович

Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

volkau@bntu.by

A. Kandybovich

Supervisor – A. Volkau, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: проведены расчеты и оценка устойчивости электроэнергетической системы с генераторами с АРВ ПД по практическому критерию устойчивости dQ/dE .

Abstract: calculations and assessment of the stability of the electric power system with generators with ARV PD according to the practical criterion of stability dQ/dE have been carried out.

Ключевые слова: статическая устойчивость, анализ системы, характеристики.

Keywords: static stability, system analysis, characteristics.

Введение

Под устойчивостью системы понимают ее свойство возвращаться в исходное состояние равновесия при снятии возмущения, которое повлекло к нарушению этого состояния [4].

В работе рассмотрена оценка устойчивости узла нагрузки по практическому критерию dQ/dE . Система энергоснабжения (СЭС) представлена одной ЛЭП, питающейся от шин генераторов, имеющих АРВ ПД и комплексной нагрузкой (рисунок 1).

Схему замещения электрической системы, содержащую узловую точку можно упростить до элементарного вида, объясняется это тем, что нагрузки, подключенные к узловым точкам сложных СЭС, могут замещать части системы и задаваться статическими или динамическими характеристиками. Узлы характеризуются векторами напряжения, которые играют роль эквивалентных ЭДС неявных источников и нагрузок и отличаются от явных тем, что они не обладают инерционностью генераторов и двигателей.

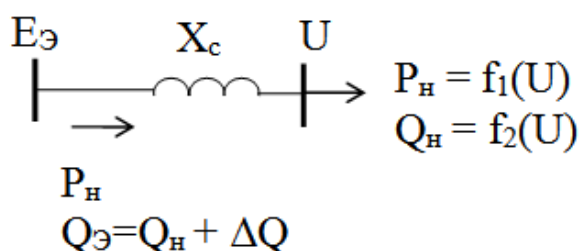


Рисунок 1—Эквивалентная схема замещения системы энергоснабжения

Основная часть

Уравнение для ЭДС на шинах генераторов будет иметь вид:

$$E_g = \sqrt{\left(U + \frac{Q_n \cdot x_\Sigma}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_n \cdot x_\Sigma}{U}\right)^2}, \quad (1)$$

где U – напряжение в узловой точке;

Q_n, P_n – реактивная и активная мощности, зависящие от напряжения U ;

x_Σ – сопротивление системы.

Статические характеристики мощности Q_n, P_n определяем по выражениям:

$$Q_n = Q_{n(0)} \cdot (a_0 + a_1 \cdot U + a_2 \cdot U^2); \quad (2)$$

$$P_n = P_{n(0)} \cdot (b_0 + b_1 \cdot U + b_2 \cdot U^2), \quad (3)$$

где $Q_{n(0)}, P_{n(0)}$ – реактивная и активная мощность при номинальном напряжении на шинах нагрузки;

$a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ – коэффициенты полинома, для которых справедливы равенства:

$$\begin{aligned} a_0 + a_1 + a_2 &= 1 \\ b_0 + b_1 + b_2 &= 1 \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение для суммарной реактивной мощности системы:

$$Q_g = Q_n + \Delta Q = Q_n + \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U^2} \cdot x_\Sigma. \quad (5)$$

Важным показателем нагрузки для работы энергетической системы является регулирующий эффект. Под регулирующим эффектом понимают изменение активной и реактивной мощности нагрузки на единицу изменения напряжения [1].

Изменяя напряжение на шинах нагрузки в диапазоне $(0,6 \dots 1) U_{ном}$, определяем по статическим характеристикам (2) и (3) изменение нагрузки, а затем изменение суммарной реактивной мощности (5) и э.д.с. генераторов (1). Получим зависимость $\frac{dQ_g}{dE_g}$ и отобразим ее на рисунке 2. В пиковой точке параболы режим устойчив.

Смоделируем ситуацию, при которой нагрузка:

- 1) увеличилась на 30% от начальных значений Q_g, P_g ;
- 2) уменьшилась на 30% от начальных значений Q_g, P_g .

Графики для этих режимов представлены соответственно на рисунках 3 и 4. Анализируя полученные результаты можно отметить, что изменение нагрузки влияет на сдвиг точки характеризующей устойчивость режима по диагонали вверх и вниз в зависимости от увеличения или уменьшения нагрузки соответственно. При увеличении нагрузки критическое значение ЭДС эквивалентного источника увеличивается.

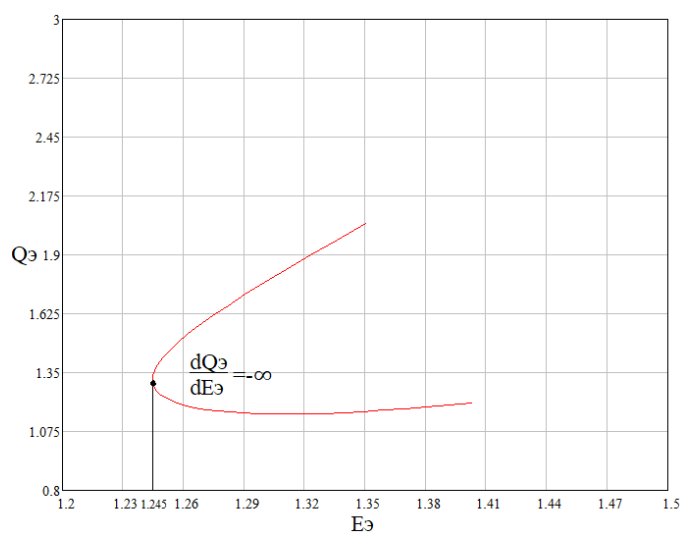


Рисунок 2 – График зависимости $\frac{dQ_{\text{э}}}{dE_{\text{э}}}$ при исходной нагрузке

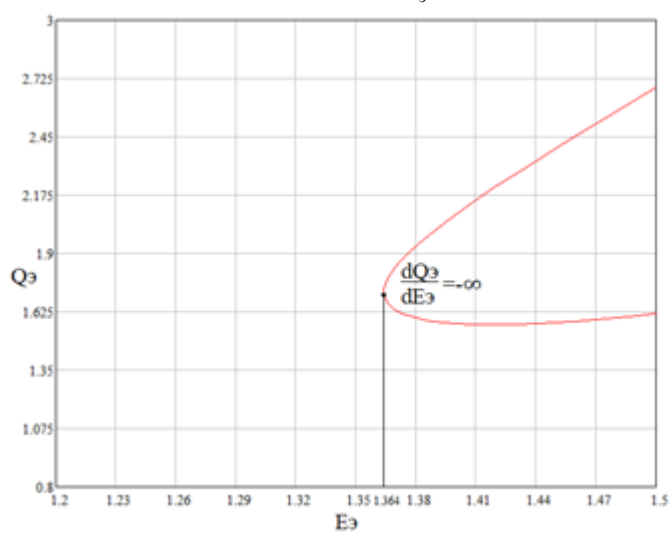


Рисунок 3 - График зависимости $\frac{dQ_{\text{э}}}{dE_{\text{э}}}$ при увеличении нагрузки

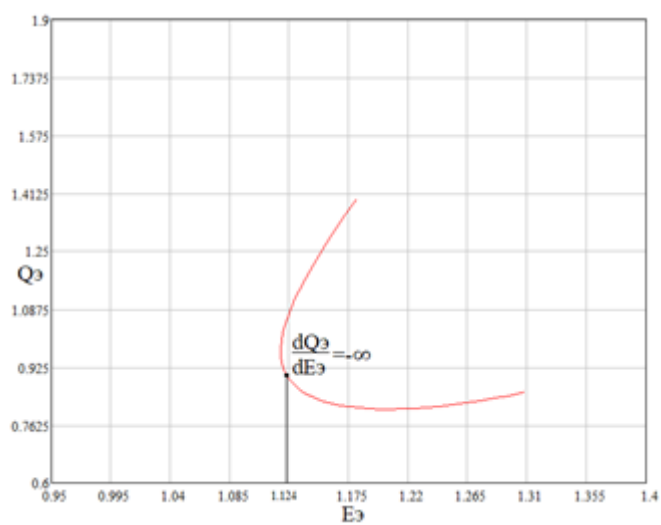


Рисунок 4 – График зависимости $\frac{dQ_{\text{э}}}{dE_{\text{э}}}$ при уменьшении нагрузки

Заключение

Существует несколько критериев, по которым можно оценить устойчивость узла нагрузки. Основные критерии удобно применять, если рассматривается устойчивость одного синхронного или асинхронного двигателя. Вторичные критерии применяются для оценки устойчивости комплексного узла нагрузки. Они равнозначны между собой в получении итогового результата, но обладают некоторыми особенностями, которые можно использовать для упрощения процесса получения этого результата и для анализа влияния различных схемных и режимных факторов на итоговый результат. По рассмотренному в работе критерию нет необходимости в представлении узла нагрузки эквивалентным асинхронным двигателем. Кроме того, полученные зависимости позволяют оценить влияние регуляторов возбуждения на генераторе на устойчивость нагрузки. К недостаткам применения критерия можно отнести необходимость представления источников питания одной эквивалентной ЭДС.

Литература

1. Куликов, Ю. А. Переходные процессы в электрических системах / Ю. А. Куликов. – Новосибирск : Новосибирский Государственный Технический Университет, 2006. – 277 с.
2. Гуревич, Ю. Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова, А. А. Окин. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
3. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учебник для электроэнергетических специальностей вузов / В. А. Веников. – Изд. 4-е. – М. : Высш. шк., 1985. – 536 с.
4. Калентионок, Е. В. Устойчивость электроэнергетических систем / Е. В. Калентионок. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 376 с.

УДК 621.311

ВЛИЯНИЕ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА РЕЖИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ
INFLUENCE OF COMPENSATING DEVICES ON THE ELECTRIC SYSTEM MODE

Е.Д. Баланюк

Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
volkau@bntu.by

E. Balaniuk

Supervisor – A. Volkau, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: *проведены расчеты, анализ и сравнение влияния установки компенсирующих устройств на режим электрической сети, в качестве которых выступают синхронный компенсатор и батарея статических конденсаторов. Все расчеты будут реализованы с помощью программ MathCAD и RastrWin3.*

Abstract: *Calculations, analysis and comparison of the impact of installing compensating devices on the electrical system mode were carried out, which are a synchronous compensator and a battery of static capacitors. All calculations will be implemented using MathCAD and RastrWin3 programs.*

Ключевые слова: *математическое моделирование, режим электрической сети, компенсирующие устройства, синхронный компенсатор, батарея статических конденсаторов.*

Keywords: *mathematical modeling, electrical system mode, compensating devices, synchronous compensator, static capacitor bank.*

Введение

Для достижения наиболее оптимального режима электрической сети используют компенсирующие устройства (КУ). Работа КУ основана на изменении параметров реактивной мощности в системе. В данной работе будет наглядно показано влияние КУ на установившийся режим электрической сети. Будем рассматривать следующие КУ:

- синхронный компенсатор (СК) – это синхронный двигатель, работающий вхолостую без механической нагрузки на валу. В зависимости от тока возбуждения он может, как выдавать (режим перевозбуждения СК), так и потреблять (режим недовозбуждения СК) реактивную мощность.

- батарея статических конденсаторов (БСК) – представляет собой устройство, собранное из параллельно или последовательно подключенных конденсаторов, предназначенное для выдачи реактивной мощности.

Основная часть

Анализ влияния компенсирующих устройств проведем на примере электрической сети переменного тока. Расчет исходного установившегося режима без

компенсирующих устройств выполнен по уравнениям узловых напряжений, которые были решены методом ускоренной итерации в MathCAD. Результаты расчета представлены на рисунке 1.

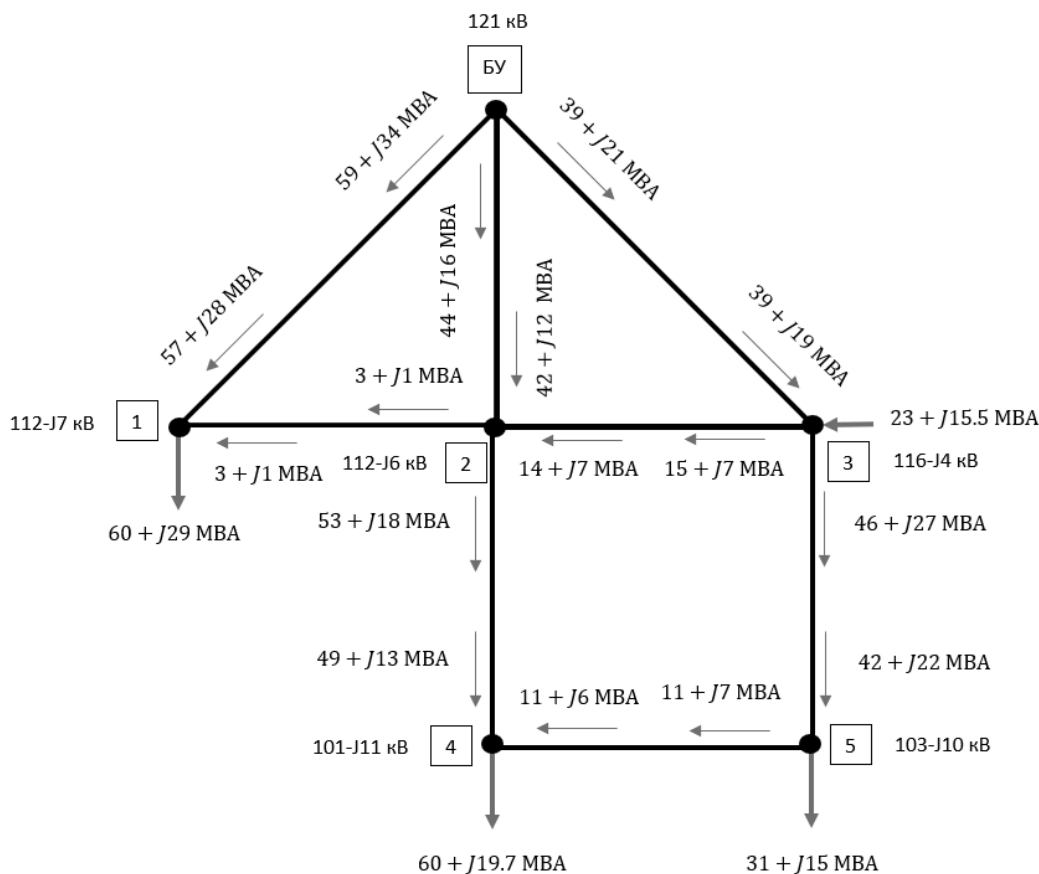


Рисунок 1 - Исходный режим электрической сети

Наименьшее напряжение наблюдается в узле 4. Следовательно, будем рассматривать влияние КУ на режим электрической сети путем установки СК и БСК в этом узле.

Установим СК мощностью 20 Мвар в узел 4 (для этого соответственно изменяем нагрузку в узле 4) и рассчитаем установившийся режим электрической сети в MathCAD. Начальные приближения напряжений принимаем, как и при расчете исходного режима 110 кВ. В качестве критерия окончания итерационного процесса принимаем разность между значениями напряжения на соседних итерациях. Результаты значений после 32 итерации представлены на рисунке 2, а ход итерационного процесса на рисунке 3.

$$U^{(32)} = \begin{pmatrix} 112.419 - 7.066i \\ 113.85 - 6.934i \\ 117.054 - 5.044i \\ 104.925 - 13.949i \\ 105.922 - 11.447i \end{pmatrix} \text{ кВ}$$

$$\begin{aligned} |U^{(32)}_1| &= 112.64 \text{ кВ} \\ |U^{(32)}_2| &= 114.061 \text{ кВ} \\ |U^{(32)}_3| &= 117.163 \text{ кВ} \\ |U^{(32)}_4| &= 105.848 \text{ кВ} \\ |U^{(32)}_5| &= 106.539 \text{ кВ} \end{aligned}$$

Рисунок 2 – Фрагмент с результатами расчета режима после установки СК

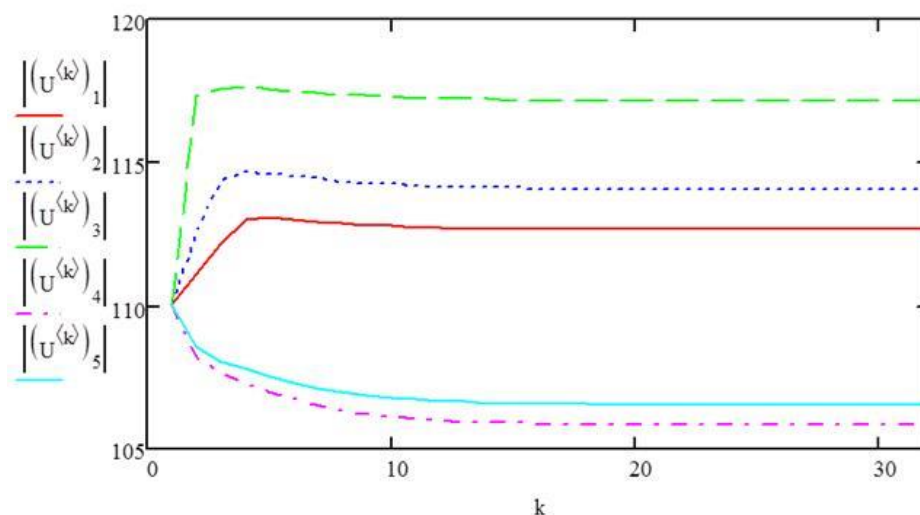


Рисунок 3 – Ход итерационного процесса расчета режима после установки СК

Для проверки полученных результатов выполним расчет данного режима в программе RastrWin3. Результаты расчета представлены на рисунке 4.

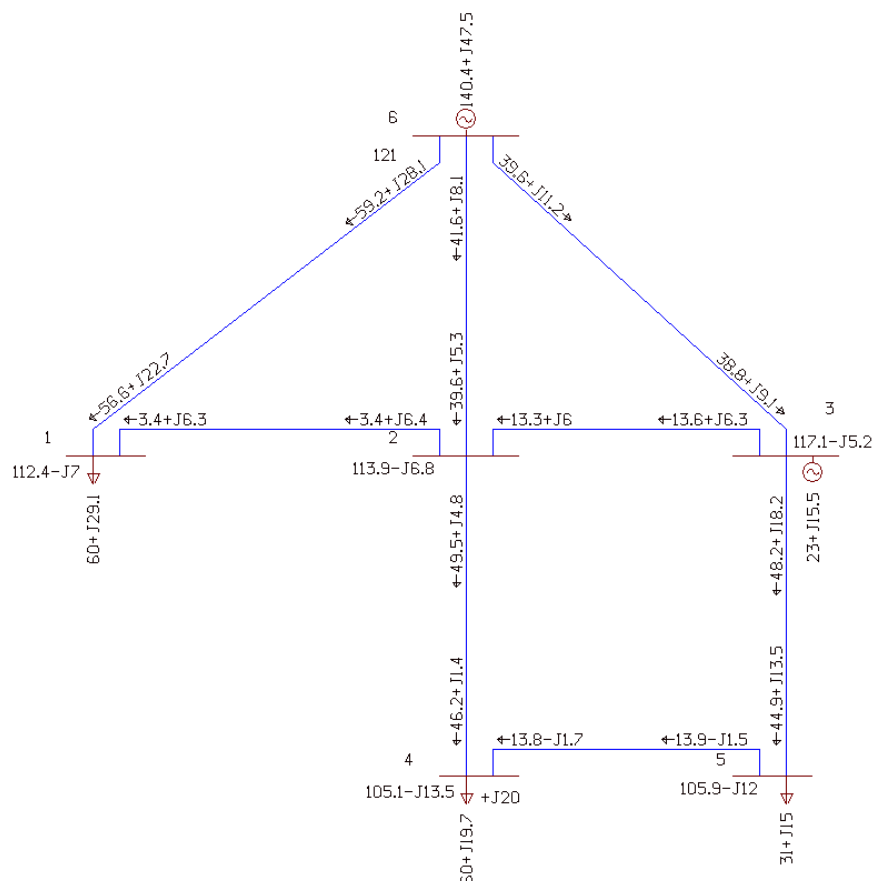


Рисунок 4 – Результаты расчета установившегося режима после установки СК

Установим БСК мощностью 20 Мвар в узел 4 (рассчитываем и добавляем соответствующую емкостную проводимость в узел 4) и рассчитаем установившийся режим электрической сети в MathCAD при тех же начальных условиях, как и предыдущие режимы. Результаты представлены на рисунках 5 и 6. Результаты расчета по программе RastrWin3 представлены на рисунке 7. Для сравнительного анализа основные режимные параметры сведены в таблицу 1.

$$B_{bsk} := j \cdot \frac{Q_{ku}}{110^2} = 1.653i \times 10^{-3} \text{ См}$$

$$U^{(33)} = \begin{pmatrix} 112.355 - 7.038i \\ 113.715 - 6.878i \\ 116.948 - 4.997i \\ 104.598 - 13.748i \\ 105.698 - 11.304i \end{pmatrix} \text{ кВ}$$

$$\begin{aligned} |U^{(33)}_1| &= 112.575 \text{ кВ} \\ |U^{(33)}_2| &= 113.923 \text{ кВ} \\ |U^{(33)}_3| &= 117.055 \text{ кВ} \\ |U^{(33)}_4| &= 105.498 \text{ кВ} \\ |U^{(33)}_5| &= 106.301 \text{ кВ} \end{aligned}$$

Рисунок 5 – Фрагмент с результатами расчета режима после установки БСК

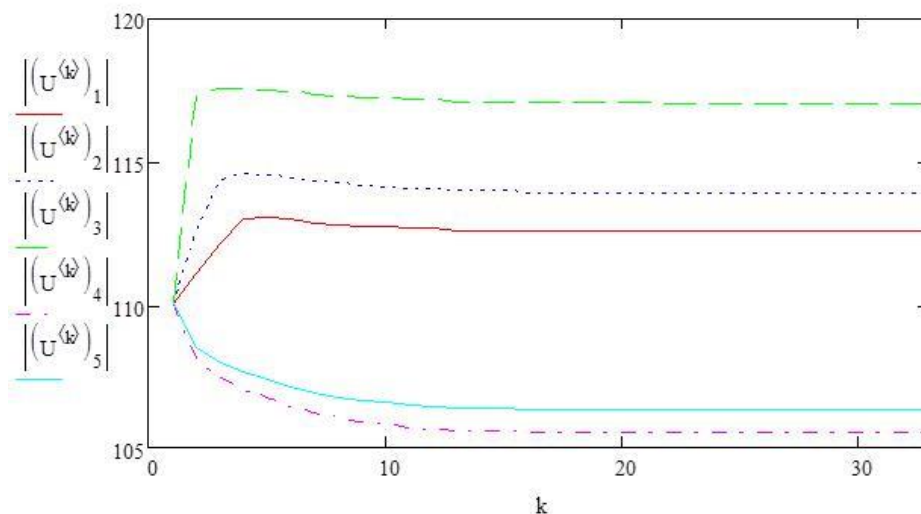


Рисунок 6 – Ход итерационного процесса расчета режима после установки БСК

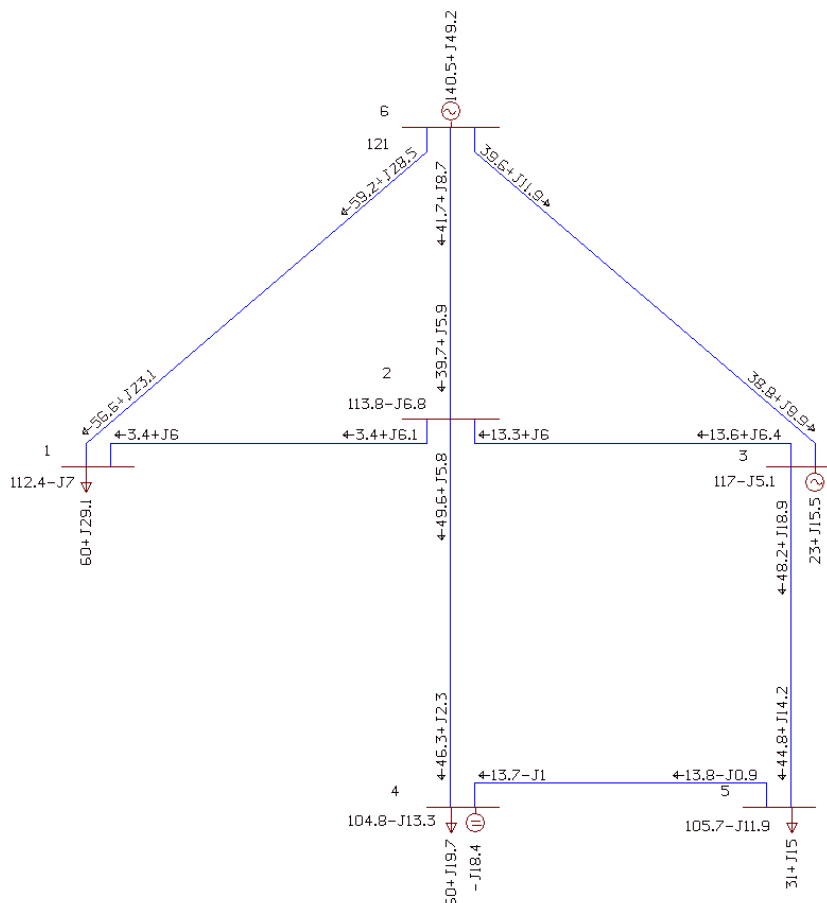


Рисунок 7 – Результаты расчета установившегося режима после установки БСК

Таблица 1

Режим	Модули напряжений, кВ					Суммарные потери активной мощности, МВт
	$ U_1 $	$ U_2 $	$ U_3 $	$ U_4 $	$ U_5 $	
Без КУ	112	112	116	101	103	14,161
СК	113	114	117	106	107	12,128
БСК	113	114	117	106	106	12,241

Заключение

По полученным результатам видно, что установка КУ благоприятно влияет на режим электрической сети. Все напряжения возросли и имеют допустимые значения, особенно сильно возросли напряжения непосредственно в узле установки КУ (узел 4), а также в узле 5. Суммарные потери активной мощности в сети снизились на 2 МВт. В режим с СК суммарные потери активной мощности несколько ниже чем в режиме с БСК. Это объясняется тем, что мощность БСК зависит от напряжения в узле. И так как напряжение в узле после установки БСК возросло (с 101 кВ до 106 кВ), но все его меньше номинального значения, то и БСК выдает в электрическую сеть меньше номинальной. Сравнив режимные параметры со значениями, полученными в программе RastrWin3, можно убедиться, что реализованный в MathCAD алгоритм расчета режима электрической сети переменного тока дает верные результаты.

Литература

1. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах: монография / Б.И. Аюев, В.В. Давыдов, П.М. Ерохин, В.Г. Неуймин; под ред. П.И. Бартоломея. – М.: Флинта : Наука, 2008. – 256 с.
2. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Изд. 2-е. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 715 с.

УДК 621.311

**АНАЛИЗ РАСЧЕТА РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ, НЕ-
ОБРАЩЕННОЙ И ОБРАЩЕННОЙ ФОРМ УРАВНЕНИЙ УЗЛОВЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ**
**ANALYSIS OF THE CALCULATION OF THE POWER SYSTEM MODE US-
ING THE NON-INVERTED AND INVERTED FORMS OF THE EQUATIONS
OF NODAL VOLTAGES**

А.А. Сташевский

Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

volkau@bntu.by

A. Stashevsky

Supervisor – A. Volkau

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: проведены расчеты и анализ сходимости режима электрической сети с помощью обращенной и необращенной форм уравнений узловых напряжений (УУН).

Abstract: analysis and calculations of the convergence of the power system mode are carried out using the inverted and non-inverted forms (UUN).

Ключевые слова: уравнения узловых напряжений, обращенная форма, необращенная форма, анализ сходимости.

Key words: nodal stress equations, inverted form, non-inverted form, convergence analysis.

Введение

Для анализа установившихся режимов работы энергосистемы используется математическая модель, представляющая собой систему уравнений. Эти уравнения, основанные на схемах замещения и физических законах, описывают состояние системы в установившемся режиме. В вычислительной практике наиболее часто применяются уравнения узловых напряжений (УУН) как форма представления уравнений установившегося режима (УУР). Уравнения узловых напряжений следуют из первого закона Кирхгофа, если все токи в ветвях выразить через узловые напряжения и проводимости ветвей. Число уравнений узловых напряжений равно числу независимых узлов ($n-1$).

Основная часть

Составим программу в MathCAD для решения необращенной формы УУН итерационным методом для системы, состоящей из 5 независимых узлов. Выполнение условия сходимости определяем через сравнение поперечной и продольной составляющих напряжения на двух соседних итерациях.

Фрагмент программы в MathCAD с УУН для первого узла показан на рисунке 1. Для остальных узлов уравнения составляются аналогично.

$$U_{u1,(i+1)} \leftarrow \frac{1}{Y_{1,1}} \left[\frac{(\bar{S}_1)}{U_{u1,i}} + U_{bu} (Y_{1,1} + Y_{1,2} + Y_{1,3} + Y_{1,4} + Y_{1,5}) - (Y_{1,2} \cdot U_{u2,i} + Y_{1,3} \cdot U_{u3,i} + Y_{1,4} \cdot U_{u4,i} + Y_{1,5} \cdot U_{u5,i}) \right]$$

Рисунок 1 – Фрагмент программы в MathCAD с УУН для первого узла

В результате расчета получили значения напряжений в узлах схемы электрической сети, значения которых представлены на рисунке 2.

	33	34	35	36
1	114.48-5.508i	114.48-5.508i	114.48-5.508i	114.48-5.508i
2	116.241-4.149i	116.241-4.149i	116.241-4.149i	116.241-4.149i
3	111.856-8.42i	111.856-8.42i	111.856-8.42i	111.856-8.42i
4	114.183-6.843i	114.184-6.843i	114.184-6.842i	114.184-6.842i
5	119.241-3.597i	119.241-3.597i	119.241-3.597i	...

$$|U_{u1,36}| = 114.613 \text{ кВ}$$

$$|U_{u2,36}| = 116.315 \text{ кВ}$$

$$|U_{u3,36}| = 112.173 \text{ кВ}$$

$$|U_{u4,36}| = 114.389 \text{ кВ}$$

$$|U_{u5,36}| = 119.295 \text{ кВ}$$

Рисунок 2 – Фрагмент программы с результатами расчета необращенной формы УУН

Составим программу для расчета обращенной формы УУН итерационным методом. Условия сходимости итерационного процесса и начальные приближения напряжений в узлах принимаем такими же как и в предыдущем расчете. . Фрагмент программы в MathCAD с обращенной формой УУН для первого узла показан на рисунке 3. Для остальных узлов уравнения составляются аналогично.

$$U_{u1,(i+1)} \leftarrow U_{bu} + \frac{Z_{(1,1)} \cdot (\bar{S})_1}{(U_{u1})_{1,i}} + \frac{Z_{(1,2)} \cdot (\bar{S})_2}{(U_{u1})_{2,i}} + \frac{Z_{(1,3)} \cdot (\bar{S})_3}{(U_{u1})_{3,i}} + \frac{Z_{(1,4)} \cdot (\bar{S})_4}{(U_{u1})_{4,i}} + \frac{Z_{(1,5)} \cdot (\bar{S})_5}{(U_{u1})_{5,i}}$$

Рисунок 3 – Фрагмент программы в MathCAD с обращенной формой УУН для первого узла

В результате расчета получили значения напряжений в узлах схемы электрической сети, значения которых представлены на рисунке 4.

U _{u1} =	110	114.786 – 5.944i	114.467 – 5.464i	114.483 – 5.51i	114.48 – 5.508i	114.48 – 5.508i
	110	116.612 – 4.297i	116.221 – 4.114i	116.243 – 4.149i	116.241 – 4.148i	116.241 – 4.149i
	110	112.349 – 8.863i	111.845 – 8.367i	111.859 – 8.422i	111.856 – 8.419i	111.857 – 8.419i
	110	114.541 – 7.014i	114.165 – 6.808i	114.186 – 6.843i	114.184 – 6.842i	114.184 – 6.842i
	110	119.793 – 2.963i	119.185 – 3.575i	119.244 – 3.593i	119.241 – 3.596i	119.241 – 3.596i

$$|U_{u1,6}| = 114.613 \text{ кВ}$$

$$|U_{u1,2,6}| = 116.315 \text{ кВ}$$

$$|U_{u1,3,6}| = 112.173 \text{ кВ}$$

$$|U_{u1,4,6}| = 114.389 \text{ кВ}$$

$$|U_{u1,5,6}| = 119.295 \text{ кВ}$$

Рисунок 4 – Фрагмент программы с результатами расчета обращенной формы УУН

По найденным значениям напряжениям в узлах рассчитаем остальные параметры режима. Угол между вектором напряжения в балансирующем узле и векторами напряжения в остальных узлах:

$$\begin{aligned}\delta_1 &:= \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(U\Delta_1)}{U_{6y} + \operatorname{Re}(U\Delta_1)}\right) \cdot \deg^{-1} = -2.754 & \delta_4 &:= \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(U\Delta_4)}{U_{6y} + \operatorname{Re}(U\Delta_4)}\right) \cdot \deg^{-1} = -3.429 \\ \delta_2 &:= \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(U\Delta_2)}{U_{6y} + \operatorname{Re}(U\Delta_2)}\right) \cdot \deg^{-1} = -2.044 & \delta_5 &:= \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(U\Delta_5)}{U_{6y} + \operatorname{Re}(U\Delta_5)}\right) \cdot \deg^{-1} = -1.728 \\ \delta_3 &:= \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(U\Delta_3)}{U_{6y} + \operatorname{Re}(U\Delta_3)}\right) \cdot \deg^{-1} = -4.305\end{aligned}$$

Потоки мощности в ветвях схемы:

$$S_n := \sqrt{3} \cdot (\operatorname{diag}(I_v)) \cdot U_n = \begin{pmatrix} 68.518 + 28.714i \\ 31.1 + 6.728i \\ 29.724 + 12.395i \\ 33.981 + 11.495i \\ -15.977 - 10.607i \\ -12.48 - 4.377i \\ -8.591 - 1.15i \\ -24.06 - 13.138i \end{pmatrix} \text{ MBA} \quad S_k := \sqrt{3} \cdot \operatorname{diag}(I_v) \cdot U_k = \begin{pmatrix} -67.245 - 24.452i \\ -30.613 - 5.488i \\ -29.409 - 11.34i \\ -33.682 - 10.494i \\ 16.326 + 10.969i \\ 12.609 + 4.599i \\ 8.742 + 1.307i \\ 24.674 + 14.441i \end{pmatrix} \text{ MBA}$$

Суммарные потери мощности в ветвях составили

$$\Delta S_{\Sigma} = 3.617 + 9.602i \text{ MBA}$$

Для проверки полученных результатов выполним контрольный расчет в программе RastrWin3. Исходные данные и результаты расчета представлены на рисунках 5, 6 и 7 и на схеме электрической сети на рисунке 8.

Узлы													
	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд
1			База	6		110		1			99,617	35,441	119,0
2			Нагр	1		110		1	50,00	16,434			114,613
3			Нагр	2		110		1					116,315
4			Нагр	3		110		1	38,00	12,490			112,173
5			Нагр	4		110		1	49,00	22,325			114,389
6			Нагр	5		110		1			41,000	25,410	119,295

Рисунок 5 – Исходные данные и результаты расчета электрической сети по узлам

Узлы													
	O	S	Тип	N_нач	N_кон	N_п	ID...	Название	R	X	P_нач	Q_нач	SI_нач
1			ЛЭП	6	1			-	3,27	10,94	-68,518	-28,713	68.518+J28.713
2			ЛЭП	6	2			-	6,80	17,35	-31,100	-6,727	31.1+J6.727
3			ЛЭП	1	2			-	9,71	16,65	12,480	4,378	12.48+J4.378
4			ЛЭП	1	3			-	3,99	13,37	-29,724	-12,395	29.724+J12.395
5			ЛЭП	2	4			-	3,15	10,53	-33,981	-11,495	33.981+J11.495
6			ЛЭП	2	5			-	12,84	13,32	15,977	10,607	15.977+J10.607
7			ЛЭП	3	4			-	25,25	26,20	8,591	1,150	8.591+J1.15
8			ЛЭП	4	5			-	10,69	22,68	24,060	13,138	24.06+J13.138

Рисунок 6 – Исходные данные и результаты расчета электрической сети по ветвям

Узлы Ветви Районы+Потери											
	№-н	Район	Dp	Dq	dP_нагр	dP_лэп	dP_тр	dP_пост	Ш_лэп	Ш_тр	dP_ш
		U_ном			dP_нагр	dP_лэп	dP_тр	dP_пост	Корона	XX_тр-р	
1	1		3,617	9,602	3,62	3,62					

Рисунок 7 – Потери мощности в электрической сети

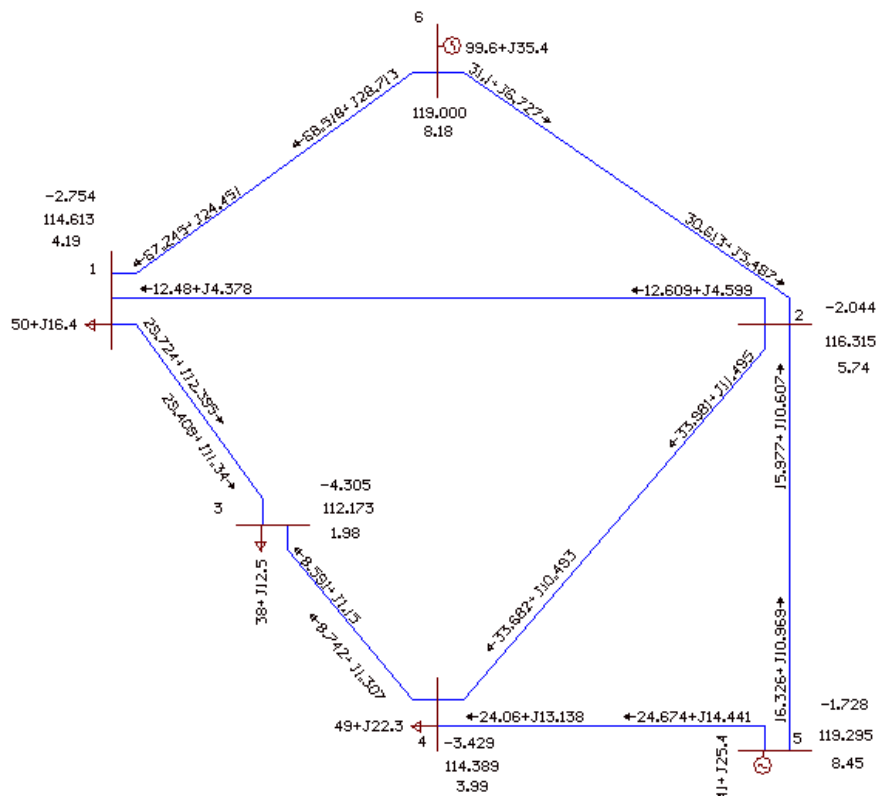


Рисунок 8 – Схема электрической сети с результатами расчета по программе RastrWin3

Заключение

В программе MathCAD реализованы алгоритмы для расчета установившегося режима электрической сети переменного тока с помощью необращенной и обращенной формы УУН. Решение системы УУН выполнено итерационным методом. Для сравнительного анализа результатов и скорости сходимости различных форм УУН начальные приближения и условие окончания итерационного процесса приняты одинаковыми. Расчет с помощью обращенной формы УУН показал более быструю сходимость (5 итераций по обращенной форме и более 30 итераций по необращенной). Параметры режима (напряжения, токи, потоки мощности и потери мощности) полученные в MathCAD и с помощью RastrWin3 совпадают.

Литература

1. Герасименко, А.А. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие [для вузов по направлению "Электроэнергетика"] / А.А. Герасименко, В.Т. Федин – Изд. 2-е. – Ростов-на-Дону: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2008. – 718 с.
2. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах: монография / Б.И. Аюев, В.В. Давыдов, П.М. Ерохин, В.Г. Неуймин; под ред. П.И. Бартоломея. – М.: Флинта: Наука, 2008. – 256 с.

УДК 621.311

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НЬЮТОНА ДЛЯ РАСЧЕТА УТЯЖЕЛЕННЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ. АНАЛИЗ МАТРИЦ ЯКОБИ В ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМАХ
APPLICATION OF NEWTON'S METHOD FOR CALCULATION OF HEAVY DUTY MODES OF ELECTRIC GRID. ANALYSIS OF JACOBI MATRICES IN LIMITING MODES

К.Е. Латышенко

Научный руководитель - А.А. Волков, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

volkau@bntu.by

K. Latyshenko

Supervisor – A. Volkau, Senior Lecturer

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: Статья рассматривает расчёт и анализ утяжелённых режимов электрической сети с помощью метода Ньютона.

Abstract: The article examines the calculations and analysis of heavy duty modes of electric grid using Newton's method.

Ключевые слова: метод Ньютона, утяжеление режима, матрица Якоби, электрическая сеть, сходимость, итерации.

Key words: Newton's method, mode weighting, Jacobi matrix, electric grid, convergence, iterations.

Введение

Метод Ньютона – основной метод решения системы нелинейных уравнений узловых напряжений. К достоинствам данного метода относят: малое количество итерация для получения решения, высокая надёжность, квадратичный характер приближения к решению.

Принимая во внимание вышеперечисленные достоинства метода Ньютона, он подходит для поиска предельных режимов электрической сети. Существует несколько способов утяжеление режима: отключение элементов, уменьшение напряжения в балансирующем узле и увеличение нагрузок в узлах электрической сети.

Основная часть

Поиск предельного режима выполним для электрической сети переменного тока, схема которой представлена на рисунке 1. Утяжеляем режим, увеличивая нагрузки. При этом используем понятие коэффициента утяжеления, который показывает во сколько раз нагрузки утяжелённого режима больше нагрузок нормального режима. Критерием окончания итерационного процесса принимаем небаланс мощностей, то есть разницу между заданными и рассчитанными нагрузками.

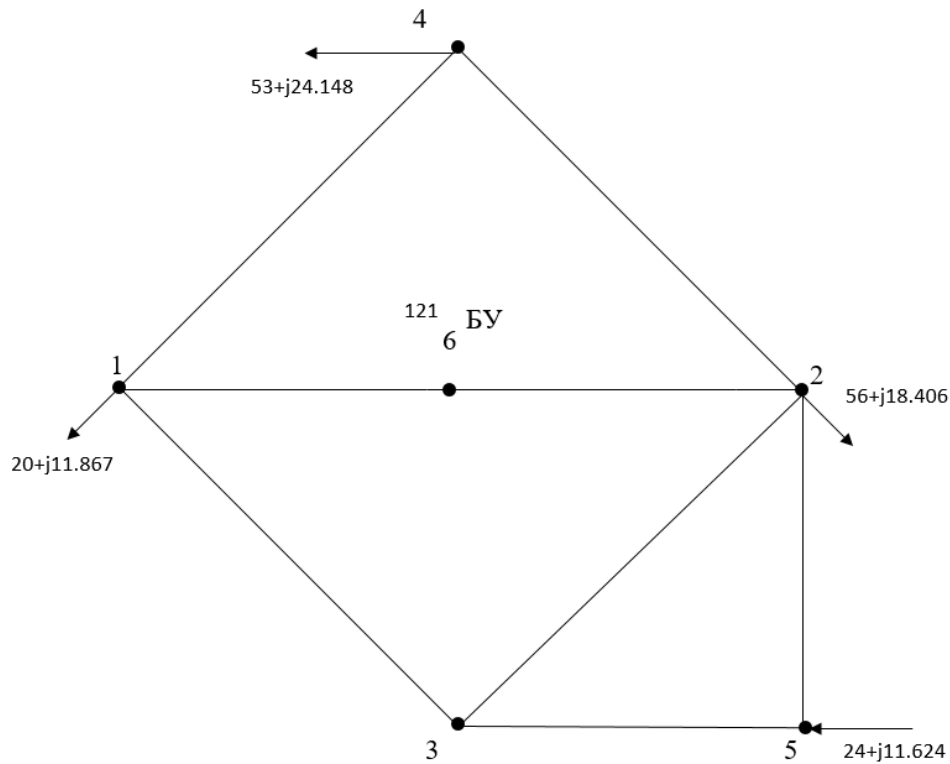


Рисунок 1 – Схема рассматриваемой электрической сети

Система уравнений узловых напряжений и матрица Якоби имеют вид:

$$F(U) = \begin{cases} \sum_{i=1}^5 (Y_{1,i} * U_i^k) - \frac{\bar{S}_1}{U_1^k} - U_{\text{БУ}} * \sum_{i=1}^5 Y_{1,i} \\ \sum_{i=1}^5 (Y_{2,i} * U_i^k) - \frac{\bar{S}_2}{U_2^k} - U_{\text{БУ}} * \sum_{i=1}^5 Y_{2,i} \\ \sum_{i=1}^5 (Y_{3,i} * U_i^k) - \frac{\bar{S}_3}{U_3^k} - U_{\text{БУ}} * \sum_{i=1}^5 Y_{3,i}; \\ \sum_{i=1}^5 (Y_{4,i} * U_i^k) - \frac{\bar{S}_4}{U_4^k} - U_{\text{БУ}} * \sum_{i=1}^5 Y_{4,i} \\ \sum_{i=1}^5 (Y_{5,i} * U_i^k) - \frac{\bar{S}_5}{U_5^k} - U_{\text{БУ}} * \sum_{i=1}^5 Y_{5,i} \end{cases}$$

$$Ya = \begin{pmatrix} Y_{1,1} + \frac{S_1}{(U_1^k)^2} & Y_{1,2} & Y_{1,3} & Y_{1,4} & Y_{1,5} \\ Y_{2,1} & Y_{2,2} + \frac{S_2}{(U_2^k)^2} & Y_{2,3} & Y_{2,4} & Y_{2,5} \\ Y_{3,1} & Y_{3,2} & Y_{3,3} + \frac{S_3}{(U_3^k)^2} & Y_{3,4} & Y_{3,5} \\ Y_{4,1} & Y_{4,2} & Y_{4,3} & Y_{4,4} + \frac{S_4}{(U_4^k)^2} & Y_{4,5} \\ Y_{5,1} & Y_{5,2} & Y_{5,3} & Y_{5,4} & Y_{5,5} + \frac{S_5}{(U_5^k)^2} \end{pmatrix}.$$

Решаем уравнения и увеличиваем коэффициент утяжеления с шагом 0,1. При коэффициенте утяжеления 2,8 режим еще сходится. Характер изменения определителя матрицы Якоби на каждой итерации представлен на рисунке 2.

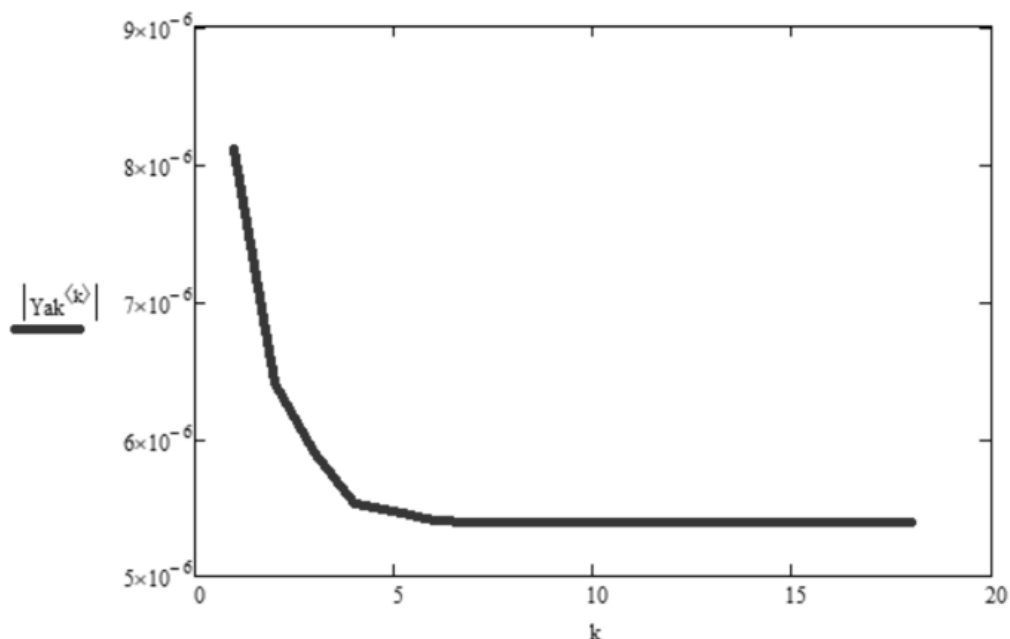


Рисунок 2 – Характер изменения определителя матрицы Якоби при сходимости итерационного процесса

Как видно из рисунка 2, скорость сходимости итерационного процесса большая. Определитель матрицы плавно стремится к определённому значению. Расчётные параметры сети изображены на рисунке 3:

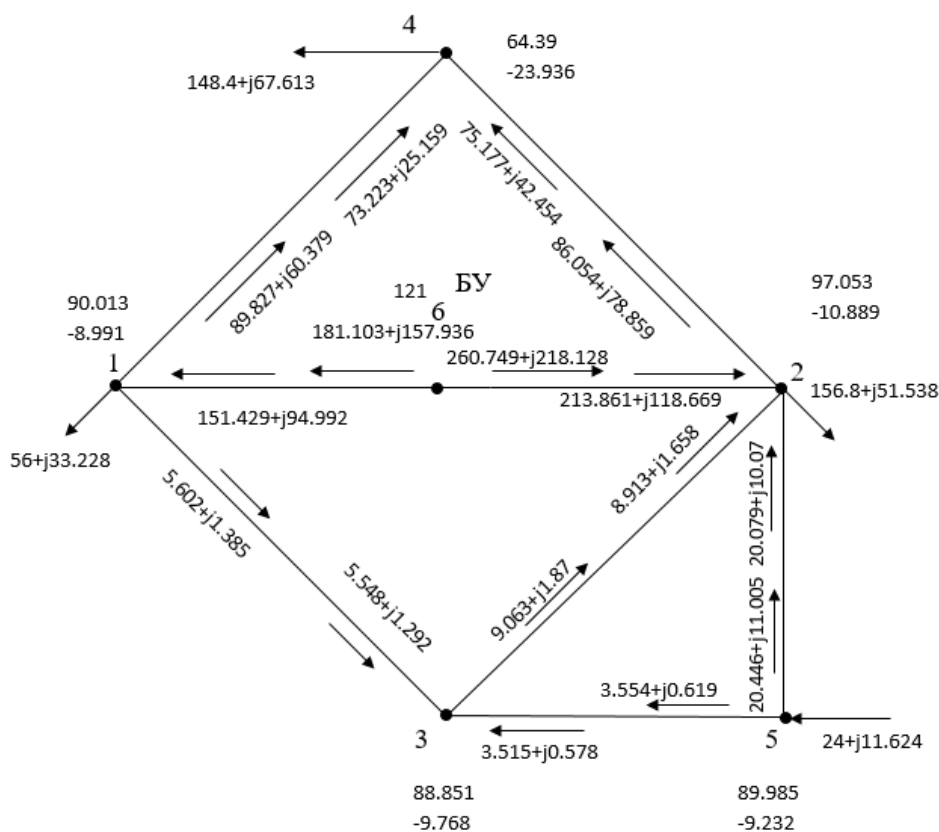


Рисунок 3 – Результаты расчета утяжеленного режима

Как видно из расчётных параметров практически такой режим не возможен, так как токи в ветвях и напряжения в узлах не входят в область допустимых значений. Выполним расчет режима при коэффициенте утяжеления 2,9. Изменение определителя матрицы Якоби на каждом шаге итерационного процесса показано на рисунке 4.

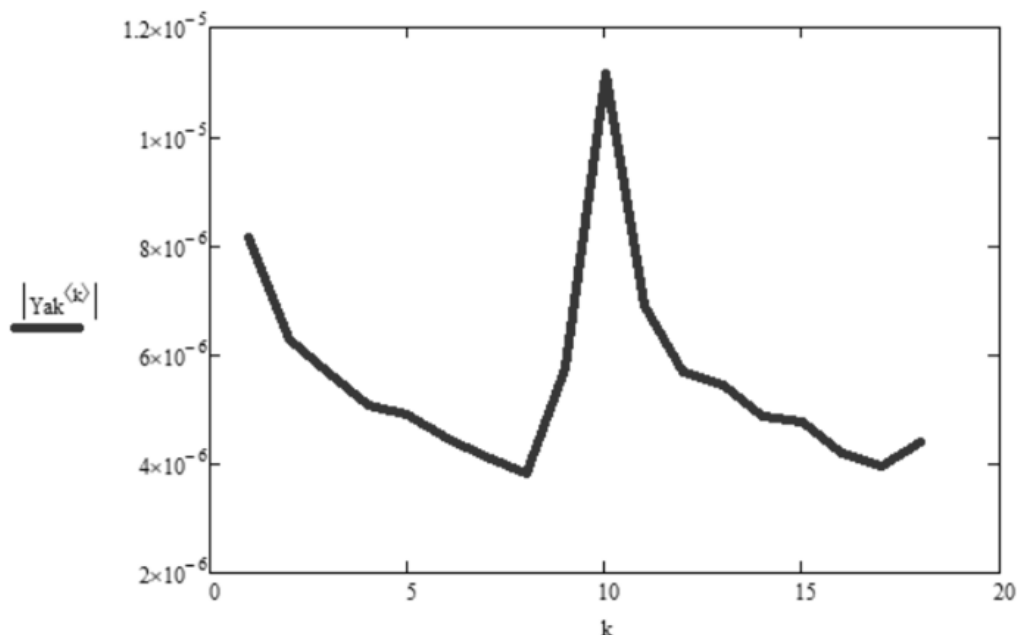


Рисунок 4 - График изменения определителя матрицы Якоби при расхождении итерационного процесса

Как видим из графика на 8 итерации определитель увеличивается относительно значений прошлых итераций, что говорит о расхождении режима на этой итерации.

Заключение

Метод Ньютона хорошо подходит для расчёта утяжелённых режимов электрической сети и нахождения границы сходимости. С помощью матрицы Якоби можно легко понять, что режим расходится. Данный метод можно заложить в основу автоматизированного расчёта утяжелённых режимов.

Литература

1. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах: монография / Б.И. Аюев, В.В. Давыдов, П.М. Ерохин, В.Г. Неуймин; под ред. П.И. Бартоломея. – М.: Флинта : Наука, 2008. – 256 с.
2. Алгоритмизация задач энергетики: учебное пособие / Т.Ю. Панковская, Е.П. Шалина. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2007. – 102 с.
3. Герасименко, А.А. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие [для вузов по направлению "Электроэнергетика"] / А.А. Герасименко, В.Т. Федин – Изд. 2-е. – Ростов-на-Дону: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2008. – 718 с.

УДК 621.316.91

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АККУМУЛЯТОРАХ. ЗАЩИТА ОТ
СКАЧКОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ АККУМУЛЯТОРА
TRANSIENT PROCESSES IN BATTERIES. PROTECTION FROM
BATTERY VOLTAGE SURGE**

Д.А. Степанов, Д.С. Чурко

Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

volkau@bntu.by

D. Stepanov, D. Churko

Supervisor – A. Volkov, Senior Lecturer

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: Скачки напряжения могут привести к повреждению электрических и электронных компонентов автомобилей, а также к сбоям в работе систем, зависящих от стабильного питания. В данной статье описываются методы и устройства, применяемые для защиты от таких скачков.

Abstract: Power surges can damage electrical and electronic components in your car, and cause malfunctions in systems that depend on a stable power supply. This article discusses methods and devices used to protect against such surges.

Ключевые слова: аккумулятор, напряжение, нагрузка.

Keywords: battery, voltage, load.

Введение

В современных автомобилях используют большое количество электроники, например, блоки управления, информационные системы и датчики. Все эти устройства питаются от бортовой электросети, состоящей из автомобильного аккумулятора, накапливающего энергию, и генератора переменного тока, который во время работы вырабатывает электричество. Аккумулятор играет здесь не только роль источника энергии, но и важнейшего стабилизатора напряжения. Он сглаживает пульсации переменного тока, вырабатываемого генератором, обеспечивая стабильное напряжение для чувствительной электроники. Более того, аккумулятор способен обеспечить кратковременные импульсы тока высокой мощности, необходимые для запуска двигателя. Однако, такая сложная электронная часть автомобиля подвержена воздействию различных переходных процессов. Источники этих процессов разнообразны: сам генератор переменного тока, работающий на высоких частотах, система зажигания двигателя, генерирующая мощные импульсы напряжения, индуктивные процессы при переключении электрических цепей, и, наконец, особенно опасные переходные процессы, возникающие при резком сбросе нагрузок.

Основная часть

Переходный процесс, возникающий в бортовой сети автомобиля при отключении аккумулятора, но подключенном генераторе, представляет собой значительную проблему. Этот процесс характеризуется резким скачком напряжения, возникающим в момент разрыва цепи, когда генератор продолжает работать, а

аккумулятор, возможно, разряжен и уже не способен компенсировать колебания. Амплитуда этого пикового напряжения может быть очень большой: до 120 В. Это примерно в десятки раз превышает номинальное напряжение бортовой сети автомобиля.

Продолжительность такого импульса также значительна — до 400 миллисекунд. Хотя этот пик и достигает 120 В, на практике регистрируются значения порядка 40 В для легковых автомобилей и около 60 В для грузовых. График изменения напряжения на шине изображен на рисунке 1.

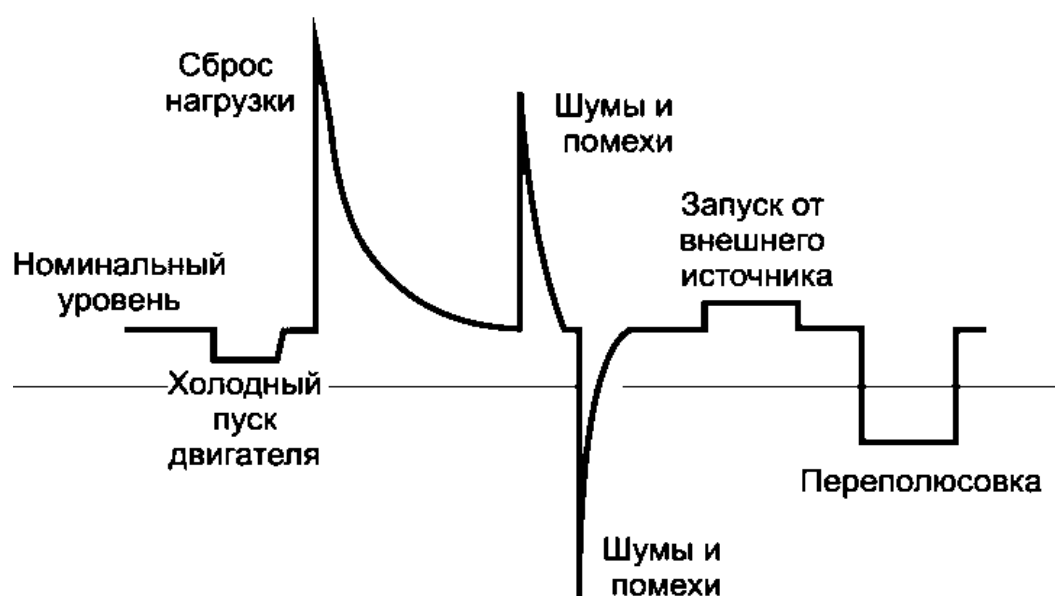


Рисунок 1 – График изменения напряжения на шине питания от автомобильного аккумулятора

Для защиты от подобных явлений необходимы специальные устройства. Этими устройствами являются повышающие и понижающие *DC*-преобразователи. Они должны обладать уникальными свойствами, позволяющими им справляться с огромным диапазоном входных напряжений. Рассмотрим подробнее требования к таким преобразователям. Для начала, они должны работать как в режиме повышения, так и в режиме понижения напряжения. В момент отключения аккумулятора входное напряжение может резко возрасти до 42 Вольт (в 12-вольтовой системе) и выше [1].

Преобразователь должен не только выдержать это напряжение, не выходя из строя, но и эффективно понизить его до стабильного выходного значения, необходимого для питания электронных систем автомобиля. Также преобразователь должен обеспечить бесперебойное питание даже в условиях крайне низкого входного напряжения. Например, во время запуска двигателя напряжение на аккумуляторе может временно падать до 4 Вольт и даже ниже из-за высокого потребления тока стартером. В этом режиме преобразователь должен повысить напряжение до требуемого уровня, обеспечив стабильную работу электронных систем. Стоит отметить, что перепутывание проводов при подключении аккумулятора может привести к серьезным повреждениям, вплоть до полного выхода из строя *DC*-преобразователя и другой электроники.

Распределение возможных воздействующих напряжений при питании оборудования автомобиля от аккумулятора можно увидеть на рисунке 2.

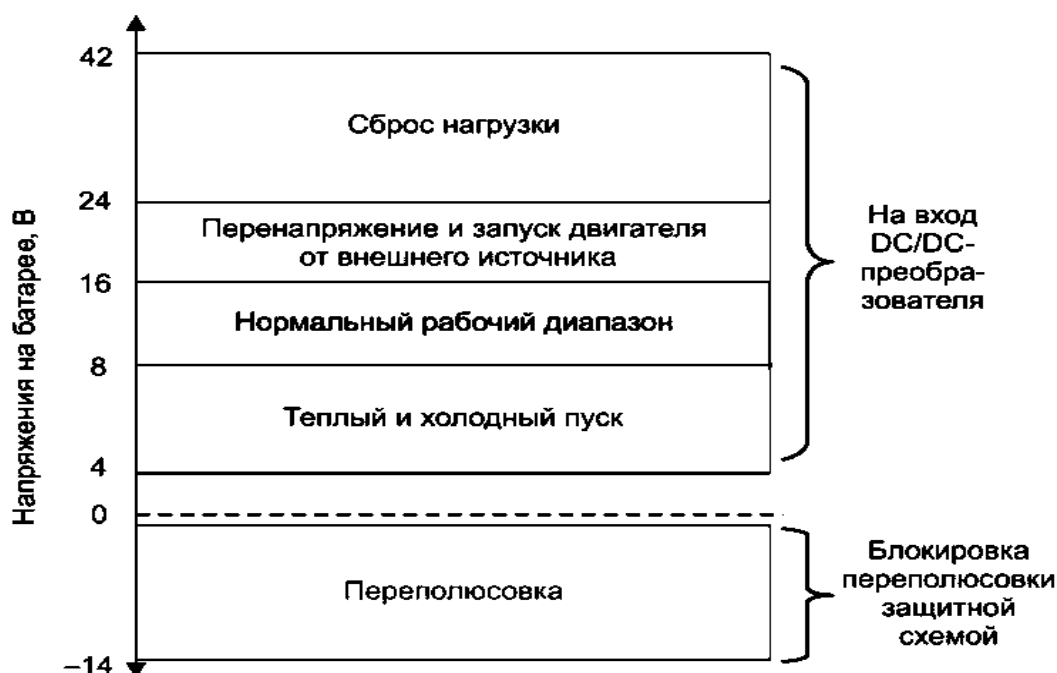


Рисунок 2 – Распределение возможных воздействующих напряжений при питании электронного оборудования автомобиля от аккумулятора

DC-преобразователь, основанный на контроллере *LM5175*, имеет широкий диапазон входных напряжений. Благодаря возможности использования четырех ключей, способен как повышать, так и понижать входное напряжение. Данный преобразователь может поддерживать стабильное выходное напряжение даже в тех случаях, когда входное напряжение совпадает с выходным. Упрощенная схема подключения и временные диаграммы переключения ключей для всех режимов работы представлены на рисунке 3.

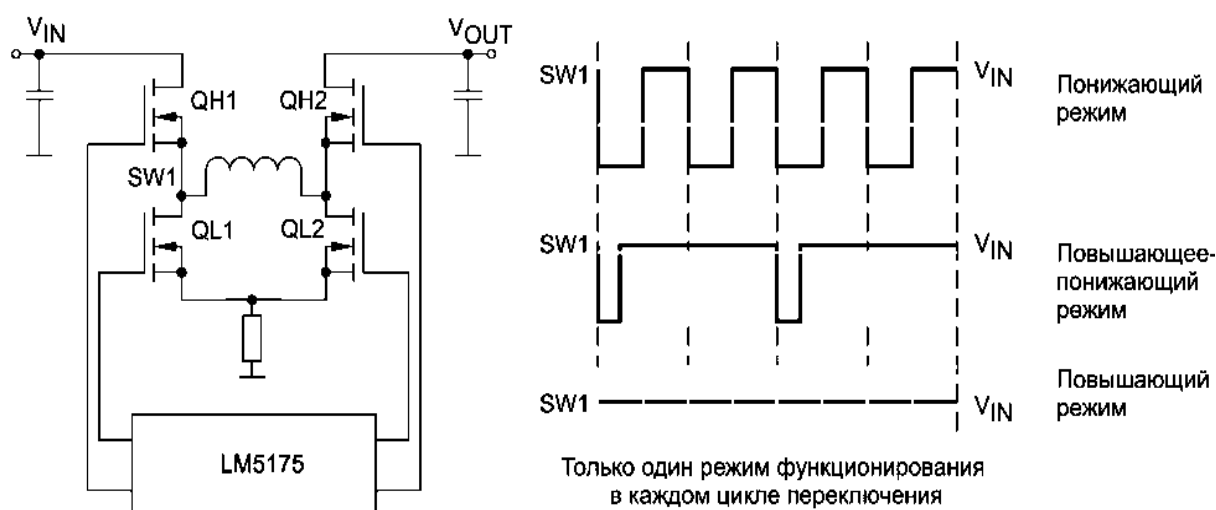


Рисунок 3 – Четырехключевой DC-преобразователь с широким диапазоном входного напряжения V_{IN}

Этот преобразователь напряжения представляет собой устройство, работающее в двух режимах: понижения и повышения напряжения.

Его ключевая особенность – использование проходного режима в выходном каскаде, что сильно увеличивает энергоэффективность. Механизм работы достаточно сложен и зависит от соотношения входного (V_{IN}) и выходного (V_{OUT}) напряжений. Когда входное напряжение V_{IN} ниже желаемого выходного напряжения V_{OUT} , преобразователь функционирует в режиме повышения. В этом режиме входной каскад работает в режиме прямой проводимости, обеспечивая повышение напряжения до необходимого уровня. Однако, когда входное напряжение V_{IN} приближается к значению выходного напряжения V_{OUT} , для обеспечения плавной работы, преобразователь переключается между режимами повышения и понижения [2].

В режиме понижения напряжения, когда V_{IN} выше V_{OUT} , происходит обратный процесс. Преобразователь снижает входное напряжение до требуемого выходного уровня. Этот режим также реализован с использованием проходного режима каскада. Ключевое отличие от простого понижающего преобразователя заключается в способности работать и в режиме повышения.

Стоит отметить, что рассматриваемый преобразователь демонстрирует высокую устойчивость как к снижениям, так и к повышениям входного напряжения. Это делает его просто идеальным решением для различных приложений, где требуется стабильное выходное напряжение. Для автомобильных применений, особенно когда требуется выходное напряжение выше номинального, данный преобразователь обладает рядом преимуществ. Во-первых, он обеспечивает низкий уровень пульсаций на входе, что критично для чувствительных электронных компонентов автомобиля. Во-вторых, в него интегрированы важные защитные механизмы, такие как защита от перегрузки и короткого замыкания.

Использование повышающего каскада в данном преобразователе имеет еще одно достоинства: отпадает необходимость в использовании громоздких и дорогостоящих пассивных низкочастотных фильтров. Эти фильтры необходимы для подавления высокочастотных помех, наводимых на 12-вольтовую шину автомобиля из-за выпрямления переменного тока от генератора. В итоге, данный преобразователь представляет собой высокоэффективное и надежное устройство, способное обеспечить стабильное выходное напряжение в широком диапазоне. Его высокая энергоэффективность, встроенные защитные функции и отсутствие необходимости в дополнительных фильтрах делают его прекрасным решением для различных применений.

Заключение

Защита от скачков напряжения является неотъемлемой частью обеспечения надежной работы автомобиля. Специальные защитные схемы, включая предохранители, варисторы и другие элементы, предназначены для ограничения амплитуды и длительности скачков напряжения, предотвращая повреждение аккумулятора и связанной с ним электроники. Кроме того, современные системы управления зарядом активно контролируют процесс зарядки и разрядки, оптимизируя его для минимизации негативного влияния переходных процессов. Эти системы могут корректировать ток заряда и разряда в зависимости от состояния аккумулятора. Глубокое понимание переходных процессов в аккумуляторах и применение современных защитных технологий и систем управления зарядом –

это залог долговечности и надежной работы как самих аккумуляторов, так и энергосистем в целом.

Литература

1. Рентюк В. Решения устойчивого к переходным процессам первичного *DC/DC*-преобразователя системы питания автомобильной электроники / В. Рентюк // Силовая электроника. – Санкт-Петербург, 2017. - № 3. – С. 30 – 34.
2. Устройство авто аккумулятора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://shinadiski.com.ua/read/ustroystvo-avto-akkumulyatora>. – Дата доступа: 07.05.2025.

УДК 621.3

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ INNOVATIVE MEASUREMENT METHODS IN THE ENERGY SECTOR

Сидоренко И.С.

Научный руководитель – Ринговский И.А., ассистент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

eie@bntu.by

Sidorenko I.

Supervisor – Ringovsky I., Assistant

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. Статья даёт обзор ключевых инновационных методов, применяемых для мониторинга и управления энергетическими системами, описывая их принципы работы и области применения. PMU обеспечивают синхронные измерения фазовых с высокой частотой, волоконно-оптические датчики – распределённый мониторинг температуры и деформации, а лидар – бесконтактную оценку ветрового потенциала. Инспекции линий с помощью дронов и тепловизоров повышают надёжность, цифровые двойники и АМІ выводят аналитику и управление на новый уровень, а NILM позволяет безвредно дисагрегировать нагрузку без установки дополнительных сенсоров.

Abstract. The article gives an overview of key innovative methods used for monitoring and control of power systems, describing their operating principles and applications. PMUs provide high frequency synchronous phasor measurements, fibre optic sensors provide distributed temperature and strain monitoring, and lidar provides non-contact wind potential assessment. Line inspections with drones and thermal imagers increase reliability, digital twins and AMIs take analytics and control to a new level, and NILM enables harmless load disaggregation without installing additional sensors.

Ключевые слова: фазориметрия, цифровые двойники, энергодисагрегация, волоконно-оптические датчики, LiDAR, беспилотники, тепловизионная инспекция линий электропередачи

Keywords: Phasor Measurement Units, digital twins, energy disaggregation, fibre optic sensors, LiDAR, drones, thermal imaging inspection of power transmission lines.

Введение

Точная и своевременная информация о состоянии энергетических систем критична для их эффективного управления и надёжности. В условиях роста интеграции возобновляемых источников и децентрализации производства данные необходимо собирать в реальном времени, охватывая широкие территории и разнообразные параметры. В статье рассматриваются новейшие методы измерений, включая фазориметры (PMU), волоконно-оптические датчики, лидар для оценки ветрового потенциала, инспекции линий электропередачи с помощью беспилотников и тепловизоров, цифровые двойники, продвинутые системы интеллектуального учёта (AMI) и безвредный мониторинг нагрузки (NILM). В со-

вокупности эти технологии создают основу для «умных сетей», способных адаптироваться к динамике нагрузки и обеспечивать оптимальное использование ресурсов.

Основная часть

1. Фазориоометрия (Phasor Measurement Units)

Phasor Measurement Unit (PMU) – это устройство, измеряющее так называемый фазор, который содержит информацию о величине и угле фазы переменного тока или напряжения в конкретной точке сети. Используя глобальную навигационную спутниковую систему (GPS), PMU проставляют точные временные метки каждому измерению, что позволяет синхронизировать данные с разных точек сети и получать широкозонную картину состояния энергосистемы

1.1. Применение и преимущества

синхронный мониторинг. PMU обеспечивают измерения с частотой до 30–60 выборок в секунду, что позволяет оперативно обнаруживать нестабильность и проводить анализ переходных процессов.

контроль частоты и угловой стабильности. Приборы используются для оценки угла между фазами генераторов и контроля угловых расстройств, предотвращая аварии.

интеграция в WAMS. Широкомасштабные системы мониторинга (Wide Area Monitoring Systems) на основе PMU повышают надёжность и гибкость управления сетями.

2. Волоконно-оптические датчики

Волоконно-оптические датчики используют физические свойства света в оптическом волокне для измерения температуры, деформации, ускорения и других параметров по всей длине кабеля. Благодаря возможности размещать сотни точек измерений на одном волокне, такие системы идеальны для структурного мониторинга и контроля состояния инфраструктуры.

2.1. Гибридные решения «питание-чувствование»

Недавние исследования демонстрируют возможность одновременной передачи энергии и выполнения распределённого акустического зондирования в одном волокне (Power-over-Fiber + DAS), что упрощает инфраструктуру и снижает издержки.

3. Лидар в ветроэнергетике

LiDAR (Light Detection and Ranging) применяется для бесконтактного измерения скорости и направления ветра с помощью лазерных импульсов. Наземные лидары посылают лучи и анализируют доплеровское смещение обратно рассеянного света, что позволяет получать профиль ветра на различных высотах.

3.1. Банковская оценка ветрового ресурса

Вертикальные лидары признаны «банковыми» инструментами для оценки ветрового потенциала при развитии ветропарков, так как они дают надёжные данные и быстро разворачиваются на площадке

4 Беспилотники и тепловая инспекция

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с тепловизионными камерами используются для инспекции линий электропередачи и подстанций. Тепловизоры регистрируют инфракрасное излучение, выявляя участки перегрева, что

позволяет обнаружить повышенное контактное сопротивление и аномалии ещё до возникновения отказа.

4.1. Практические кейсы

Исследователи ORNL продемонстрировали, что дроны с камерами и дополнительными датчиками могут эффективно и безопасно обследовать линии электропередачи, сокращая затраты и время на инспекцию.

5. Цифровые двойники (Digital Twins)

Digital Twin – виртуальная копия физического объекта или процесса, непрерывно обновляемая данными в реальном времени. Энергетические цифровые двойники способствуют повышению эффективности и надёжности систем за счёт моделирования различных сценариев работы и прогнозирования неисправностей.

5.1. Энергоэффективность и управление

Исследование MDPI подчёркивает, что цифровые двойники позволяют более точно и проактивно управлять потреблением энергии, что ведёт к снижению затрат и уменьшению выбросов CO₂.

6. Продвинутая инфраструктура интеллектуального учёта (AMI)

Advanced Metering Infrastructure (AMI) – интегрированная система «умных» счётчиков, сетей связи и ПО для двустороннего обмена данными между потребителем и поставщиком энергии.

6.1. Эволюция AMI и «AMI 2.0»

Новая генерация AMI (AMI 2.0) включает вычисления на периферии сети (edge computing), что обеспечивает почти мгновенный анализ данных и повышает устойчивость сети при интеграции возобновляемых источников.

6.2. БПЛА для сбора показаний

В качестве передового решения предлагаются системы на основе роя беспилотников для автономного и энергоэффективного сбора данных со «умных» счётчиков в труднодоступных районах.

7. Безвредный мониторинг нагрузки (NILM)

Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) или энергодисагрегация анализирует совокупные сигналы тока и напряжения и определяет индивидуальное потребление каждого прибора без установки дополнительных датчиков.

7.1. Преимущества и применение

NILM позволяет дешёво и эффективно отслеживать эксплуатацию бытовых и промышленных объектов, поддерживать программы по снижению нагрузок и оптимизировать энергопотребление.

Заключение

Современная энергетика всё активнее внедряет инновационные методы измерений, которые повышают устойчивость, надёжность и эффективность систем. Синхронные фазореоометры, распределённые оптические и лазерные технологии, дроны, цифровые двойники, передовые счётчики и NILM создают основу «умных» энергосистем будущего. Ожидается дальнейшее слияние этих методов с искусственным интеллектом и Интернетом вещей, что откроет новые горизонты для мониторинга и управления энергопотреблением.

Литература

1. Rodriguez, J., & Singh, M. «Phasor Estimation and Modelling Techniques of PMU – A Review.» *Procedia Computer Science*, 2017.
2. Zeni, L., & Kozlowski, T. “Distributed Optical Fibre Sensors for Infrastructure Monitoring.” *Measurement*, 2021.
3. Савкова, Е. Н. , Ринговский, И. А. Электронный учебно-методический комплекс по учебной дисциплине «Метрология, стандартизация и оценка соответствия» – 2025.
4. Lee, J., & Kim, S. «Online Non-Intrusive Load Monitoring: A Review.» *Electric Power Systems Research*, 2024.
5. Richards, J., et al. «Protecting Electric Grid Health with Drone-Based Power Line Inspection.» *Oak Ridge National Laboratory News*, August 27, 2024.

УДК 621.3

НАУЧНЫЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ НИКОЛЫ ТЕСЛЫ SCIENTIFIC INVENTIONS OF NIKOLA TESLA

Д.Р. Лупач

Научный руководитель - В.В. Зеленко, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

zelenko@bnty.by

D.R. Lupach

Scientific supervisor – V. V. Zelenko, senior lecturer

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Аннотация:** Никола Тесла и его научные достижения.*Abstract:** Nikola Tesla and his scientific achievements.****Ключевые слова:** Начало карьеры, основные открытия, катушка Теслы, современное применение.****Keywords:** The beginning of a career, major discoveries, Tesla coil, modern application.*

Введение

Никола Тесла – один из величайших изобретателей в истории, чьи работы изменили мир. Его вклад в науку и технику трудно переоценить: он заложил основы современной электроэнергетики, радиосвязи и даже беспроводных технологий. Но путь к славе был непростым.

Юность и первые шаги в науке

Тесла родился 10 июля 1856 года в маленьком селе Смилян, которое тогда входило в состав Австрийской империи (сейчас это Хорватия). С детства он проявлял необычайные способности к математике и физике, а особенно его увлекало электричество. После школы он поступил в Высшее реальное училище в Карловце, а затем – в Технический университет Граца. Именно там он впервые задумался о несовершенстве существующих электродвигателей и начал разрабатывать идею переменного тока.

Работа в Европе и переезд в Америку

В 1881 году Тесла устроился инженером в Будапештскую телефонную компанию, где сделал своё первое важное открытие — принцип вращающегося магнитного поля, который стал основой для его будущих изобретений. Через год он перебрался в Париж, работая в Continental Edison Company, где занимался усовершенствованием электрооборудования. Его талант заметили, и в 1884 году по рекомендации коллег он отправился в Нью-Йорк — покорять Америку.

Конфликт с Эдисоном и собственный путь

Первое время Тесла работал у Томаса Эдисона, но их взгляды на электричество разошлись. Эдисон делал ставку на постоянный ток (DC), а Тесла верил в

будущее переменного (АС). Их противостояние вошло в историю как «Война токов». В итоге Тесла ушёл от Эдисона и в 1887 году основал собственную компанию – **Tesla Electric Company**.

Триумф переменного тока

Именно тогда Тесла совершил прорыв: он разработал многофазные системы переменного тока, создал первые эффективные генераторы и трансформаторы, а также изобрёл асинхронный электродвигатель. Его технологии привлекли внимание промышленника Джорджа Вестингауза, и в 1893 году на Всемирной выставке в Чикаго система Теслы наглядно доказала своё превосходство. С этого момента **переменный ток стал мировым стандартом**.

Радио, беспроводная энергия и катушка Теслы

Но на этом Тесла не остановился. Он экспериментировал с передачей энергии без проводов, построив знаменитую башню **«Варденклифф»**. Хотя проект не был завершён, его идеи легли в основу современных беспроводных технологий. Он также изобрёл **катушку Теслы**, генерирующую мощные электрические разряды, и внёс вклад в развитие радио — хотя официально патент достался Маркони, позже Верховный суд США признал приоритет Теслы.

Изобретения Николы Теслы

1. Система переменного тока – это комплекс электротехнических устройств для генерации, передачи и потребления электрической энергии, где напряжение и ток периодически изменяют направление и величину по гармоническому закону (обычно синусоидально). Разработанная Теслой многофазная система переменного тока стала технологической основой современной энергетики. Конструкция включала:

- генераторы переменного тока;
- трансформаторы для изменения напряжения;
- асинхронные двигатели;
- системы передачи и распределения.

Технические параметры:

- Частота: 50-60 Гц (стандартизировано позднее);
- Напряжение: до 110 000 В (в первых промышленных образцах);
- КПД системы: 85-90% (против 30-40% у систем постоянного тока);

Эксплуатационные преимущества:

- Возможность трансформации напряжения
- Меньшие потери при передаче на расстояние
- Более простая конструкция двигателей

2. Катушка Теслы (резонансный трансформатор Теслы) – это высокочастотный резонансный трансформатор с воздушным сердечником, создающий высокое напряжение при высокой частоте, способный генерировать эффектные электрические разряды в воздухе. Резонансный трансформатор с воздушным сердечником. Технические характеристики:

Конструктивные элементы:

- Первичная обмотка (3-5 витков толстого провода)
- Вторичная обмотка (100-1000 витков тонкого провода)
- Разрядник (искровой промежуток)

– Конденсатор

Принцип действия:

- Зарядка конденсатора от источника
- Пробитие искрового промежутка
- Возникновение колебаний в первичном контуре
- Индукция высокого напряжения во вторичной обмотке
- Образование коронного разряда

3. Асинхронный двигатель (индукционный двигатель) – это электрическая машина переменного тока, в которой вращающееся магнитное поле статора индуцирует ток в роторе, создавая вращающий момент без электрического контакта между неподвижной и вращающейся частями.

Конструктивные особенности:

- Статор с многофазной обмоткой
- Короткозамкнутый ротор ("беличье колесо")
- Отсутствие коллектора и щеток

Технические параметры:

- КПД: 75-95% (в зависимости от мощности)
- Коэффициент мощности: 0,7-0,9
- Пусковой момент: 1,5-2,5 от номинального

Принцип работы:

- Образование вращающегося магнитного поля статором
- Наведение токов в роторе
- Взаимодействие магнитных полей
- Возникновение вращающего момента

4. Радиопередача – процесс целенаправленного излучения и распространения электромагнитных волн радиодиапазона (от 3 кГц до 3000 ГГц) через пространство с целью передачи информации без проводных соединений.

Техническая реализация:

- Передающий контур с катушкой Теслы
- Приемный контур с детектором
- Земля в качестве проводника

Частотные характеристики:

- Диапазон: 10-100 кГц (в первых опытах)
- Дальность: до 50 км (в экспериментах)

5. Турбина Теслы – это безопасная роторная машина, преобразующая энергию потока жидкости или газа в механическое вращение за счёт вязкостного трения и адгезии рабочего тела к дискам ротора.

Конструктивные параметры:

- Диаметр дисков: 15-40 см (в экспериментальных моделях)
- Количество дисков: 8-15
- Зазор между дисками: 0,5-2 мм
- Рабочие характеристики:
 - Скорость вращения: 10 000-35 000 об/мин
 - Расход рабочего тела: 20-100 кг/ч
 - Давление на входе: 5-15 атм

6. Система беспроводной передачи энергии (WPT - Wireless Power Transmission) – это технология передачи электрической энергии без использования проводных соединений. Тесла разрабатывал эту концепцию в 1890-1901 годах, предлагая использовать:

- Электромагнитную индукцию (ближнее поле)
- Резонансные явления
- Проводимость земной атмосферы (дальняя передача)

7. Устройство передачи энергии на расстояние (1930-е гг.)

Заявленные характеристики:

- Дальность действия: до 400 км
- Энергия пучка: до 100 МДж
- Фокусировка: электростатическая линза
- Источник питания: высоковольтный генератор

Заключение

Изобретения Николы Теслы стали основой технологического прогресса XX и XXI веков. Его идеи, казавшиеся фантастическими в конце XIX века, сегодня лежат в основе всей современной электроэнергетики, радиосвязи, беспроводных технологий и промышленной автоматизации.

Ключевые достижения и их значение:

- Система переменного тока (АС) – сделала возможной массовую электрификацию, заменив неэффективные сети постоянного тока.
- Асинхронный двигатель – стал стандартом для промышленности благодаря простоте и надежности.
- Катушка Теслы – продемонстрировала принципы резонанса и беспроводной передачи энергии, вдохновив развитие радиосвязи и беспроводных технологий.
- Турбина Теслы – несмотря на незавершенность, остается перспективной технологией для альтернативной энергетики.
- Беспроводная передача энергии – идея, которая только сейчас начинает реализовываться в виде беспроводных зарядок и экспериментальных энергосистем.

Актуальность идей Теслы сегодня.

Современные технологии постепенно догоняют его видение:

- Беспроводная энергия (зарядка гаджетов, электромобилей).
- Экологичная энергетика (турбины, работающие на новых принципах).
- Теслу часто называют «человеком, который изобрел будущее». Его наследие продолжает вдохновлять ученых, инженеров и изобретателей, доказывая, что даже самые смелые идеи рано или поздно находят свое воплощение.

Литература

1. Музей Теслы в Белграде. (<https://tesla-museum.org>)
2. "Tesla: Man Out of Time" by M. Cheney.
3. (https://ru.wikipedia.org/wiki/Тесла,_Никола)

УДК 621.3

**ИСТОРИЯ МАЙКЛА ФАРАДЕЯ И ЕГО НЕЗАМЕНИМЫЙ ВКЛАД В
РАЗВИТИЕ НАУКИ****THE HISTORY OF MICHAEL FARADAY AND HIS IRREPLACEABLE
CONTRIBUTION TO THE DEVELOPMENT OF SCIENCE**

Н. Г. Юркевич

Научный руководитель – В.В. Зеленко, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

zelenko@bnty.by

N.G. Yurkevich

Scientific supervisor – V.V. Zelenko, senior lecturer

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Аннотация:** Начало карьеры Майкла Фарадея и его научные достижения.*Abstract:** The beginning of Michael Faraday's career and his scientific achievements.****Ключевые слова:** Начало карьеры, основные открытия, эффект Фарадея, первый трансформатор, наследие.****Keywords:** The beginning of a career, major discoveries, the Faraday effect, the first transformer, legacy.***Введение**

Майкл Фарадей – выдающийся английский учёный-экспериментатор XIX века, внесший фундаментальный вклад в физику и химию. Его открытия в области электромагнетизма и электрохимии заложили основу для современной электротехники и многих технологий. В данном документе подробно рассматривается биография Фарадея, его основные научные открытия, эксперименты, а также влияние исследований на развитие науки и техники.

Основная часть

Начало карьеры и работа с Гемфри Дэви.

Майкл Фарадей родился 22 сентября 1791 года в Ньюингтон-Баттс, пригороде Лондона, в бедной семье кузнеца. Его образование было скромным, но он проявлял большой интерес к чтению, особенно к научным трудам. В возрасте 14 лет Фарадей стал учеником переплетчика, где получил доступ к книгам и начал самостоятельно изучать науку. В 1812 году Фарадей посетил серию лекций известного химика Гемфри Дэви в Королевском институте.

Впечатленный лекциями, он сделал подробные записи и переплел их в книгу, которую отправил Дэви с просьбой о работе. В 1813 году Фарадей был принят на должность лаборанта в Королевский институт, где начал свою научную карьеру под руководством Дэви. Работа с Дэви дала Фарадею возможность участвовать в научных экспериментах и познакомиться с передовыми исследованиями того времени. Работа лаборантом оказалась важной ступенью для Фарадея. Во время многочисленных поездок по Европе он имел возможность общаться с ведущими учеными, знакомиться с результатами исследова-

ний и расширять свой научный горизонт. После нескольких лет работы Фарадей начал проводить собственные эксперименты, постепенно отходя от роли простого помощника и становясь самостоятельным ученым.

Основные научные открытия и достижения

Научная деятельность Майкла Фарадея охватывает широкий спектр областей, но наибольшую известность ему принесли работы по электромагнетизму и электрохимии. В 1821 году Фарадей продемонстрировал принцип работы электродвигателя, создав устройство, в котором электрический ток вызывал вращение проводника вокруг магнита. Это был первый шаг к созданию практических электрических машин. В 1831 году Фарадей совершил одно из самых значительных открытий в истории науки – явление электромагнитной индукции. Он обнаружил, что изменение магнитного поля вблизи проводника вызывает в нем электрический ток. Это открытие легло в основу создания генераторов электрического тока и трансформаторов, что привело к революции в электротехнике. Фарадей также внес значительный вклад в электрохимию, разработав законы электролиза, которые описывают количественные соотношения между электрическим током и химическими реакциями, происходящими на электродах. Он ввел термины "электрод", "электролит", "ион", которые до сих пор используются в современной электрохимии.

Законы электролиза и введение новых терминов

Работы Фарадея в области электрохимии привели к формулировке законов электролиза, которые имеют фундаментальное значение для понимания процессов, происходящих при прохождении электрического тока через растворы электролитов. Первый закон электролиза утверждает, что масса вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна количеству электричества, прошедшего через электролит. Второй закон устанавливает, что массы различных веществ, выделившихся на электродах при прохождении одинакового количества электричества, пропорциональны их химическим эквивалентам. Для описания процессов электролиза Фарадей ввел ряд новых терминов, которые стали общепринятыми в науке. Он предложил называть проводники, погруженные в электролит, **электродами**, а вещества, способные проводить электрический ток в растворе, – **электролитами**. Фарадей также ввел понятие **ионов** – заряженных частиц, образующихся при диссоциации электролитов в растворе и движущихся к электродам под действием электрического поля. Эти термины и концепции стали основой для дальнейшего развития электрохимии и смежных областей науки. Вклад Фарадея в электрохимию не ограничивается формулировкой законов и введением терминов. Он также провел многочисленные эксперименты по изучению процессов, происходящих на электродах, и исследовал влияние различных факторов на скорость и эффективность электролиза. Его работы заложили фундамент для развития электрохимической промышленности, включая производство металлов, гальваническое покрытие и электрохимические источники тока.

Открытие эффекта Фарадея в оптике

В 1845 году Майкл Фарадей совершил еще одно важное открытие, продемонстрировав связь между электромагнетизмом и оптикой. Он обнаружил, что

плоскость поляризации света, проходящего через вещество, помещенное в магнитное поле, поворачивается. Это явление получило название **эффекта Фарадея** и стало первым экспериментальным доказательством связи между светом и электромагнетизмом. Для этого эксперимента было использовано очень тяжелое стекло, которое было создано незадолго до этого. Эффект Фарадея имеет большое значение для понимания природы света и электромагнитных явлений. Он показал, что свет является электромагнитной волной, распространяющейся в пространстве. Это открытие подтвердило электромагнитную теорию света, разработанную Джеймсом Клерком Максвеллом, и способствовало развитию оптики и спектроскопии. Сегодня эффект Фарадея используется в различных приложениях, включая создание оптических изоляторов, модуляторов света и датчиков магнитного поля. Он также играет важную роль в исследованиях магнитных свойств материалов и в разработке новых оптических устройств.

Вклад в развитие электротехники и электродвигателей

Вклад Майкла Фарадея в развитие электротехники трудно переоценить. Открытие явления электромагнитной индукции стало основой для создания генераторов электрического тока, которые используются на электростанциях по всему миру. Разработка принципа работы электродвигателя привела к созданию электрических машин, которые применяются в различных отраслях промышленности, на транспорте и в быту. Фарадей не только разработал принципы работы электрических машин, но и внес значительный вклад в их конструирование. Он создал несколько моделей электродвигателей и генераторов, которые демонстрировали возможность преобразования электрической энергии в механическую и наоборот. Эти модели были несовершенны, но они послужили прототипами для дальнейших разработок и усовершенствований. Работы Фарадея по электромагнетизму и электротехнике оказали огромное влияние на развитие науки и техники XIX и XX веков. Они привели к созданию новых отраслей промышленности, таких как электроэнергетика, электроника и электросвязь. Без открытий Фарадея невозможно представить современный мир с его электрическими сетями, компьютерами, мобильными телефонами и другими технологическими достижениями.

Создание первого трансформатора

Основываясь на открытии явления электромагнитной индукции, Майкл Фарадей разработал первый трансформатор – устройство, предназначенное для изменения напряжения переменного тока. Трансформатор состоит из двух или более обмоток проводов, намотанных на общий сердечник. Когда переменный ток проходит через одну из обмоток (первичную), он создает переменное магнитное поле в сердечнике, которое индуцирует переменный ток в другой обмотке (вторичной). Отношение напряжений в первичной и вторичной обмотках определяется отношением числа витков в этих обмотках. Первый трансформатор состоял из железного кольца, на которое были намотаны две изолированные обмотки. Трансформатор является ключевым элементом современных электрических сетей. Он позволяет передавать электроэнергию на большие расстояния с минимальными потерями, повышая напряжение на электростанциях и понижая его вблизи потребителей. Трансформаторы также используются в различных

электронных устройствах для преобразования напряжения питания. Разработка трансформатора стала одним из самых значительных достижений Фарадея. Это устройство позволило эффективно использовать электроэнергию и способствовало развитию электроэнергетики в мировом масштабе. Без трансформаторов невозможно представить современную цивилизацию с ее развитой инфраструктурой и широким использованием электричества.

Наследие Майкла Фарадея огромно и многогранно. Его работы по электромагнетизму и электрохимии стали основой для развития современной физики, электротехники и электрохимии. Открытие явления электромагнитной индукции, разработка принципа работы электродвигателя и создание трансформатора привели к революции в электроэнергетике и способствовали развитию новых отраслей промышленности. Фарадей внес значительный вклад в понимание природы света и электромагнитных явлений. Открытие эффекта Фарадея стало первым экспериментальным доказательством связи между светом и электромагнетизмом и подтвердило электромагнитную теорию света Максвелла. Его работы заложили фундамент для развития оптики и спектроскопии. Имя Майкла Фарадея увековечено в названиях физических величин, законов, явлений и научных учреждений. В честь Фарадея названа единица электрической емкости – фарад. Его именем названы законы электролиза, эффект Фарадея и другие научные концепции. Работы Фарадея продолжают вдохновлять ученых и инженеров по всему миру и являются важным источником знаний для новых поколений исследователей.

Заключение

Майкл Фарадей — один из наиболее влиятельных ученых в истории, чьи открытия продолжают определять развитие науки и технологий. Его настойчивость, методичность и глубина исследований служат примером для студентов и исследователей. Рекомендуются уделить внимание не только изучению его открытий, но и пониманию экспериментального подхода, который он использовал — с акцентом на точность, системность и критический анализ данных. Изучение жизни Фарадея выявляет важность упорства, самообразования и нравственности в научной деятельности. Это вдохновляющая история для всех, кто стремится к знаниям и новаторству.

Литература

1. [Электронный ресурс] https://ru.wikipedia.org/wiki/Фарадей,_Майкл
2. [Электронный ресурс] https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431590/Maykl_Faradey_i_rozhdenie_fiziki_polya
3. [Электронный ресурс] https://ru.ruwiki.ru/wiki/Фарадей,_Майкл
<https://globalmsk.ru/person/id/6790>

УДК 537.622.4

ИННОВАЦИОННЫЕ ФЕРРОМАГНЕТИКИ INNOVATIVE FERROMAGNETS

И.В. Прилуцкий

Научный руководитель – Е.В. Бондарёнок, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
bondarenok@bntu.by

I. Prilutsky

Supervisor – E. Bondarenok, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: данная работа содержит в себе информацию о современных ферромагнитных материалах и ферромагнитных жидкостях их видах, областях применения, анализ развития данных материалов и жидкостей на рынке.

Abstract: this work contains information about modern ferromagnetic materials and ferromagnetic liquids, their types, applications, and an analysis of the development of these materials and liquids on the market.

Ключевые слова: ферромагнетик, ферромагнитная жидкость.

Keywords: ferromagnetic, ferromagnetic liquid.

Введение

Ферромагнитные материалы – это те материалы, которые обладают своей намагниченностью в отсутствии внешних магнитных полей, при температуре ниже точки Кюри.

С каждым годом открывают всё новые их виды, ведь они могут найти применение во многих областях.

Основная часть

Ферромагнитные материалы бывают 3 видов: жёсткие и мягкие ферромагнетики, ферриты.

Жёсткие ферромагнетики имеют низкую магнитную проницаемость и обладают большой коэрцитивной силой. Помимо этого, они обладают широким диапазоном намагничивания и большим гистерезисом.

Мягкие ферромагнетики, наоборот имеют высокую магнитную проницаемость и небольшую коэрцитивную силу, а также меньший гистерезис. В следствие этих факторов они более широко применяются чем жёсткие ферромагнитные материалы.

Ферриты обладают свойствами как ферромагнетиков, так и немагнитных материалов. И в свою очередь они также делятся на мягкие и жёсткие.

Мягкие ферриты имеют высокое сопротивление, а также гистерезис имеет квадратную форму. В следствии этого вихревые токи при переменном поле значительно уменьшаются.

Жёсткие ферриты обладают высокой плотностью и гексагональной формой. Эту группу применяют для производства разного рода продукции начиная от генераторов, двигателей, так и детских игрушек.

В последнее время появилось несколько новых видов ферромагнетиков:

– йодит хрома (CrI_3), был открыт в 2017 году, данный материал является двумерным и он является ферромагнитным в монослойной форме, сохраняет свои свойства при комнатной температуре, температура Кюри 45 К;

– хлорид хрома (CrCl_3), был открыт в 2018 году, проявляет свои ферромагнитные свойства в монослойной форме, устойчив при комнатной температуре, может быть фиолетового и тёмно-зелёного цветов, температура плавления 1152 °C у безводной его версии и у гексогидрата 83 °C;

– железо-германий-теллур (Fe_3GeTe_2), открыт в 2018 году, является магнитным полупроводником с высокой стабильностью, обладает достаточно сильной магнитной анизотропией, гексагональная кристаллическая структура, температура Кюри 200 К, её можно повысить при различных махинациях;

– марганец-висмут (MnBi), год открытия 2017, редкоземельный сплав, обладающий уникальными для него свойствами и высокой коэрцитивной силой, температура Кюри 628 К, обладает выраженной магнитной анизотропией;

– топологический ферромагнитный материал (Co_2MnGa), открыт в 2020-х годах, обладает ферромагнитными свойствами и топологическими особенностями, позволяющие использовать данный материал в квантовой инженерии и спинтронике, температура Кюри 628 К, спин-поляризация достигает 70-90%.

Кроме твёрдой формы ферромагнетиков также существуют ферромагнитные жидкости, они представляют собой жидкости, содержащие мелкие частицы ферромагнетиков, которые намагничиваются в присутствии магнитного поля. Они изменяют свои свойства под воздействием внешнего магнитного поля.

Ферромагнитные жидкости сами по себе в природе не встречаются, то есть их создают искусственно. Сама жидкость представляет собой смесь из наночастиц металла, обладающего магнитными свойствами, растворителя и модификатора для поверхности.

Новые ферромагнитные жидкости:

– ферромагнитная жидкость на основе гексаферрита бария (ВНФ), открыта в 2024 году в Словении, она состоит из нанопластины бария гексаферрита и жидкой среды, а именно 1-бутанол, размер наночастиц 10-50 нм, температура Кюри 723 К, температурный диапазон нормальной работы от -20 до +100 °C;

– постоянные жидкие магниты, созданы в 2019 году, но модифицировались и в 2023 и 2024 годах были получены усовершенствованные версии, место открытия лаборатория Лоуренса в Беркли, в составе находятся наночастицы оксида железа и оболочка, размер наночастиц 10-20 нм, температура при которой возможна нормальное функционирование жидкости 10-50 °C, температура Кюри

– биосовместимые ферромагнитные жидкости, год открытия 2024, разработали учёные из Екатеринбурга, в состав входят наночастицы маггемита ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) и полимерные матрицы, способные совмещаться с тканями, размер наночастиц 5-20 нм, рабочая температура 0-50 °C, не ограничены температурой Кюри, так как при комнатной температуре частицы обладают свойствами суперпарамагнита, агрегации не возникают при температурах до 42-45 °C, очень слабая коэрцитивная сила, что делает применение данного вида ферромагнитной жидкости безопасным для тканей человека.

Физические свойства ферромагнитных жидкостей:

- в отсутствии внешнего магнитного поля не намагничиваются и наоборот;
- в зависимости от концентрации ферромагнитных частиц вязкость жидкости изменяется, чем их больше, тем больше вязкость, если частицы большие могут проявляться свойства твёрдого тела;
- зависимость от температуры, при достижении точки Кюри магнитные свойства пропадают;
- при отсутствии магнитного поля частицы, находящиеся в жидкости, разрозненны по всей жидкости, однако при его наличии частицы могут выстраиваться в разного рода структуры.

Ферромагнитные жидкости нашли широкое применение в различных отраслях:

- электронные устройства, применяются для создания герметичных уплотнений в жёстких дисках, становится популярно охлаждение для серверов и мощных персональных компьютеров, в динамиках и наушниках, для улучшения качества звука;
- машиностроение, применяют для герметизации и уплотнений в вакуумной среде, используют в качестве амортизации, используя магнитные свойства ферромагнитных жидкостей;
- авиакосмическая промышленность, экспериментальное применение в стабилизирующей системе для регулирования положения корабля в пространстве;
- медицина, ведётся много полезных исследований по применению ферромагнитных жидкостей в этой отрасли, например применяют в контрастных агентах, вводимых перед МРТ, это повышает точность снимков, нагревание магнитных части при помощи магнитного поля для уничтожения раковых клеток или доставка лекарств к месту воспаления и опухолям при помощи магнитного поля.

В связи с тем, что ферромагнетики широко используются во многих сферах, занимаемая ими на рынке, растёт с каждым годом.

Заключение

Ферромагнетики – это материал, обладающий высоким потенциалом. Он находит широкое применение в различных отраслях и даёт толчок в развитии в тех сферах, где раньше не было решения, а также даёт новые идеи для инноваций. С каждым годом доля ферромагнитных материалов на рынке растёт в связи с ростом возможного их применения.

Литература

1. Ферромагнитная жидкость [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Ферромагнитная_жидкость. – Дата доступа: 21.04.2025.
2. Типы магнитных материалов: ферромагнитные, диамагнитные, парамагнитные [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electricalschool.info/spravochnik/material/2860-tipy-magnitnyh-materialov-ferromagnitnye-diamagnitnye-paramagnitnye.html>. – Дата доступа: 21.04.2025.

3. Ferromagnetic Materials: Types, Hysteresis, Advantages & Applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.watelectronics.com/what-are-ferromagnetic-materials-magnetization-their-applications/>. – Дата доступа: 21.04.2025.

4. Рынок ферромагнитных материалов, рост, доля рынка и прогноз 2032 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/ferromagnetic-materials-market-size-and-forecast/>. – Дата доступа: 21.04.2025.

УДК 621.316.91

СХЕМЫ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ОГРАНИЧИТЕЛЯМИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ NON-LINEAR SURGE ARRESTERS

А.И. Чечет, Д.А. Сиваков

Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

zukovskya@bntu.by

Chechet A., Sivakov D.

Supervisor – T. Zhukouskaya,
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в данной статье рассматриваются ограничители перенапряжения нелинейные как аппарат, предназначенный для защиты изоляции электрооборудования от грозовых коммутационных перенапряжений. Так же рассмотрены схемы ОПН и принцип работы.

Abstract: This article discusses nonlinear surge arresters as a device designed to protect the insulation of electrical equipment from lightning switching overvoltages. The circuits of the surge arresters and their operating principle are also considered.

Ключевые слова: Ограничители перенапряжения нелинейные, ОПН, варистор.

Keywords: Non-linear surge arresters, NSA, varistor.

Введение

1.1 Ограничитель перенапряжений нелинейный ОПН. Аппарат, предназначенный для защиты изоляции электрооборудования от грозовых коммутационных перенапряжений. ОПН конструктивно представляет собой колонку варисторов, заключенных в высокопрочный полимерный корпус из высокомолекулярного каучука (в случае полимерной изоляции прибора), либо колонку варисторов, прижатую к боковой поверхности стеклопластиковой трубы, расположенной внутри фарфора (в случае фарфоровой изоляции).

Основной элемент ОПН — варистор — переменное, изменяющееся сопротивление. Основная активная часть ОПН состоит из последовательного набора варисторов, соединенных последовательно в «колонку». В зависимости от требуемых характеристик ОПН и его конструкции ограничитель может состоять из одной колонки или из ряда колонок, соединённых последовательно либо параллельно.

1.2 Виды ОПН:

1) Фарфоровые ОПН;

Фарфоровые ОПН представляют собой колонку варисторов, прижатую к боковой поверхности стеклопластиковой трубы, расположенной внутри фарфоровой крышки.

2) Полимерные ОПН;

ОПН состоит из колонки варисторов, заключенных в высокопрочный полимерный корпус из высокомолекулярного каучука.

3) Одноколонковые ОПН;

Одноколонковые ОПН конструктивно состоят из одной колонки варисторов.

4) Многоколонковые ОПН;

Многоколонковые ОПН представляют собой несколько блоков (модулей), которые образуются из определенного числа колонок, соединенных либо последовательно, либо параллельно между собой.

1.3 Принцип работы ОПН:

В нормальном режиме ток, протекающий через ограничитель, носит емкостной характер и составляет десятые доли миллиампера. При возникновении волн перенапряжений резисторы ограничителя переходят в проводящее состояние, ток возрастает на несколько порядков, достигая сотен и тысяч ампер и ограничивая при этом дальнейшее нарастание напряжения на выводах до безопасного для защищаемого оборудования уровня. После снижения перенапряжения ограничитель возвращается в непроводящее состояние, сохраняя все свои характеристики.

ОПН комплектуются из большого числа параллельно и последовательно соединенных в колонку варисторов. Число параллельных колонок в ОПН определяется номинальным напряжением сети.

Основная часть

2.1 Схема подключения ограничителя перенапряжения с диодом:

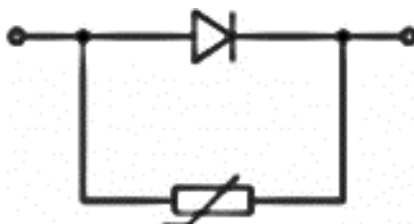


Рисунок. 1 Схема подключения ограничителя перенапряжения с диодом

Принцип работы схемы:

1. При нормальном напряжении:

Диод проводит ток (если включён в прямом направлении). Варистор имеет высокое сопротивление и практически не влияет на работу цепи.

2. При повышении напряжения выше порогового (опасного) уровня:

Сопротивление варистора резко падает, и он начинает проводить ток. Это позволяет отвести избыточный ток в обход диода, защищая схему от перенапряжения.

Такая схема используется как защитное устройство от перенапряжения в различных электронных приборах и сетях.

2.2 Схема подключения ограничителя перенапряжения с тиристором:

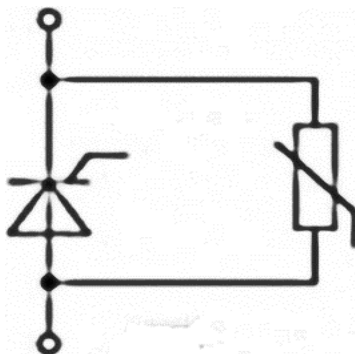


Рисунок 2 Схема подключения ограничителя перенапряжения с тиристором

Принцип действия схемы:

1. Нормальный режим:

Напряжение в цепи ниже порогового значения. Варистор имеет высокое сопротивление и практически не проводит ток. Тиристор находится в закрытом состоянии (если не управляется отдельно) и также не проводит ток. Цепь изолирована — нет утечки энергии.

2. При перенапряжении:

Варистор срабатывает первым — при достижении порогового напряжения его сопротивление резко падает. Возникает ток, который может запустить (открыть) тиристор. Тиристор открывается и создаёт короткое замыкание (или замыкание на нагрузку), тем самым сбивая скачок напряжения или выбивая автомат/предохранитель (в зависимости от конструкции схемы).

Назначение:

Схема используется для активной защиты от перенапряжений в цепях переменного тока, особенно в бытовой и промышленной электронике. Часто применяется в ИБП, блоках питания, сетевых фильтрах и т.д.

2.3 Схема подключения ограничителя перенапряжения с транзистором

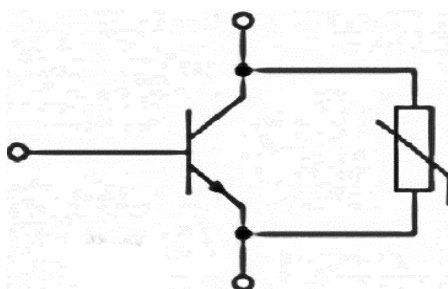


Рисунок 3 Схема подключения ограничителя перенапряжения с транзистором

Принцип действия:

1. Нормальный режим работы:

При подаче сигнала на базу транзистора, он открывается и пропускает ток от коллектора к эмиттеру. Ток протекает через нагрузку (например, реле, лампу, двигатель). Варистор при этом находится в высокоомном состоянии и практически не влияет на схему.

2. При перенапряжении (импульсе на коллекторе):

Если в момент отключения нагрузки возникает высоковольтный импульс (например, из-за индуктивной нагрузки), варистор резко снижает своё сопротивление замыкает импульс на землю (через эмиттер) тем самым защищает транзистор от пробоя по коллектор-эмиттеру.

Назначение:

Схема используется для управления нагрузкой через транзистор, с добавленной защитой от перенапряжения с помощью варистора. Это важно, например, в цепях с индуктивной нагрузкой (катушки, реле, электродвигатели), где при отключении могут возникать опасные скачки напряжения.

3.1 Рассмотрим на применение ОПН на примере типовой схемы небольшой трансформаторной подстанции с одним силовым трансформатором 160 кВА.

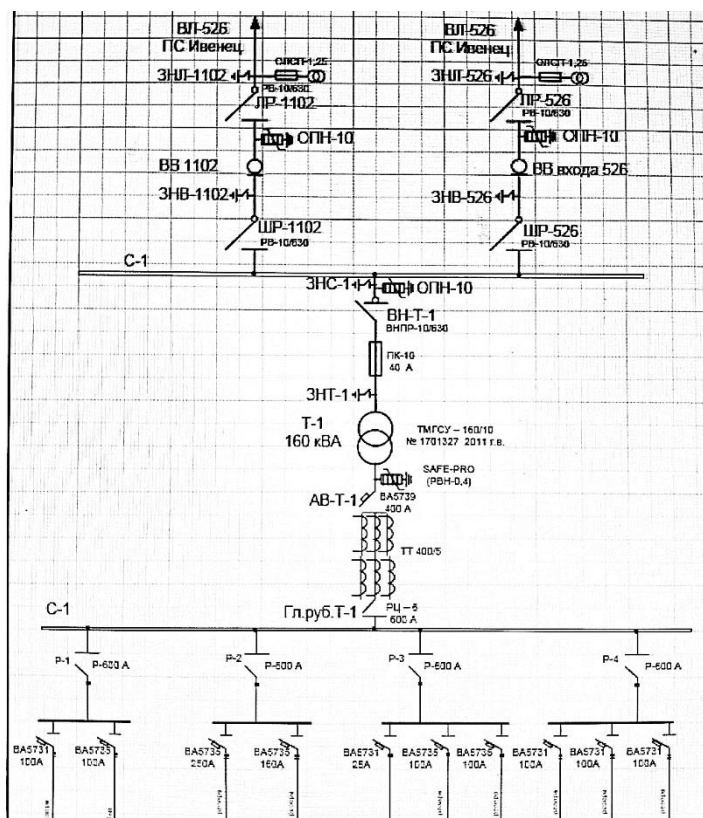


Рисунок 4 Типовая схема трансформаторной подстанции с одним силовым трансформатором 160 кВА.

Описание однолинейной схемы трансформаторной подстанции:

Схема представляет собой однолинейную схему трансформаторной подстанции (ТП), находящейся в г.п. Ивенец, с одним силовым трансформатором мощностью 160 кВА, предназначенной для приёма электроэнергии от сети 10 кВ и распределения на стороне 0,4 кВ.

1. Высоковольтная сторона (10 кВ)

Источник питания: подстанция ПС Ивенец

Два ввода с воздушных линий: ВЛ-52Б и ВЛ-526, каждая линия оборудована: ограничителями перенапряжения ОПН-10, разъединителями ЗНП-1102 и ЗНП-526, выключателями ВВ-1102 и ВВ входа 526, разъединителями ЦР-1102 и ЦР-526, учётно-защитной аппаратурой (например, РВ-10/630).

2. Измерительные трансформаторы и защита

Трансформаторы напряжения и тока на стороне 10 кВ установлены для организации коммерческого учёта и релейной защиты. Например, ЗНТ-1+1, ВН-Т1, ПК-10, ТТ 400/5 и др.

Ограничители перенапряжения (ОПН-10) установлены до и после трансформатора для защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений.

3. Силовой трансформатор

В центре схемы установлен понижающий трансформатор:

Тип: ТМГСУ-160/10

Мощность: 160 кВА

Входное напряжение: 10 кВ

Выходное напряжение: 0,4 кВ

Описание: Герметичный маслонаполненный трансформатор с системой естественного охлаждения, предназначенный для работы в распределительных сетях 10/0,4 кВ.

4. Низковольтная сторона (0,4 кВ)

Главный распределительный щит (ГРЩ) после трансформатора установлен вводной автоматический выключатель АВ Т-1 типа ВА5739, номинал 400 А. Далее ток поступает через трансформатор тока ТТ 400/5 на главный рубильник (Гл. руб. Т-1) с шинами на 600 А (РЩ-5).

Отходящие линии несколько отходящих фидеров Р-1 до Р-4, каждый оборудован автоматами Р-600 А. На каждом фидере установлены автоматические выключатели типа ВА5735 или ВА5739 с различными номиналами: 25 А, 100 А, 160 А, 250 А и др. Эти линии обеспечивают питание отдельных групп потребителей (жилые дома, освещение, оборудование и пр.).

5. Назначение схемы

Схема обеспечивает приём электроэнергии от сети 10 кВ; защиту и учёт на стороне 10 кВ; понижение напряжения трансформатором ТМГСУ-160/10; распределение электроэнергии на низком напряжении (0,4 кВ) с защитой отходящих линий; надёжную и безопасную эксплуатацию объекта, соответствующую требованиям ПУЭ и ГОСТ.

Заключение

Применение автоматической системы управления (ОПН) на примере типовой схемы небольшой трансформаторной подстанции с одним силовым трансформатором мощностью 160 кВА демонстрирует значительные преимущества в повышении надёжности и эффективности работы энергосистем. Установление современных систем управления позволяет оптимизировать процессы мониторинга и регулирования, обеспечивая своевременное выявление неисправностей и предотвращение аварийных ситуаций.

Литература

1. Дмитриев, М.В. Параметры ограничителей перенапряжения / М.В. Дмитриев. – М.: Энергоатомиздат, 2002.
2. Электрические сети. "Параметры ограничителей перенапряжения" [электронный ресурс].
3. Применение ОПН в электрических сетях / Дмитриев М.В. - 2007 г

УДК 621.31

ДВУМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ TWO-DIMENSIONAL MATERIALS AND THEIR APPLICATION IN ELECTRONICS

А.К. Мартынов

Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

zukovskya@bntu.by

A. Martynov

Supervisor – T. Zhukovskaya, Senior lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: В начале 21 века был открыт первый двумерный материал, перевернувший представление о возможностях минимизирования размеров устройств, принципиально новые свойства таких материалов заинтересовали учёных, и в настоящее время электроника стоит на пороге перехода к новым по размерам и свойствам, а значит и по возможностям материалам.

Abstract: At the beginning of the 21st century, the first two-dimensional material was discovered, which turned the idea of the possibilities of minimizing the size of devices upside down. The fundamentally new properties of such materials interested scientists, and at present, electronics is on the threshold of the transition to materials that are new in size and properties, and therefore in capabilities.

Ключевые слова: Двумерные материалы, графен, нитрид бора, дихалькогениды переходных металлов, высокочувствительные сенсоры, высокой оптическая прозрачность, наноэлектроника.

Keywords: Two-dimensional materials, graphene, boron nitride, transition metal dichalcogenides, highly sensitive sensors, high optical transparency, nanoelectronics.

Введение

В нашей повседневной жизни люди видят трехмерные материалы, имеющие определенную длину, ширину и высоту. Все предметы имеет длину, ширину и высоту. Так, если я возьму лист бумаги, то невооруженному глазу он покажется очень тонким, поэтому мы можем приблизительно рассматривать его как двумерную структуру, но начав постепенно его увеличивать мы обнаружим, что и он на самом деле имеет определенную толщину. Поэтому в научном сообществе настоящими двумерными материалами считаются материалы, толщина которых составляет один или несколько атомов, что составляет всего одну миллионную толщины листа бумаги (Рисунок 1). Открытие однослойного графена в 2004 году кардинально изменило первоначальное представление человека о материалах. За прошедшие 20 лет открыли множество новых двумерных материалов, примерно 2000 из них смоделированы и рассчитаны, сотни из которых также доступны для экспериментов. На атомном уровне очень малое количество материалов состоит из слоёв, что затрудняет получение их двумерных слоёв. В неслоистых материалах каждый атом имеет сильные металлические связи с окружающими атомами

в любом направлении, что затрудняет отделение их от основы, в отличие от слоистых материалов, где из-за слабого взаимодействия между слоями под давлением они легко отделяются.

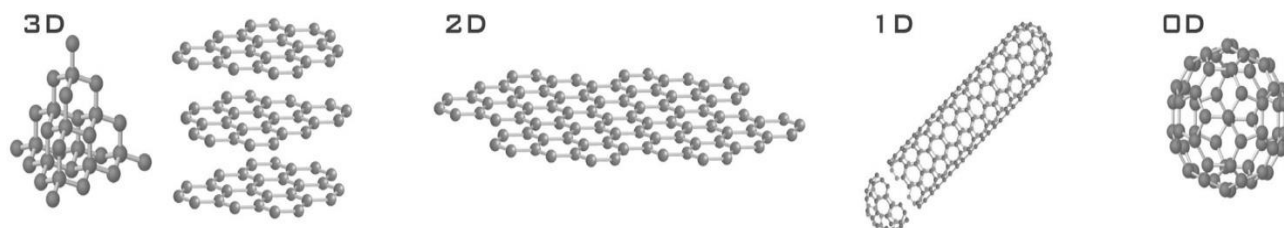


Рисунок 1- Сравнение трёх-, двух- и одномерных материалов

Основные типы двумерных материалов

Самым первым полученным двумерным материалом стал графен. Его большая теплопроводность и высокая подвижность электронов и дырок, сделала его основой не только современной электроники. А при добавлении в полимеры из-за своих хороших механических свойств он придаёт материалам прочность и жёсткость. В настоящее время графен-полимерные композиты и неорганические нанокompозиты на основе графена стали объектами пристального внимания исследователей. Кроме того, все большее внимание уделяется применению графеновых армирующих элементов в композитах с объемной металлической матрицей, и ожидается, что это еще больше улучшит механические свойства композитов.

В отличие от электропроводного графена, нитрид бора показывает диаметрально противоположные свойства. Он показал высокие изоляционные свойства, хорошую термостойкость. Как и остальные двумерные материалы из-за своей толщины имеет хорошие оптические свойства. В области электроники нитрид бора широко используется при изготовлении высокопроизводительных полевых транзисторов. Его превосходные электрические свойства помогают снизить потери по току и увеличить скорость переключения устройств. Кроме того, нитрид бора также обладает хорошей химической стабильностью и механической прочностью, что позволяет использовать его в суровых условиях.

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) — это тонкий монослойный полупроводник, состоящий из одного слоя металла, находящегося между двумя слоями халькогена. Это элементы VII A группы, такие как сера, кислород, селен и теллур. ДПМ являются чем-то средним между графеном и нитридом бора, то есть — прямозонными полупроводниками, в которых электрон при переходе между зонами не теряет импульса. В монослоях ДПМ наблюдается сильное спин-орбитальное взаимодействие, что в свою очередь позволяет путём облучения фотонами регулировать спин электронов.

Применение в электронике

С момента своего первого выделения и характеристики в 2004 году графен оказался своего рода чудо-веществом. Один слой графита может демонстрировать множество превосходных качеств с точки зрения прочности, долговечности и способности проводить электричество и тепло.

В 2018 году Харилло-Эрреро и его коллеги обнаружили, что, когда два листа графена накладываются друг на друга под точным углом в $1,1$ градус, скрученная структура — теперь известная как двухслойный графен с магическим углом — проявляет совершенно новые свойства, включая сверхпроводимость, при которой электроны объединяются в пары, а не отталкиваются друг от друга, как в обычных материалах. Графеновые плёнки используются в качестве прозрачных электродов в сенсорных экранах, жидкокристаллических дисплеях (LCD) и органических светодиодах (OLED) благодаря их высокой оптической прозрачности (до 97,7%) и низкому поверхностному сопротивлению. Большая площадь поверхности и высокая чувствительность графена делают его пригодным для мониторинга уровня глюкозы, секвенирования ДНК и других сенсорных приложений. Способность графена взаимодействовать с окружающей средой на молекулярном уровне делает его превосходным материалом для высокочувствительных сенсоров. Графен может быть структурирован и перенесён на гибкие подложки для использования в гибких устройствах. Гибкость и прочность графена позволяют создавать электронные устройства, которые могут сгибаться и растягиваться без потери функциональности.

2D плёнки нитрида бора (BN) находят применение в таких ключевых отраслях, как электроника, где он выступает в качестве важнейшего изоляционного материала и подложки. Также он часто поддерживает или дополняет другие 2D материалы, особенно графен, что подчёркивает его важность в повышении производительности других электронных и фотонных устройств. Превосходно ровная и инертная поверхность гексагонального нитрида бора (h-BN) обеспечивает рекордную подвижность носителей заряда в графене и высокое электронное и оптическое качество в дихалькогенидах переходных металлов (TMD) при использовании в качестве подложки. Большая ширина запрещённой зоны (~ 6 эВ) и отсутствие оборванных связей делают h-BN превосходным затворным диэлектриком. Хороший затворный диэлектрик имеет решающее значение для эффективной работы транзисторов. Высокая теплопроводность в плоскости (>400 Вт·м $^{-1}$ ·К $^{-1}$) делает его пригодным для рассеивания тепла в электронных устройствах, особенно в качестве электрического изолятора. Используется в качестве межслойного диэлектрика в 3D интегральных схемах.

Ввиду своих переходных свойств дихалькогениды переходных металлов используется в качестве полупроводника в транзисторах и других электронных устройствах, в оптоэлектронике для фотодетекторов, светодиодов и других оптических устройств (Рисунок 2). Электрические свойства MoS $_2$ можно изменять в соответствии с применением, что делает его приемлемым выбором для полевых транзисторов с плавающим затвором (FGFET), если быть точнее, то энергетический зазор может быть легко настроен с помощью деформационной инженерии. Двумерный MoS $_2$ проявляет пьезоэлектрические свойства, пригодные для преобразования энергии сжатия в электрическую. Это открывает возможности для использования MoS $_2$ в сборе механической энергии и других устройствах. MoS $_2$ большой площади также нашел применение в качестве активного матери-

ала канала в устройствах логики в памяти. MoS₂ обладает высокоразвитой поверхностью, что позволяет использовать его в качестве электродных материалов для суперконденсаторов.

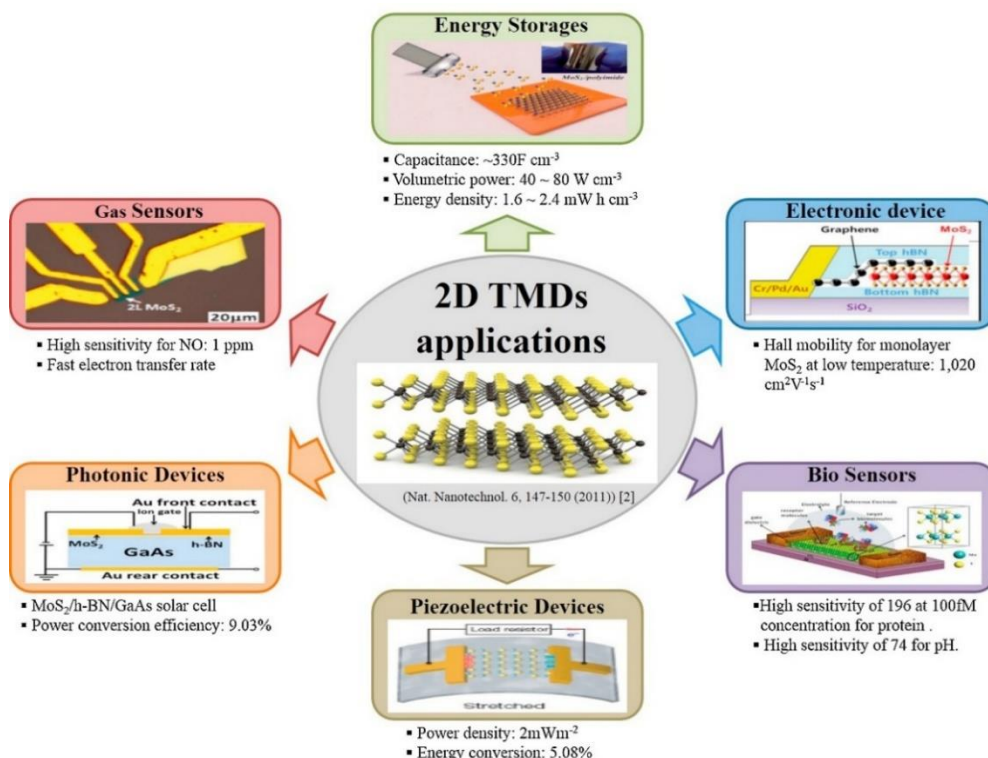


Рисунок 2- Области применения дихалькогенидов переходных металлов

Перспективы развития

В настоящее время не все полезные свойства двумерных материалов ещё изучены, но уже сейчас понятен большой потенциал плёнок толщиной в один атом в вопросах здоровья человека и окружающей среды. Проводящие свойства графена могут быть использованы для обнаружения биологических сигналов, а его структура может быть полезна для доставки лекарств или создания каркасов для тканей. Графеновые оксидные мембраны демонстрируют многообещающие результаты в дистилляции. Большая площадь поверхности и электропроводность графена полезны для устройств хранения энергии, что может привести к более быстрой зарядке и более долговечным батареям. В оптоэлектронике ожидается широкое использование графена в сенсорных экранах, LCD и OLED, что потенциально приведёт к созданию гибких и сворачиваемых дисплеев (электронная бумага). Сочетание прозрачности, электропроводности и гибкости, а также хорошего сенсорного восприятия, делает графен сильным претендентом на роль материала для дисплеев следующего поколения.

В будущем нитрид бора продолжит использоваться в наноэлектронике и фотонике в качестве подложек, затворных диэлектриков и в новых гетероструктурах для передовых электронных и фотонных устройств. По мере того как мы продолжаем исследовать потенциал 2D материалов, наличие высококачественного изоляционного материала, такого как h-BN, имеет важное значение не

только для создания сложных устройств, но и для качественного и бездефектного выращивания других двумерных материалов.

Прямая ширина запрещённой зоны MoS_2 в монослойной форме даёт ему преимущество перед графеном в определённых транзисторных приложениях, а его потенциал замены кремния в специфических нишах может быть значительным. Кремний является доминирующим материалом в электронике, но он имеет ограничения. Уникальные свойства MoS_2 могут позволить создавать более мелкие, быстрые и энергоэффективные устройства. Продолжаются исследования по использованию MoS_2 в солнечных элементах, термоэлектрических устройствах и устройствах для сбора энергии. Способность MoS_2 взаимодействовать со светом и генерировать электричество делает его актуальным для различных технологий сбора энергии.

Заключение

Из-за приближения к физическим ограничениям, связанным с уменьшением размеров транзисторов, такие материалы являются новой ступенью, открывающей возможности для дальнейшего уменьшения размеров транзисторов, увеличения плотности интеграции схем и создания более компактных и мощных электронных устройств. Такие материалы имеют концептуально другие свойства по сравнению с трёхмерными их аналогами. Графен превосходит в устройствах, требующих высокой электропроводности и механической прочности, таких как прозрачные проводящие плёнки и растяжимая электроника. Нитрид бора прекрасно подходит для применений, требующих превосходной электроизоляции и высокой теплопроводности, что делает его идеальным в качестве подложки и для теплового управления. Его химическая инертность также делает его ценным для защитных покрытий как твердотельный барьер малой толщины. Отдельно стоит отметить развивающиеся применения в ультрафиолетовой фотонике и медицине. А дисульфид молибдена выделяется своими полупроводниковыми свойствами и регулируемой шириной запрещённой зоны, что делает его особенно полезным в транзисторах, фотодетекторах и каталитических устройствах.

Несмотря на значительные успехи в изучении и применении этих материалов, продолжаются активные исследования, направленные на реализацию их полного потенциала в будущих технологиях. Совершенствование методов синтеза, обработки и изготовления устройств на их основе имеет решающее значение для широкого внедрения 2D плёнок в различных отраслях промышленности.

Литература

1. Графен и другие двумерные материалы. Свойства и методы получения. / Антонова И.В. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. — 90 с.
2. Transfer of 2D Films: From Imperfection to Perfection [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.4c00590> . — Дата доступа: 10.04.25.
3. Губин Сергей Павлович, Ткачёв Сергей Владимирович Графен и материалы на его основе // РЭНСИТ. 2010. №1-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/grafen-i-materialy-na-ego-osnove> (дата обращения: 10.04.2025).

УДК 621.32

ИНВЕРТОРЫ В ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ INVERTERS IN WIND ENERGY

Д.А. Карпейчик, В.В. Ляхович

Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

zukovskya@bntu.by

D. Karpeychik, V. Liakhovich

Supervisor – T. Zhukovskaya, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: Наиболее перспективными источниками возобновляемой энергии на сегодняшний день являются ветроэнергетика и солнечная энергия. Первая характеризуется более быстрыми темпами развития. В данной работе рассматривается принцип работы ветроэнергетической станции на основе использования инверторов. Приводятся основные характеристики инвертора-преобразователя и рассказывается о принципе работы данного элемента ветровой станции. А также даются общие рекомендации по выбору автономного инвертора.

Abstract: The most promising sources of renewable energy today are wind power and solar energy. The first is characterized by a faster pace of development. This paper examines the operating principle of a wind power station based on the use of inverters. The main characteristics of the inverter-converter are given and the operating principle of this element of the wind station is described. General recommendations for choosing an autonomous inverter are also given.

Ключевые слова: ветроэнергетика, инверторы, ветроэнергетические станции.

Keywords: wind energy, inverters, wind power plants.

Введение

Для начала разберёмся, что же такое инвертор. Инвертор — это электротехническое устройство, которое преобразует постоянный ток в переменный, при этом может выдавать напряжение необходимое для обеспечения местной сети. Известно, что ветроэнергетика характеризуется освоением генерируемых мощностей. Одной из областей техники, где проблема наращивания мощности особенно актуальна, является именно ветроэнергетика. Увеличение мощности неизбежно приводит к одновременному повышению напряжения сети, что требует снижения токовых нагрузок на линии электропередачи. Поэтому в современных ветроэнергетических станциях вместо низковольтного диапазона напряжений LV (Low Voltage) используется диапазон средних и высоких напряжений MV (Medium Voltage). За всю историю преобразовательной техники было разработано множество различных инверторов электрической энергии. Но всё это многообразие можно разделить на две группы: инверторы напряжения и инверторы тока. В ветроэнергетике пользуются спросом именно инверторы тока, так как они обладают большей надёжностью.

Основная часть

Основными элементами ветроэнергетического комплекса являются: ВЭУ (ветроэлектрическая установка) «Бриз 5000», кислотно-гелиевые аккумуляторные батареи (АКБ), автономный инвертор, регулятор заряда с выпрямителем (рисунок 1).

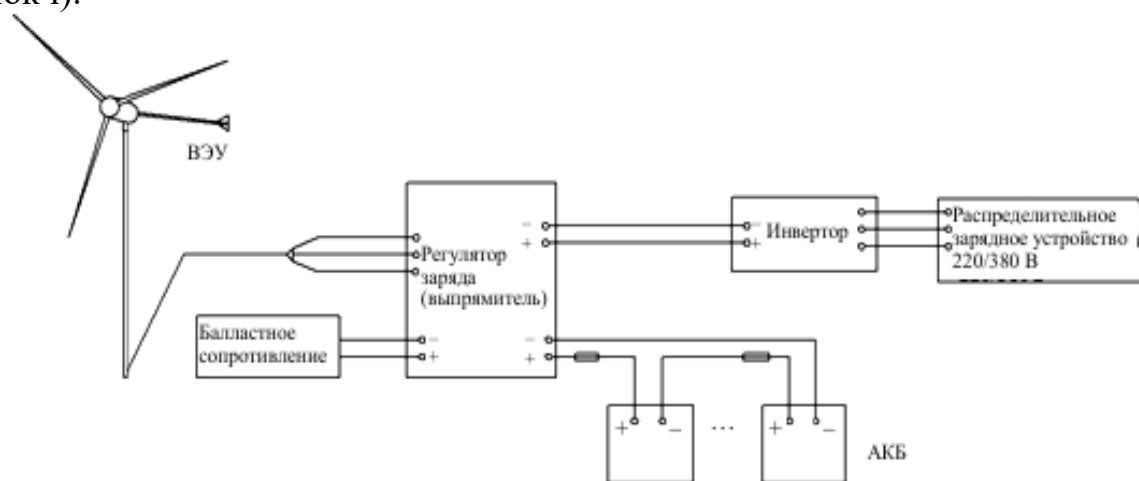


Рисунок 1. Схема ветроэнергетического комплекса

При вращении лопастей ВЭУ вырабатывает переменное напряжение частотой 10-100 Гц, которое через неуправляемый выпрямитель подается на АКБ. Для предотвращения повреждения аккумулятора из-за высокого напряжения, регулятор следит за его уровнем. Если напряжение поднимается выше 60 В, он перенаправляет энергию от ВЭУ на балластное сопротивление, используя тиристорный ключ. При понижении напряжения менее 56 В происходит обратное переключение и АКБ продолжают заряжаться.

В представленной схеме особое внимание следует уделить регулятору заряда. Это устройство предназначено для контроля и индикации величины зарядного тока и напряжения аккумуляторных батарей, отключения батарей от источников питания при достижении предельного значения напряжения.

В ветроэнергетическом комплексе используется инвертор-преобразователь *Tripp Lite APSX 6048 VR* для формирования синусоидального напряжения от источника постоянного напряжения. В составе комплекса он работает на выходную нагрузку в режиме инвертирования напряжения *DC/AC*. Инвертор-преобразователь имеет возможность дистанционного контроля и управления посредством последовательного интерфейса *RS-232*. Основные параметры настраиваются вручную с помощью *DIP*-переключателей под конкретные условия работы.

Характеристики инвертора-преобразователя *Tripp Lite APSX 6048 VR*:

Номинальная выходная мощность - 6000 ВА

Кратковременная выходная мощность - 12000 Вт

Номинальное выходное напряжение - 208 230 В

Погрешность выходного напряжения - 45 %

Частота на выходе - 50 Гц + 0,3 %

Номинальное выходное напряжение – 48 В

Максимальный входной ток – 30 А

Ток зарядки – 23 или 90 А

Диапазон рабочих температур – от 0 до +40 °С

Масса – 48 кг.

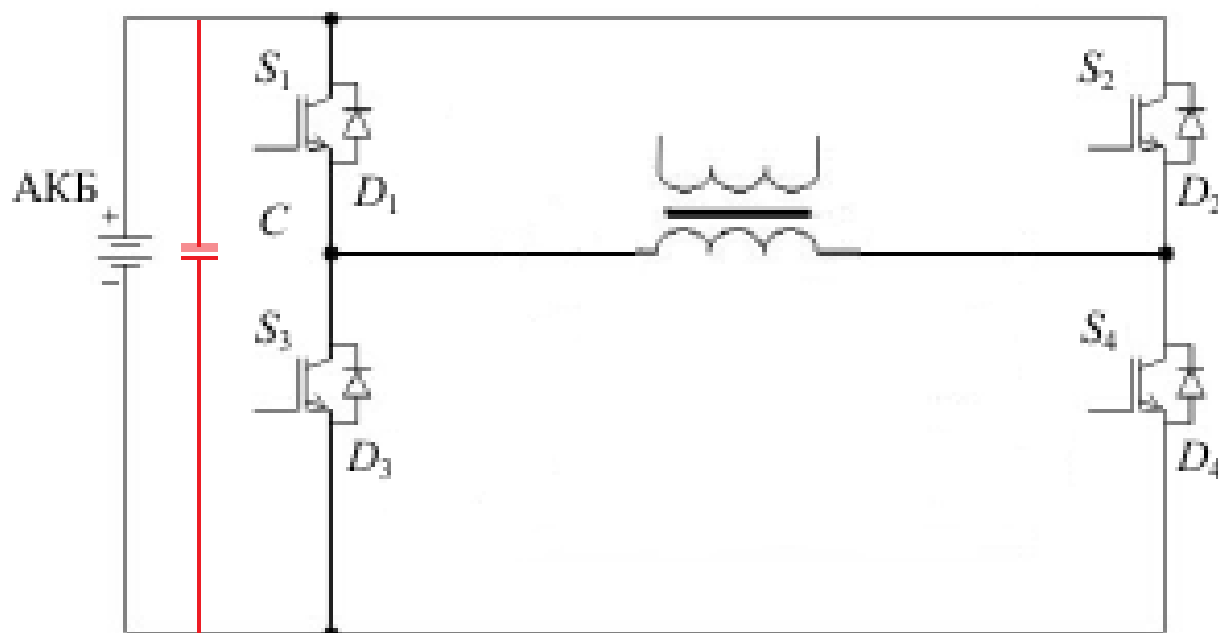


Рисунок 2. Упрощённая схема силовой части инвертора

Частота высокочастотной составляющей напряжения определяется частотой коммутации и алгоритмом работы силовых ключей инвертора. Уровень пульсации напряжения в цепи постоянного тока зависит от нескольких факторов: типа выпрямителя, частоты переключений и работы силовых ключей инвертора, характера нагрузки преобразователя и размера конденсатора в этой цепи. Поскольку инвертор получает постоянное напряжение от аккумулятора, конденсатор в основном нужен для сглаживания скачков напряжения, которые возникают при работе силовых ключей. (рисунок 2).

Наиболее распространённая схема инвертора напряжения состоит из четырех *IGBT* транзисторов $VT_1...VT_4$, включенных по схеме моста, и четырех обратных диодов, обозначенных $VD_1...VD_4$, параллельно соединенных с управляемыми полупроводниковыми ключами во встречном направлении. Преобразователь питает активно-индуктивную нагрузку. Именно эта схема является самой распространенной, поэтому была взята за основу (рисунок 3).

Входные клеммы инвертора подключаются к напряжению источника питания $U_{ип}$. Если таким источником служит диодный выпрямитель, то выход его обязательно шунтируется конденсатором с ёмкостью C .

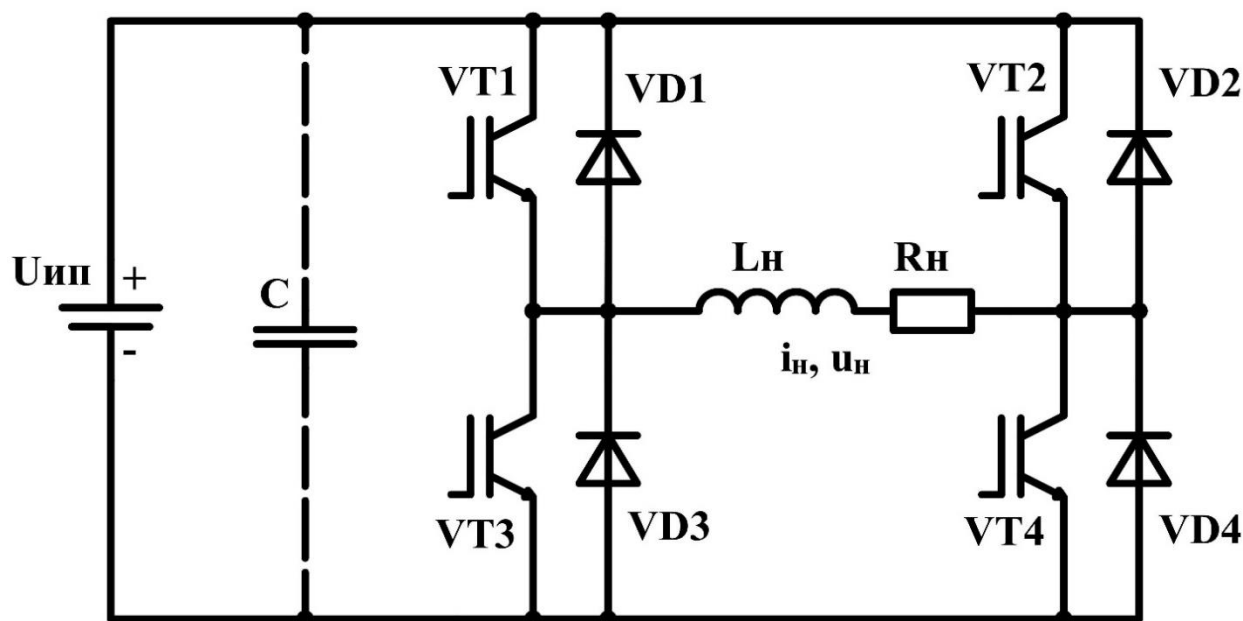


Рисунок 3. Схема автономного инвертора напряжения

Анализ работы инвертора на активно-индуктивную нагрузку показывает, что перенапряжения в звене постоянного тока обусловлены процессом перезаряда конденсатора со стороны нагрузки через оба обратных диода инвертора, когда через нагрузку течет ток. Время, в течение которого ток протекает через оба обратных диода, зависит от алгоритма работы ключей инвертора. Задавшись этим алгоритмом и зная величину выходного тока и характер нагрузки инвертора, можно определить величину коммутационных перенапряжений в функции емкости накопительного конденсатора звена постоянного тока согласно второму закону коммутации.

Пользуясь этим алгоритмом и зная величину выходного тока и характер нагрузки инвертора, можно определить величину коммутационных перенапряжений в функции емкости накопительного конденсатора звена постоянного тока согласно второму закону коммутации, представив его уравнением:

$$\Delta U_c = I_n \cdot c / t_{\Delta}.$$

Выразим величину емкости накопительного конденсатора:

$$C = I_n \cdot \Delta U_c / t_{\Delta},$$

где C – емкость конденсатора; I_n – ток нагрузки, протекающий в момент работы двух диодов; Δt – время протекания тока через обратные диоды; ΔU_c – уровень пульсации напряжения на конденсаторе.

Так как в составе ветроэнергетического комплекса на вход инвертора подается постоянное напряжение с АКБ, то основной функцией конденсатора является снижение перенапряжений.

Для понимания принципа работы инвертора на снижение напряжения представим, что у нас имеется источник электрической энергии постоянного тока такой, как аккумулятор или гальванический элемент и потребитель (нагрузка), который работает только от переменного напряжения. Как преобразовать один вид

энергии в другой? Решение было найдено довольно просто. Достаточно подключить аккумулятор к потребителю сначала одной полярностью, а затем через короткий промежуток отключить аккумулятор, а потом снова подключить, но уже обратной полярностью. И такие переключения повторять все время через равные промежутки времени. Если выполнять такие переключения 50 раз в секунду, то на потребитель будет подаваться переменное напряжение частотой 50 Гц. Роль переключателей чаще всего выполняют транзисторы или тиристоры, работающие в ключевом режиме.

На схеме (рисунок 5) изображен источника питания $U_{ин}$ с клеммами 1-2 и потребитель $R_H L_H$, обладающий активно-индуктивным характером, с клеммами 3-4. В один момент времени потребитель клеммами 3-4 подключается к клеммам 1-2 $U_{ин}$, при этом ток I от напряжения $U_{ин}$ протекает в направлении $L_H R_H$, а в следующий момент клеммы 3-4 изменяют свое положение и ток I протекает в противоположном направлении относительно потребителя электрической энергии.

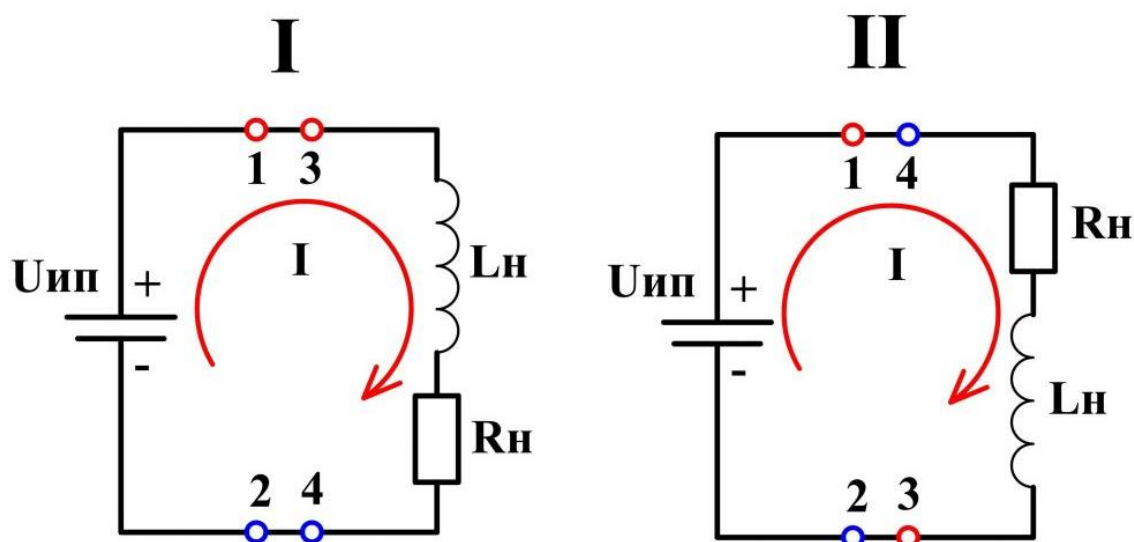


Рисунок 5. Схема преобразования постоянного напряжения в переменное

В момент времени t_1 открываются транзисторы VT_1 и VT_4 , а VT_2 и VT_3 – закрыты. Образуется единственный путь для протекания тока через нагрузку: «+» $U_{ин}$ – VT_1 – нагрузка $R_H L_H$ – VT_4 – «-» $U_{ин}$. Таким образом, на интервале времени $t_1 - t_2$ создается замкнутая цепь для протекания тока i_H в соответствующем направлении (рисунок 6).

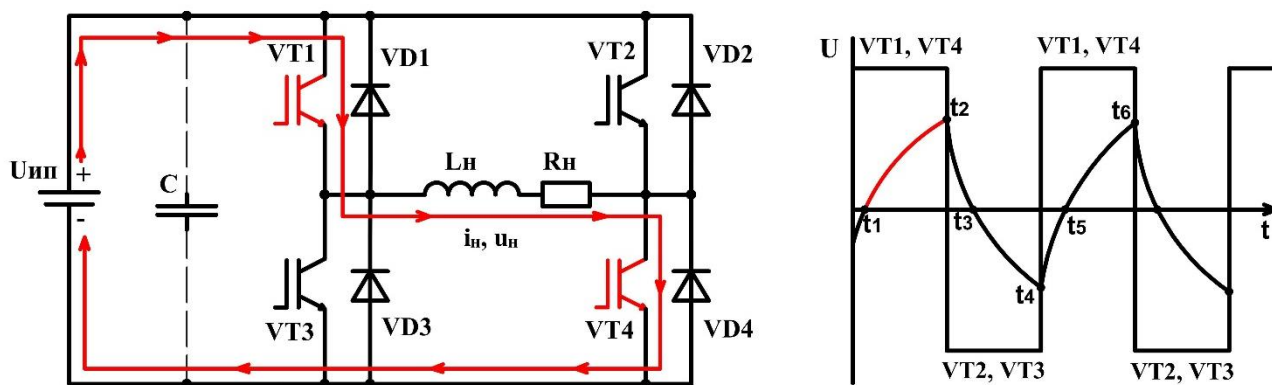


Рисунок 6. Путь протекания тока на отрезке времени t_1 - t_2

Для изменения направления тока i_n снимаются управляющие импульсы с баз транзисторов VT_1 и VT_4 и подаются сигналы на открытие второго и третьего транзисторов $VT_{2,3}$. В точке t_2 на оси времени t , первый и четвертый транзисторы $VT_{1,4}$ закрыты, а второй и третий – открыты. Однако, поскольку нагрузка активно-индуктивная, то i_n не может мгновенно изменить направление на противоположное. Этому будет препятствовать энергия, запасенная на катушке индуктивности L_n . Поэтому он будет сохранять прежнее направление до тех пор, пока не рассеется все энергия, запасенная на индуктивности в виде магнитного поля, равная $W_m = (L_n \cdot i^2)/2$.

В связи с этим, на отрезке времени $t_2 - t_3$ ток будет протекать через диоды VD_2 и VD_3 , сохраняя прежнее направление на $R_n L_n$, но пройдет в обратном направлении через $U_{ин}$ или конденсатор C , если источником энергии является диодный выпрямитель (рисунок 7). Поэтому следует обязательно установить конденсатор C , если преобразователь подключен к диодному выпрямителю. Иначе прервется путь протекания i_n , в результате чего возникнут сильное перенапряжение, которое может повредить изоляцию потребителя и выведет из строя полупроводниковые приборы.

В момент времени t_3 вся запасенная на индуктивности энергия снизится до нуля. Начиная с момента t_3 до момента t_4 под действием приложенного $U_{ин}$ через открытые полупроводниковые ключи VT_2 и VT_3 будет протекать i_n через $L_n R_n$ уже в другую сторону.

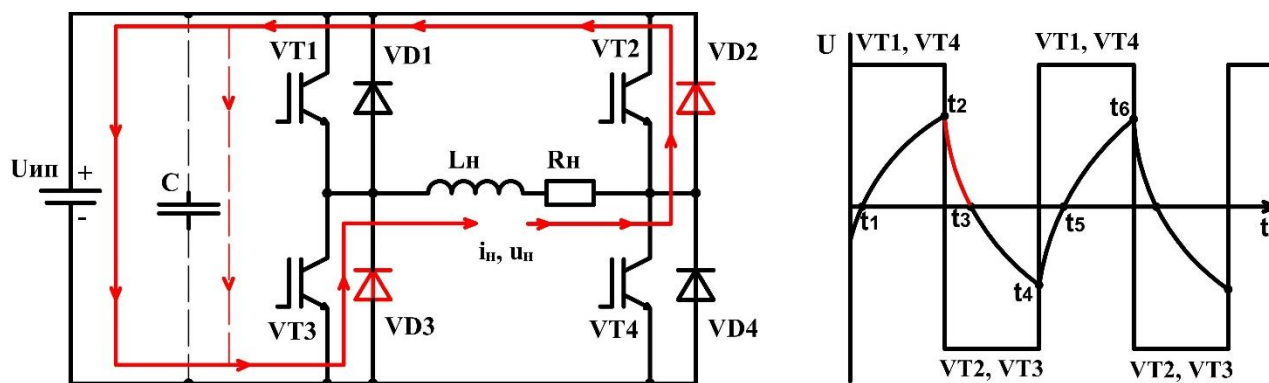


Рисунок 7. Путь протекания тока на отрезке времени t_2 - t_3

В точке t_4 , расположенной на оси времени t , снимается управляющий сигнал с $VT_{1,3}$, а VT_1 и VT_4 открываются. Однако i_n продолжает протекать в ту же сторону, пока не расходуется энергия, запасенная в индуктивности. Это будет происходить на интервале времени $t_4 - t_5$ (рисунок 8).

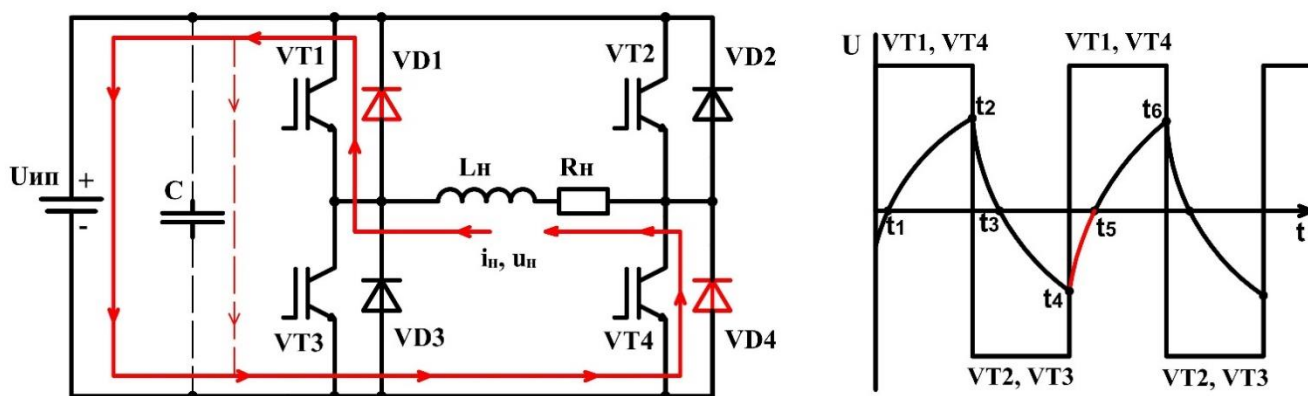


Рисунок 8. Путь протекания тока на отрезке t_4 - t_5

Начиная с момента t_5 i_n изменить направление и потечет от $U_{ин}$ через $L_n R_n$ по пути через VT_1 и VT_4 . Далее все процессы, протекающие в электрической цепи, будут повторяться.

Наиболее эффективным методом управления выходным напряжением является введение в инверторы широтно-импульсной модуляции, которая не требует дополнительных периферийных компонентов. Это эффективный и экономичный способ управления выходным напряжением инверторов по сравнению с другими методами.

В инверторах напряжения с прямоугольной формой на выходе, группа ключей с обратными диодами коммутируется так, чтобы получить на нагрузке переменное напряжение и обеспечить контролируемый режим циркуляции в цепи реактивной энергии.

За пропорциональность выходного напряжения отвечают: относительная длительность управляющих импульсов либо сдвиг фаз между сигналами управления группами ключей. В неконтролируемом режиме циркуляции реактивной энергии, потребитель влияет на форму и величину напряжения на выходе инвертора.

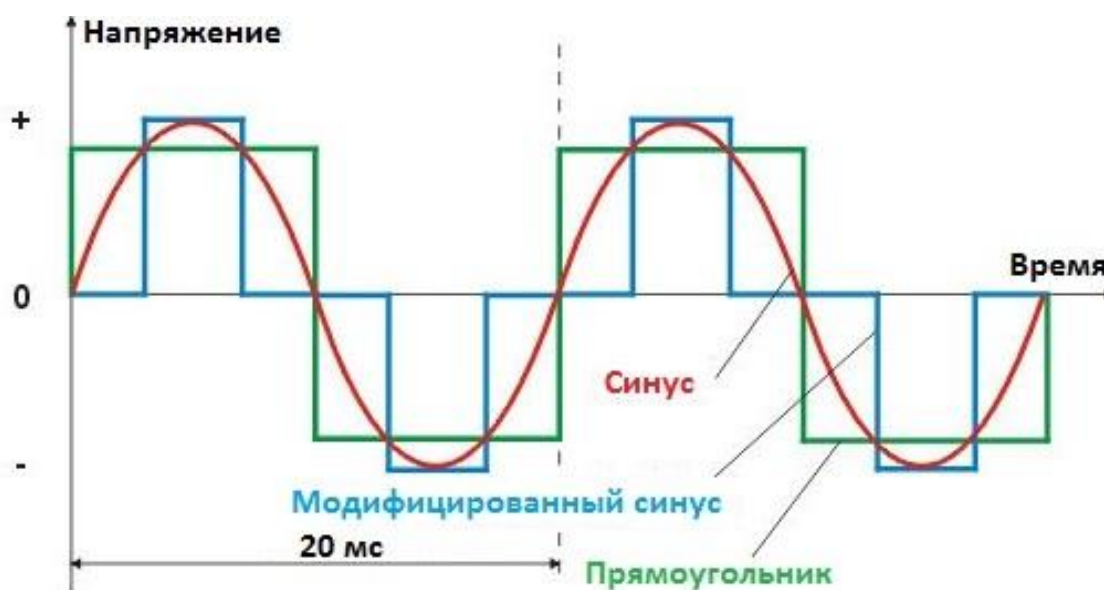


Рисунок 9. Однополярная ступенчатая кривая напряжения

В инверторах напряжения со ступенчатой формой на выходе, предварительный высокочастотный преобразователь формирует однополярную ступенчатую кривую напряжения, приближенную по своей форме к синусоиде, период которой равен половине периода выходного напряжения (рисунок 9). Затем мостовая НЧ (низкочастотная)-схема превращает однополярную ступенчатую кривую в две половинки разнополярной кривой, грубо напоминающей по форме синусоиду.

В инверторах напряжения с синусоидальной (или почти синусоидальной) формой на выходе, предварительный высокочастотный преобразователь генерирует постоянное напряжение близкое по величине к амплитуде будущей синусоиды на выходе.

После этого мостовая схема формирует из постоянного напряжения переменное низкой частоты, путем многократной ШИМ, когда каждая пара транзисторов на каждом полупериоде формирования выходной синусоиды открывается несколько раз на время, изменяющееся по гармоническому закону. Затем НЧ-фильтр выделяет из полученной формы синус.

Заключение

В работе представлены структура, характеристики и особенности эксплуатации ВЭУ малой мощности. Особое внимание уделено функционированию инвертора, который является одной из главных составляющих ВЭУ. Приведены подробные схемы для описания и принципа работы инверторов. Рассказано про способ преобразования постоянного напряжения в синусоидальное.

Литература

1. Шрайбер Д. Преобразователи высокой мощности для возобновляемых источников энергии // Силовая электроника. – 2010. – № 5. – С. 90–94.
2. Колпаков А. Схемотехника мощных высоковольтных преобразователей // Силовая электроника. – 2007.

УДК 621.32

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВЕТОДИОДОВ NEW MATERIALS FOR LEDS

П.С. Барщевская, В.А. Зарецкая

Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

zukovskya@bntu.by

P. Barshchevskaya, V. Zaretskaya

Supervisor – T. Zhukovskaya, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: В данной работе рассматриваются современные тенденции в развитии светодиодных технологий (LED), с особым акцентом на разработку новых материалов для повышения эффективности, долговечности и экологичности светодиодов. Анализируются ключевые требования к новым материалам, включая высокую светоотдачу, снижение тепловых потерь, продолжительный срок службы, расширенный функционал, экономичность и экологичность. Особое внимание уделено органическим светодиодам (OLED) как перспективной технологии освещения и поиску альтернативных материалов для их производства, включая использование комплексов меди. Также рассматриваются улучшения в керамических люминофорах для белых светодиодов и альтернативные подходы к энергоснабжению, такие как "бактериальный свет".

Abstract: This work explores current trends in the development of light-emitting diode (LED) technologies, with a particular emphasis on the development of new materials to improve the efficiency, durability, and environmental friendliness of LEDs. It analyzes the key requirements for new materials, including high luminous efficacy, reduction of heat losses, long lifetime, extended functionality, cost-effectiveness, and environmental friendliness. Special attention is paid to organic light-emitting diodes (OLEDs) as a promising lighting technology and the search for alternative materials for their production, including the use of copper complexes. Improvements in ceramic phosphors for white LEDs and alternative energy supply approaches, such as "bacterial light," are also considered.

Ключевые слова: Светодиоды, LED, OLED, материалы, люминофоры, органические светодиоды, комплексы меди, экологичность, электролюминесценция.

Keywords: Light-emitting diodes, LEDs, OLEDs, materials, phosphors, organic light-emitting diodes, copper complexes, environmental friendliness, electroluminescence.

Введение

Светодиодные технологии (LED) сделали переворот в сфере света, предложив недорогие, долговечные и экологически чистые решения. Их использование охватывает много областей – от домашнего освещения до специальных применений в медицине и промышленности. Но постоянное желание к лучшему требует непрерывной работы по улучшению характеристик LED, что прежде всего связано с созданием и внедрению новых материалов.

В этой работе, наряду с акцентом на органические светодиоды (OLED), мы смотрим на перспективные пути в материаловедении для LED, которые стремятся преодолеть имеющиеся трудности и раскрыть возможность для создания еще более эффективных и функциональных источников света. Главное внимание будет уделено двум направлениям: поиску других материалов для OLED, особенно на основе меди, и улучшению керамических люминофоров для белых светодиодов. Также, будет, упомянут новый, перспективный подход, связанный с разработкой бактериального света, а также будет рассмотрен новый материал на основе оксидов редкоземельных металлов.

1. Ключевые требования к новым материалам для светодиодов

Современные требования к материалам для светодиодов включают в себя:

- **Высокая светоотдача:** Материал должен максимально эффективно преобразовывать электрическую энергию в свет, минимизируя потери. Стремление к высокой светоотдаче обусловлено необходимостью снижения энергопотребления, что особенно актуально в условиях растущих цен на электроэнергию и обостряющихся экологических проблем.
- **Снижение тепловых потерь:** Эффективный отвод тепла способствует увеличению срока службы светодиода и повышению его стабильности.
- **Продолжительный срок службы:** Материал должен сохранять свои характеристики в течение длительного времени под воздействием различных факторов, таких как температура, влажность, ультрафиолетовое излучение и электрический ток.
- **Расширенный функционал:** Материалы должны позволять реализовывать новые функции, такие как изменение цвета свечения, управление интенсивностью света, создание гибких или прозрачных светодиодов.
- **Экономичность:** Использование доступных и недорогих материалов снижает стоимость конечного продукта и делает его более конкурентоспособным.
- **Экологичность:** Материалы не должны содержать токсичных веществ, которые могут нанести вред окружающей среде или здоровью человека. Кроме того, материалы должны быть пригодны для переработки и утилизации после окончания срока службы устройства.

2. Органические светодиоды (OLED): перспективная технология освещения

OLED представляют собой захватывающее направление в развитии светодиодных технологий. В отличие от традиционных, неорганических светодиодов, в OLED в качестве активного (излучающего) слоя используются органические соединения. Эта особенность открывает возможности для создания тонких, легких, гибких и даже прозрачных дисплеев и осветительных приборов.

2.1. Принцип работы OLED

Работа OLED основана на эффекте электролюминесценции. Когда подается напряжения на OLED, электроны из катода и дырки из анода вводятся в органические слои. Под действием электрического поля носители заряда (электроны и дырки) движутся к излучающему слою, где они встречаются снова. В результате этой встречи образуются экситоны (возбужденные состояния молекул). Когда экситона переходит в основное состояние, выделяется энергия как

фотон, который выходит в виде света. Цвет света, что выходит, зависит от силы фотона, которая определяется уровнем энергии молекул органического материала в излучающем слое.

2.2. Состав OLED: многослойная структура для оптимальной работы

OLED имеет многослойную структуру, где каждый слой выполняет определенную функцию, обеспечивая эффективную работу устройства:

- Подложка: Основа, на которой формируются все остальные слои. Может быть изготовлена из стекла, пластика или даже гибкой фольги.

- Анод: Прозрачный проводящий слой, обеспечивающий инжекцию дырок в органические слои. Обычно используется оксид индия-олова (ITO), но ведутся активные поиски альтернатив, включая графен и проводящие полимеры, которые обладают гибкостью и могут быть дешевле.

- Слой инжекции дырок (HIL): Облегчает инжекцию дырок из анода в последующий слой.

- Транспортный слой дырок (HTL): Обеспечивает эффективную транспортировку дырок к излучающему слою. Материалы для HTL должны обладать высокой подвижностью дырок и термической стабильностью.

- Излучающий слой (EML): Основной слой, где происходит рекомбинация электронов и дырок и генерация света. В качестве материалов EML используются различные органические соединения, включая низкомолекулярные вещества и полимеры.

- Транспортный слой электронов (ETL): Обеспечивает эффективную транспортировку электронов к излучающему слою. Материалы для ETL должны обладать высокой подвижностью электронов и низкой энергией ионизации.

- Слой инжекции электронов (EIL): Облегчает инжекцию электронов из катода в ETL.

- Катод: Металлический электрод, обеспечивающий инжекцию электронов в органические слои. Обычно используются металлы с низкой работой выхода, такие как алюминий или кальций.

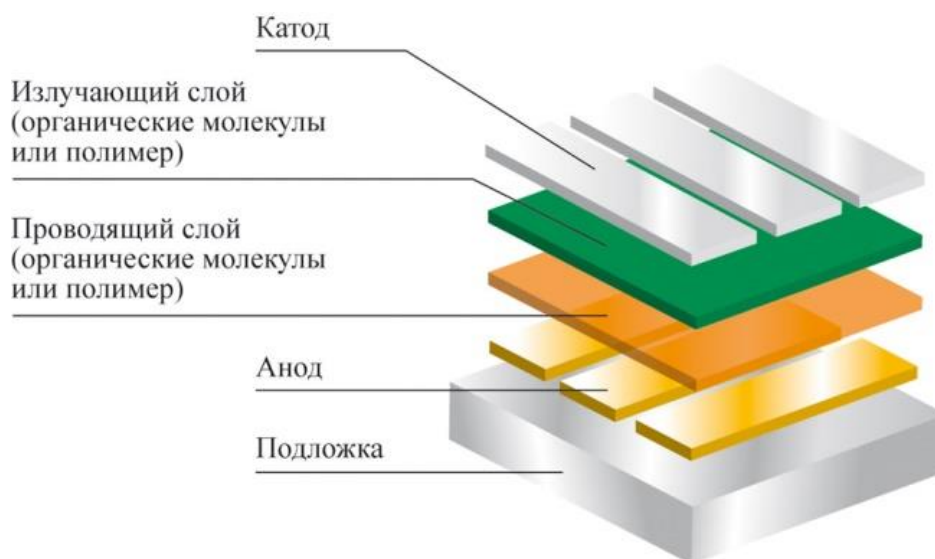


Рисунок 1 – Строение OLED

3. Перспективные материалы для OLED: снижение стоимости и повышение эффективности

Одним из ключевых направлений в развитии OLED является поиск новых материалов, позволяющих снизить стоимость производства и повысить эффективность устройств. Это особенно актуально для материалов излучающего слоя, где в настоящее время часто используются дорогие и редкие элементы.

- Люминесцирующие комплексы на основе меди: Замена дорогостоящих и дефицитных элементов, таких как иридий и рутений, на более доступные материалы является одной из важнейших задач. Разработка люминесцирующих комплексов на основе меди представляет собой перспективный подход к решению этой проблемы. Эти комплексы должны обладать высокой эффективностью люминесценции, устойчивостью к деградации и технологичностью в производстве.

- Другие материалы для анода: ITO является широко используемым материалом для анода OLED, но он обладает некоторыми недостатками, такими как высокая стоимость, хрупкость и ограниченная гибкость. Поэтому, ведутся активные поиски альтернативных материалов, таких как графен, углеродные нанотрубки, проводящие полимеры и тонкие металлические сетки. Эти материалы должны обладать высокой прозрачностью, проводимостью, гибкостью и технологичностью в производстве.

4. Улучшение материалов для белых светодиодов: повышение качества свечения

Белые светодиоды, получаемые путем сочетания синего LED с люминофором, являются широко распространенными источниками света. Однако, для достижения идеального свечения необходимо оптимизировать состав и структуру люминофора.

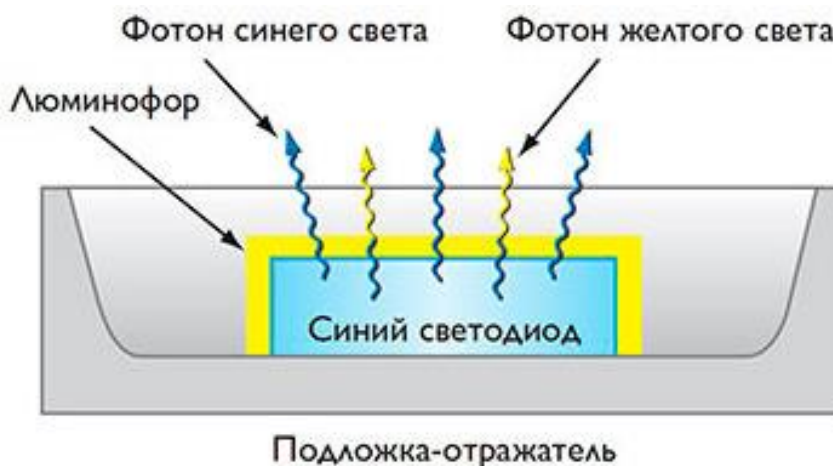


Рисунок 2 – Строение белого светодиода

- Керамические люминофоры на основе оксида алюминия и иттрий-алюминиевого граната (YAG): В качестве люминофоров для белых светодиодов часто используются керамические материалы на основе оксида алюминия и иттрий-алюминиевого граната, активированные ионами церия. Оптимизация концентрации ионов церия и структуры керамики позволяет улучшить цветопередачу, повысить световую отдачу и снизить термическое тушение люминофора.

- Разработка новых люминофоров: Ведутся исследования по разработке новых люминофоров с улучшенными характеристиками, таких как узкополосные люминофоры для повышения цветопередачи и люминофоры с более высокой термической стабильностью.

5. Высокоэнтропийные оксиды редкоземельных металлов: новое поколение люминофоров

Кроме традиционных люминофоров, многообещающим направлением является разработка высокоэнтропийных оксидов редкоземельных металлов. Эти материалы представляют собой соединения, состоящие из пяти или более элементов в примерно равных пропорциях.

- Состав: Обычно включают в себя оксиды иттрия, европия, гадолиния, лантана и эрбия.

- Принцип действия: Способны к яркой люминесценции в видимом диапазоне, в частности, в красно-оранжевой области спектра. Высокая энтропия в кристаллической решетке способствует стабилизации структуры и подавлению образования дефектов, что обеспечивает устойчивость к высоким температурам и выцветанию.

- Преимущества:

- * Яркое и стабильное свечение.

- * Высокая термическая стабильность.

- * Возможность точной настройки цвета свечения.

- * Устойчивость к выцветанию.

- Применение: Могут использоваться в светодиодах, биомаркерах, устройствах для передачи информации с помощью света, а также для преобразования энергии.

6. Нестандартные подходы к энергоснабжению LED: "Бактериальный свет"

Интересным направлением является разработка систем, в которых электричество для питания светодиодов генерируется с использованием микроорганизмов. В конечном итоге, эта концепция, получившая название "Бактериальный свет", предполагает использование специализированных реакторов, содержащих бактерии, которые разлагают органические отходы и высвобождают электроны.

- Микробные топливные элементы (МТЭ): В основе бактериального света лежат микробные топливные элементы (МТЭ), в которых бактерии катализируют окисление органического вещества, генерируя электроэнергию.

- Преимущества: Использование органических отходов в качестве источника энергии делает систему экологически чистой и возобновляемой.

- Недостатки: На данный момент мощность, генерируемая бактериальными системами, ограничена, и требуется дальнейшая оптимизация.

7. Области применения светодиодных технологий: освещение, дисплеи и другие области

Светодиодные технологии, благодаря своей высокой эффективности, долговечности и экологичности, совершили настоящую революцию в самых разнообразных областях человеческой деятельности. Изначально воспринимавшиеся

как перспективная замена традиционным лампам накаливания, сегодня светодиоды проникли практически во все сферы, где требуется источник света, и продолжают активно завоевывать новые рынки. Рассмотрим более подробно основные области применения светодиодных технологий:

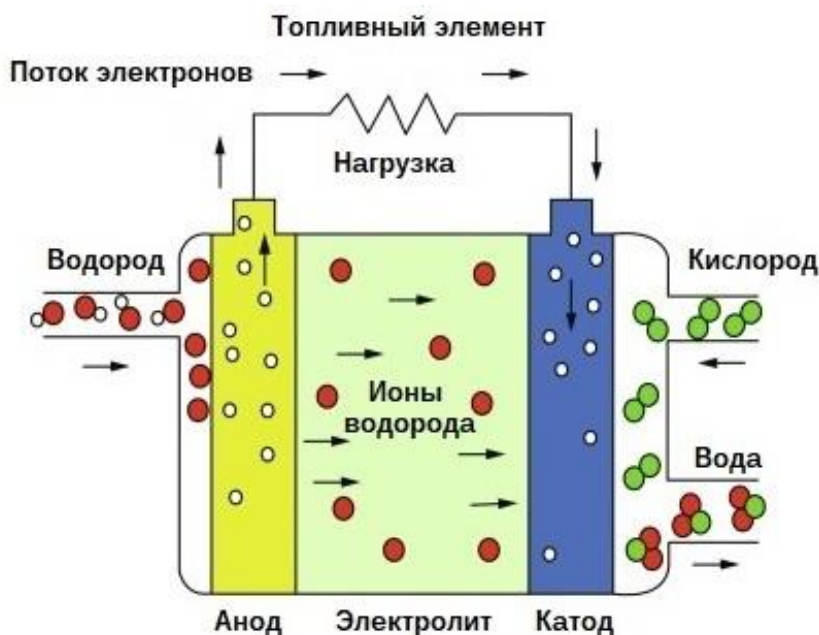


Рисунок 3 – Строение топливного элемента

- Освещение: Бытовое, уличное, промышленное, автомобильное освещение.
- Дисплеи: Смартфоны, планшеты, телевизоры, мониторы компьютеров.
- Сигнальные устройства: Светофоры, дорожные знаки, индикаторы.
- Медицина: Хирургическое освещение, фототерапия.
- Сельское хозяйство: Освещение теплиц для стимуляции роста растений.

Заключение

Разработка новых материалов является силой прогресса в светодиодных технологиях. Успехи в создании люминесцирующих комплексов на основе меди для OLED, улучшении керамических люминофоров для белых светодиодов, разработке высокоэнтропийных оксидов редкоземельных металлов, а также развитии альтернативных подходов к энергоснабжению как "Бактериальный свет", открывают новые возможности для создания более эффективных, дешевых и экологических источников света. Дальнейшие исследования в этой области будут помогать расширять применения светодиодных технологий и улучшать качества жизни людей.

Для большего прогресса в области светодиодов нужно:

- Делать фундаментальные изучения в сфере материаловедения и физики полупроводников.
- Развивать способы синтеза и работы с новыми материалами.
- Улучшить конструкции светодиодных устройств с учетом качеств новых материалов.
- Создать эффективные и экологически чистые способы производства светодиодов.

Литература

1. Новые технологии и тренды в светодиодном освещении // LED Premium. [Электронный ресурс]. URL: https://ledpremium.by/blog/article/novye_tekhnologii_i_trendy_v_svetodiodnom_osveshchenii/ (дата обращения: 07.05.2025)
2. Российские химики участвуют в создании эффективного и бюджетного OLED-дисплея // Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН. [Электронный ресурс]. URL: <https://iomc.ras.ru/2020/06/cu-oled-nature-comm/> (дата обращения: 07.05.2025)
3. В Томске разработали новые керамические материалы для сверхъярких светодиодов // Сделано у нас. [Электронный ресурс]. URL: <https://xn--80afdrjqf7b.xn--p1ai/news/6694/> (дата обращения: 07.05.2025)
4. Красное свечение, которое не гаснет: прорыв в световых технологиях // Innovanews.ru. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.innovanews.ru/info/news/nano/krasnoe-svechenie-kotoroe-ne-gasnet-proryv-v-svetovykh-tekhnologijakh/> (дата обращения: 16.05.2024).

УДК 621.3.072.8

**ДАТЧИКИ ДВИЖЕНИЯ И ФОТОДАТЧИКИ. ФОТОДИОД.
MOTION SENSORS AND PHOTSENSORS. PHOTODIOD.**

Р.С. Молчан, Н.Ю. Кратик.

Научный руководитель – Жуковской Т.Е, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

zukovskya@bntu.by

Р.А. Pashkevich

Supervisor – T. E. Zhukovskaya, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: В работе исследуются принципы работы, основные характеристики, преимущества и применение датчиков движения и фотодатчиков.

Annotation: The paper investigates the principles of operation, main characteristics, advantages and applications of motion sensors and photo sensors.

Ключевые слова: фотодиод, датчик движения, фотодатчик

Keywords: photodiode, motion sensor, photosensor

Введение

В нашей работе мы рассмотрим и изучим дополнительное оборудование к осветительным приборам, а именно датчики движения и фотодатчики.

Для чего они нужны? Где устанавливаются?

В современном мире, характеризующемся дефицитом ресурсов и растущей экологической осознанностью, энергосбережение становится критически важным. Энергетический кризис, усугубляемый растущим потреблением и истощением природных запасов, подталкивает к поиску инновационных решений для сокращения энергопотребления и уменьшения вреда окружающей среде. Датчики движения в свою очередь являются одним из самых распространённых решений по экономии энергии. Они используются практически повсеместно, включая в себя использование их от небольших комнат и складов до таких масштабных сооружений как БНТУ.

Основной же причиной для их установки является не постоянность использования света на определённых участках, к примеру: калитка у дома, въезд в гараж, коридоры квартир и различных комплексов, уличное освещение в жилых районах, освещение входа в подъезд и много других примеров. Мы же можем их наблюдать в первом корпусе на лестничных проёмах, так там основной поток студентов передвигается в перерывах между пар, установка датчиков движения является целесообразной для экономии энергии.

Существует много видов датчиков. Каждый вид служит для определённых целей и используется в тех местах где он будет выполнять свои функции в полной мере не принося вред и неудобства при эксплуатации.

Фотоэлектрические датчики – одна из таких перспективных технологий. Они не только оптимизируют использование электроэнергии, но и создают более комфортную и безопасную среду в домах и офисах.

Основная часть

Система уличного освещения

На данный момент в большинстве городах мира уличное освещение включается автоматически с помощью фотодатчиков, определяющих слабое освещение, расписания на основе времени и интеллектуальных элементов управления, которые регулируют освещение в зависимости от условий в реальном времени, обеспечивая энергоэффективность и видимость. Они определяют уровень освещённости и автоматически управляют освещением. Когда освещение слабое, либо же оно недостаточное, то система фотодатчиков включает фонарный столб, если же освещение достигает определённого уровня, то датчики отключают фонарный столб. Есть ли ещё способы экономить большее количество электроэнергии при помощи фотодатчиков?

Внедрить данный фотоэлектрический датчик можно и в систему городских фонарей на окраину городов, которые будут считывать движение и в случае движения человека будет включать уличное освещение в области большой области вокруг человека. Это позволит в разы сократить затраты на уличное освещение, ведь будут задействованы далеко не все фонари.

«Умный дом»

Самым распространённым использованием фотодатчика остаётся «умный дом». Внедрение «умных» технологий, использующих фотоэлектрические датчики, набирает популярность. «Умные» дома, автоматизированные офисы и современные системы – все это примеры повышения энергоэффективности с помощью этих датчиков. Они позволяют не только экономить на электроэнергии, но и улучшать качество жизни, создавая более удобные условия. В данной системе датчики определяют уровень освещения вне дома, из-за чего они включают, либо же наоборот, выключают освещение внутри дома. Также данные датчики используются и в самом доме. Они считывают движение человека в дома и, если человек идёт в определённую комнату, то датчик включает освещение в ней, это работает и в обратную сторону, если человека нет в комнате, то система автоматически выключает свет. Это поможет уменьшить потребление энергии дома, ведь зачастую человек не экономно расходует электроэнергию, не отключает освещение в комнате, где его нет.

Все эти технологии позволяют нам уменьшить расходы электроэнергии в разы, что очень важно в наше время.

Фотодатчики

Область применения

Фотоэлектрические датчики – универсальные устройства, находящие применение в самых разных сферах. Они способны решать широкий спектр задач, от обнаружения и позиционирования объектов на конвейере до подсчёта продукции и управления автоматическими дверями. Благодаря своей способности распознавать различные материалы, включая металлы, пластмассы, дерево и даже прозрачные вещества, фотоэлектрические датчики широко используются в автомобильной, пищевой, транспортной и логистической промышленности, и это далеко не полный перечень.

Особенности конструкции

Основными элементами конструкции любого фотоэлектрического датчика являются:

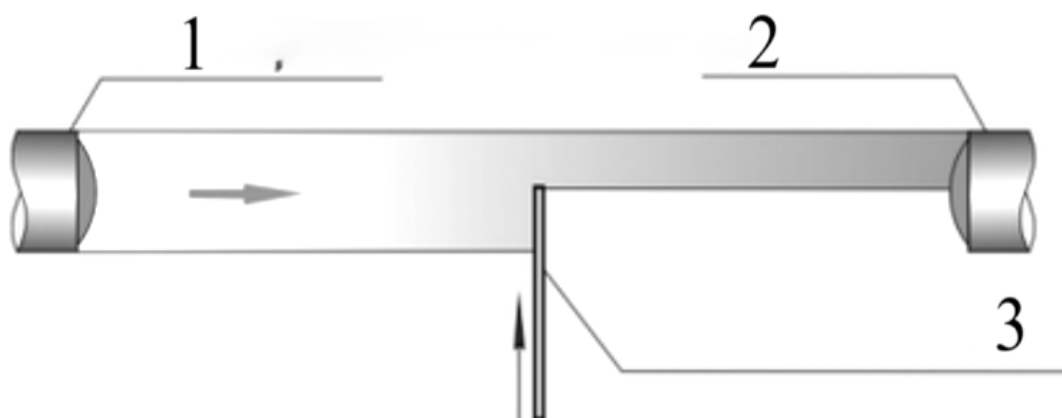
- В роли светового элемента выступает LED – полупроводник, генерирующий свет конкретного оттенка или волновой характеристики при прохождении электрического тока. Инфракрасные LED-компоненты находят широкое применение благодаря их способности к точному определению направления луча, повышенной эффективности светоизлучения и меньшему нагреву по сравнению с альтернативными вариантами. Для задач, связанных с цветовым распознаванием, применяют LED-излучатели, функционирующие в видимом спектре (например, красные, синие, жёлтые). Данные излучатели отличаются высокой степенью надёжности, устойчивостью к механическим воздействиям и колебаниям, а также способностью к функционированию в различных температурных режимах.

- Световой сенсор, будь то фототранзистор или фотодиод, осуществляет трансформацию оптического сигнала, определяемого длиной волны и яркостью, в электрический. Колебания характеристик входящего света приводят к модуляции электрического тока, проходящего через данный светочувствительный элемент.

- Оптика, а именно линза, фокусирует свет, отраженный от цели, для сужения поля зрения и увеличения дистанции распознавания.

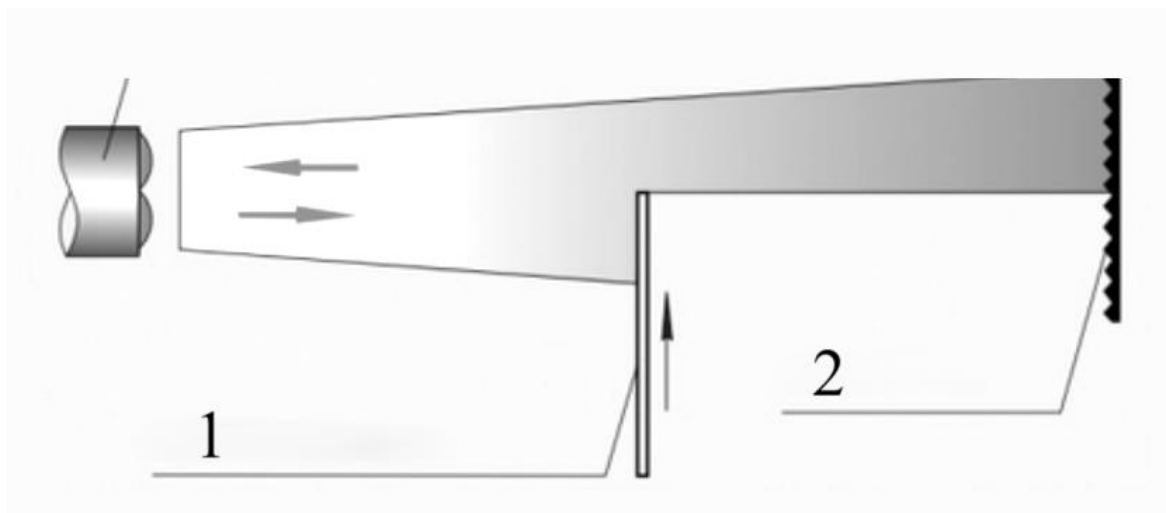
- Устройство вывода, осуществляющее переключение потребительской схемы с помощью дискретного либо аналогового управляющего сигнала. В качестве основы для реализации используются разнообразные компоненты, в частности, электромагнитные реле или полевые транзисторы. Подбор определённого компонента зависит от его параметров и спецификаций целевого применения, принимая во внимание такие аспекты, как сила тока, величина напряжения, частота переключений и общая отказоустойчивость.

Примеры типов конструкций датчиков:



1 - излучатель, 2 - приёмник, 3 - объект воздействия

Рисунок 1 - конструкция датчика



1 - объект воздействия, 2 - отражатель.

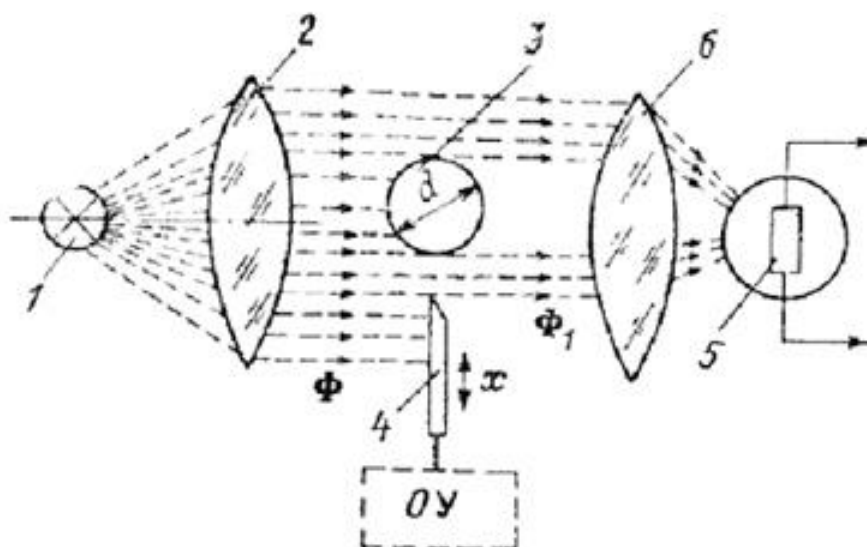
Рисунок 2 - конструкция датчика

Конструкция прибора напрямую зависит от его назначения и предъявляемых к нему требований. Например, датчики температуры или освещённости, используемые, в частности, для автоматического управления освещением, часто не нуждаются в световом излучателе. В некоторых простых моделях могут отсутствовать даже линзы.

Основные разновидности фотодатчиков

Различные типы фотодатчиков различаются по способу передачи светового воздействия на фотодетектор.

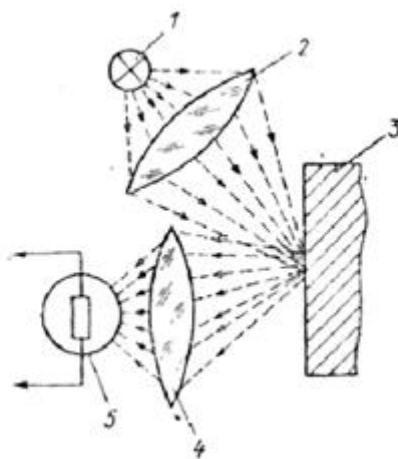
- Фотоэлектрические датчики, которые регистрируют изменения в световом потоке, вызванные движением, формой или размерами объекта.



1 - источник света, 2 - оптическая система, 3 - деталь, 4 - заслонка, 5 - фотоэлемент, 6 - собирающая оптическая система

Рисунок 3 - Фотодатчик со световым потоком, прерываемым ОУ

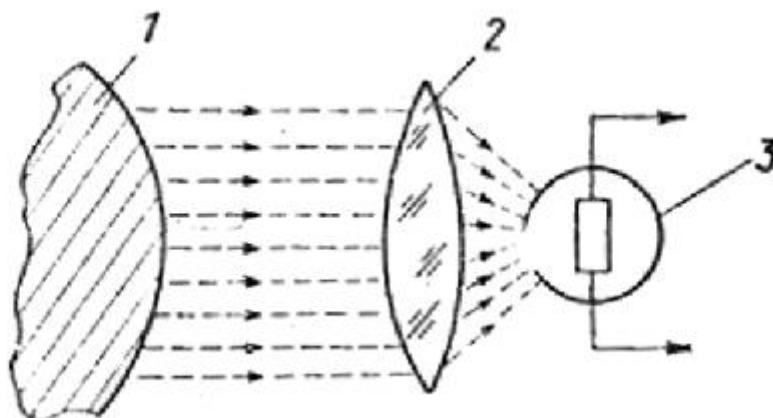
- Фотоэлектрические датчиков анализирующие изменения в свете отражённого от наблюдаемого объекта светового луча.



1 - источник света, 2 - оптическая система, 3 - объект, 4 - фокусирующая система, 5 - фотоэлемент

Рисунок 4 - Фотодатчик со световым потоком, отраженным от ОУ

- Фотоэлектрические датчики, предназначенные для регистрации собственного излучения исследуемого объекта. Оптическая система (линза) фокусирует излучаемый поток на активной области датчика. Применяются для определения характеристик излучения, генерируемого контрольно-измерительными приборами.



1 - объект, 2 - оптическая система, 3 - фотоэлемент

Рисунок 5 - Фотодатчик со световым потоком, излучаемым ОУ

Типы датчиков движения

Датчик движения использует технологию для обнаружения изменений в тепловом или звуковом излучении. При обнаружении движения он может активировать или деактивировать электрическую цепь, управляя подключённым устройством.

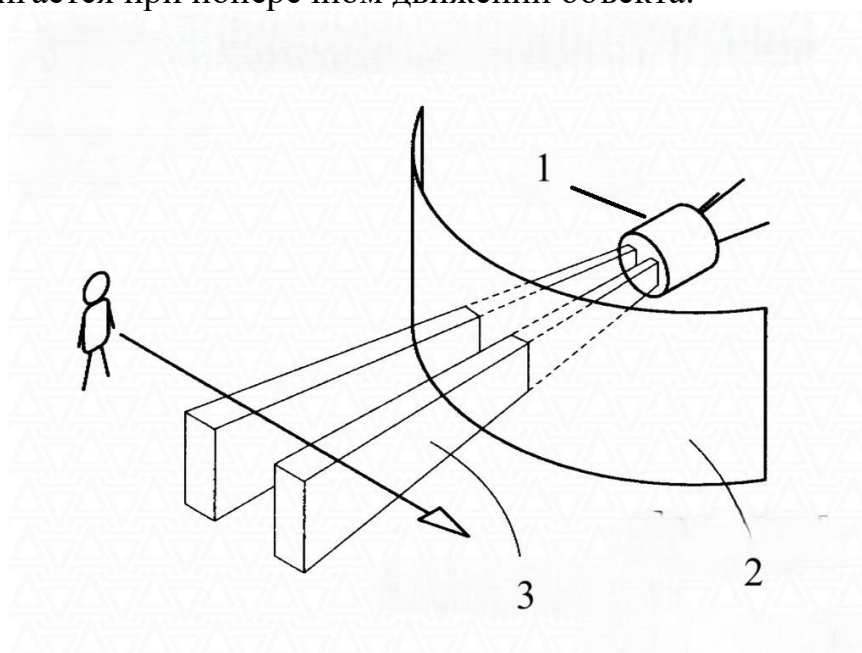
Иными словами, датчик движения - является коммутационным устройством, осуществляющим управление электрической цепью посредством встроенной в него технологии приёма или отражения излучений (инфракрасные, микроволновые, ультразвуковые).

Датчики движения классифицируются по двум основным критериям: технологии, лежащей в их основе, и принципу работы системы датчика. На основании этих критериев выделяют следующие типы датчиков движения:

Инфракрасный датчик (или пассивный инфракрасный датчик - PIR) реагирует на изменения теплового излучения в окружающей среде. Принцип его работы основан на фиксации разницы температур: появление в зоне действия датчика объекта с отличной температурой (например, человека) вызывает срабатывание. Сложность использования заключается в чувствительности к любым тепловым источникам, что может приводить к ложным срабатываниям от детей или домашних животных.

Так же инфракрасные датчики движения разделяют по области обнаружения объекта:

- Датчики движения способные улавливать объект в диапазоне от 0 до 180 градусов. Такие датчики движения преимущественно устанавливают на стены в жилых помещениях или в помещениях коридорного типа. Основным критерием для срабатывания такого датчика служит пересечение объектом минимум двух лучей или секторов. Исходя из этого наилучшая чувствительность достигается при поперечном движении объекта.



1 - датчик, 2 - линза Френеля, 3 - область срабатывания.

Рисунок 6 –Направление лучей датчика движения

- Датчики движения способные улавливать объект в области 360 градусов. такие датчики в большинстве случаев монтируются к потолку, за исключением особых моментов, когда проект требует обратного. примеры таких датчиков мы видим каждый день в корпусах БНТУ. В данной конструкции датчика секторы линзы расположены в специальной полусфере, принцип работы подобный прошлому, различие только в направлениях лучшей



Рисунок 7 - Направление лучей датчика движения

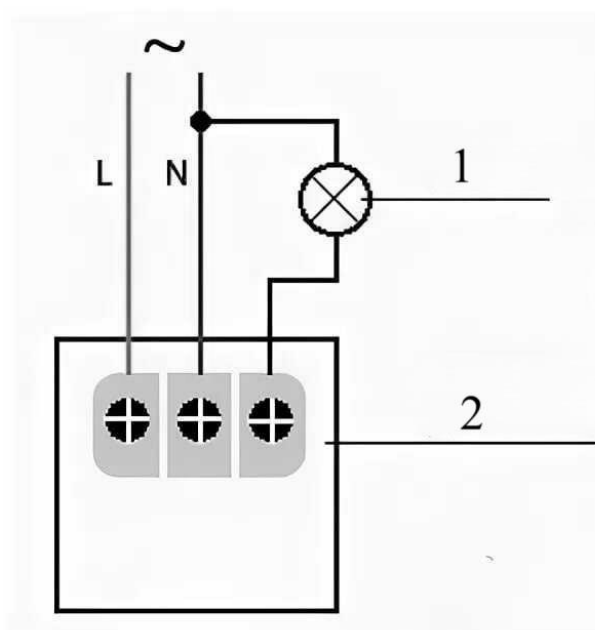
- Микроволновой датчик, считающийся одним из самых чувствительных и универсальных, обеспечивает постоянный мониторинг пространства. Он способен обнаружить даже малейшие движения в пределах своей зоны охвата.
- Ультразвуковой датчик, в отличие от инфракрасного, является активным устройством. Он использует ультразвуковые волны для обнаружения объектов в контролируемой зоне. Датчик излучает ультразвук и анализирует отражённый сигнал, формируя "карту" пространства. При появлении нового движущегося объекта, изменяющего эту "карту", датчик активируется.

Фотодиод

Но что же связывает все подобные датчики движения и фотодатчики? Ответ - фотодиод. Фотодиод — полупроводниковый приёмник оптического излучения, который преобразует попавший на его фоточувствительную область свет в электрический заряд за счёт процессов в *p-n*-переходе. В основе работы фотодиода лежит фотовольтаический эффект (разделение электронов и дырок в *p*- и *n*-областях при попадании на них потока фотонов, за счёт чего образуется заряд и электродвижущая сила — фотоЭДС). Кроме *p-n* фотодиодов, существуют и *p-i-n* фотодиоды, в которых между легированными слоями *p* и *n* находится слой нелегированного полупроводника *i*, а также фотодиоды с барьерами Шоттки. Фотодиоды используются в научных и промышленных приборах для измерения интенсивности света, а также в качестве приёмника данных, закодированных в инфракрасном луче в пультах дистанционного управления. Фотодиоды можно использовать в качестве составной части оптопары — оптрона, позволяющей передавать сигналы между цепями без гальванического их контакта.

Примеры схем подключения датчиков движения.

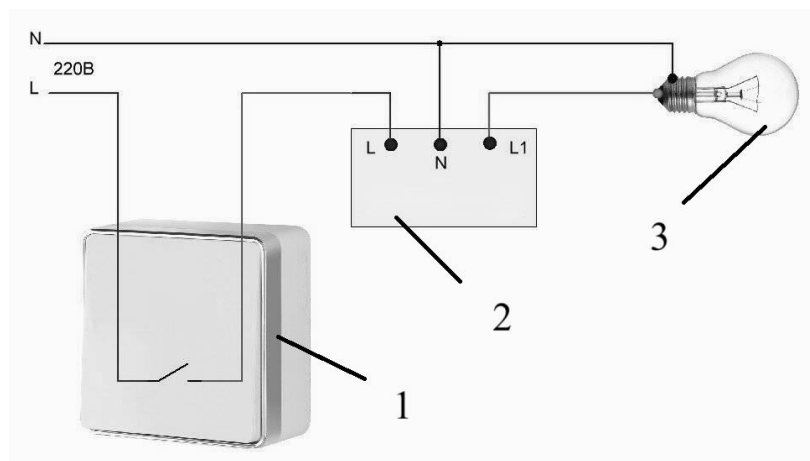
Схема №1 представляет собой простейшую схему подключения датчика движения с потребителем (в нашем случае потребителем выступает лампа). Такой тип подключения характеризуется постоянной работой датчика движения, а лампа загорается только при срабатывании датчика.



1- лампа, 2 - датчик движения.

Рисунок 8 –схема подключения датчика

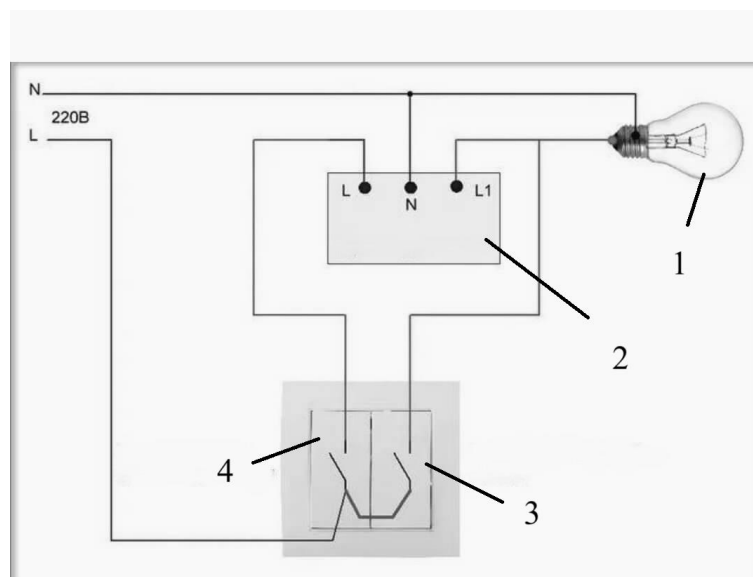
Схема №2 представляет собой схему, в которой по мимо датчика движения и потребителя встроен выключатель. Выключатель в данной схеме служит для включения и выключения датчика движения, а потребитель (в нашем случае лампочка) работает, как и в прошлой схеме только после срабатывания датчика движения. Подобный тип подключения имеет потенциал использования, но все так же имеет недостаток, а именно отсутствие управления светом без датчика движения.



1- выключатель, 2 - датчик движения, 3 - лампа.

Рисунок 9 – схема подключения датчика

Схема №3 представляет собой подключение, которое чаще всего используется при подключении датчиков движения. Такой тип подключения предусматривает использование датчика движения в качестве активатора потребителя (в нашем случае лампочка), а также ручное включение потребителя при надобности. Именно такая схема (или подобные ей) монтажа датчика движения чаще всего используется, примером может служить БНТУ, лестничные площадки современных и не только домов.



1 - лампочка, 2 - датчик движения, 3 - ручное включение света,
4 - общее питание датчика движения.

Рисунок 10 – схема подключения датчика

Вывод

Датчики движения применяются для эффективной работы охранных систем, систем автоматического освещения с таймером и других решений, направленных на безопасность и экономию, необходимы датчики движения. Эти устройства фиксируют перемещение объектов, в первую очередь людей, и передают соответствующие данные в электронную систему. Это позволяет автоматически включать и выключать свет, активировать камеры видеонаблюдения и другие устройства, повышая уровень безопасности и комфорта, а также снижая потребление электроэнергии.

Проведя работу по их изучению, мы можем утверждать, что тенденция по установке датчиков движения и фотодатчиков благоприятно влияют на экономику и безопасность страны. Не стоит забывать про то что благодаря их плюсам при применении с освещением мы заботимся о экологии.

Подводя итог хочется сказать то датчики движения и фотодатчики стали неотъемлемой частью нашей жизни. Люди даже не замечают то что они нас окружают практически везде, даже там, где это, казалось бы, совсем не очевидно.

Литература

1. Официальный сайт производителя датчиков LEUZE:[сайт]. – leuze.ru [LEUZE RUS], 2025 | Разработка SDev – URL:<https://leuze.ru/fotoelektricheskie-datchiki> (дата обращения 08.04.2025).
2. Интернет-магазин электрики 7amper:[сайт] – ©2025 7amper - интернет-магазин электрики – URL:<https://www.7amper.by/articles/obzory-tovarov/datchiki-dvizheniya-vidy-skHEMA-podklyucheniya/> (дата обращения 08.04.2025).
3. А.С. Алейник, Е.В. Востриков, С.А. Волковский, И.Г. Дейнека, В.Е. Стригалева, И.К. Мешковский - Основы схемотехники приемопередающих электронных устройств, 2021 - 151 с.

УДК 621.3.072.8

**ТИРИСТОРНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ МОЩНОСТИ
THYRISTOR POWER REGULATORS**

П.А. Пашкевич

Научный руководитель – Жуковской Т.Е, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

zukovskya@bntu.by

P.A. Pashkevich

Supervisor – T. E. Zhukovskaya, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: В работе исследуются принципы работы, основные характеристики, преимущества и применение тиристорных регуляторов мощности.

Annotation: The paper examines the principles of operation, main characteristics, advantages and application of thyristor power regulators.

Ключевые слова: тиристорный регулятор мощности, фазовое регулирование, циклическое регулирование.

Keywords: thyristor power regulator, phase control, cyclic control.

Введение

Тиристорные регуляторы мощности – важные компоненты в современном силовом электронном оборудовании, которые позволяют выполнять точное и эффективное управление электроэнергией, поступающей на различные нагрузки. Действуя на принципе открытия тиристора, тиристорные регуляторы электропитания обеспечивают динамическое управление величинами напряжения, тока, мощности в цепи за счет вмешательства в момент включения, угол задержки (фазы) управляемого импульса.

Основная часть**Область применения**

Регуляторы мощности на основе тириستоров могут быть использованы для регулировки температуры нагревательных приборов, например, в аналоговых паяльных станциях или электроплитки, для регулировки накала осветительных приборов (лампы накаливания), для контроля скорости вращения и количества оборотов электроинструмента (шлифовальные машинки, дрели, перфораторы и аналогичные инструменты), а также для запуска мощных силовых установок. В бытовых приборах используются однофазные регуляторы, а в промышленных установках чаще встречаются трехфазные.

Виды регуляторов мощности

Регуляторы мощности классифицируются на три основных вида по методу управления: регулирование фазового угла (непрерывная регулировка напряжения), управление переходом через ноль (циклическое регулирование), гибридное управление (или смешанное).

Фазовое регулирование

Фазовое регулирование, применяемое в одно- и трехфазных цепях, использует тиристоры для управления напряжением. Управление осуществляется путем подачи управляющего импульса на тиристор, определяющего момент его включения в течение каждого полупериода переменного тока. Задержка фазы управляющего импульса относительно начала полуволны переменного напряжения приводит к уменьшению значения напряжения на нагрузке. Принцип фазового регулирования схематически показан на рисунке 1.

1— мощность близка к максимальной; 2— средняя мощность; 3— мощность близкая к минимальной.

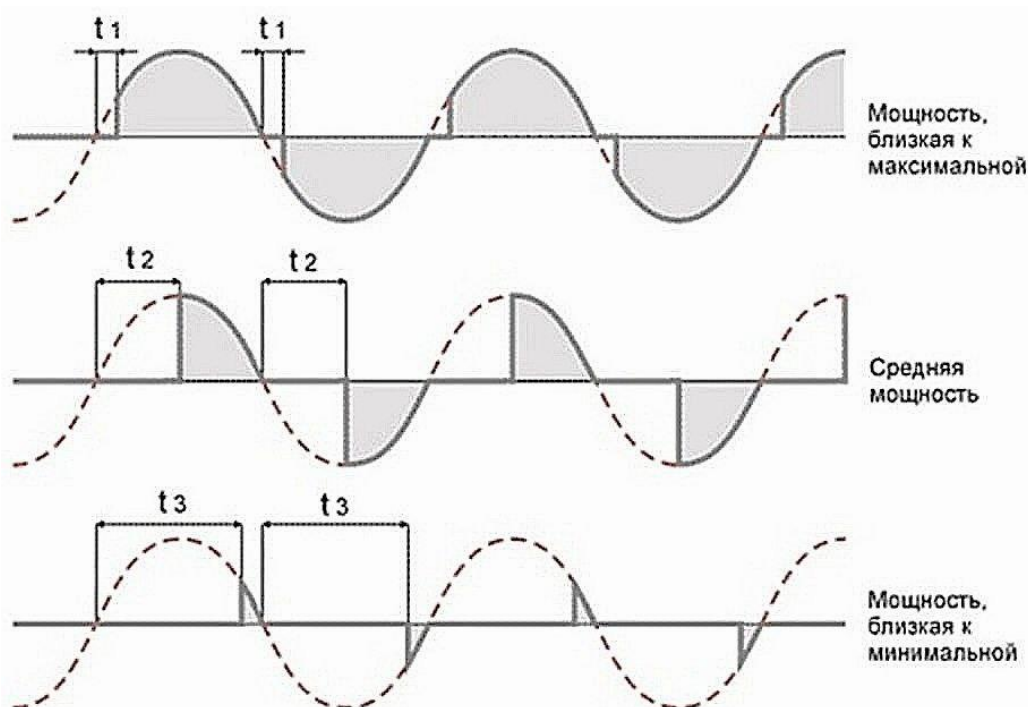


Рисунок 1 — График, отражающий принцип фазового регулирования

В первом случае, управляющий сигнал активирует тиристор практически в самом начале положительной полуволны синусоиды, то есть фаза управляющего сигнала очень мала (моменту времени t_1). В результате, благодаря быстрому включению тиристора в нагрузку выделяется мощность, близкая к максимально возможной (как если бы тиристор отсутствовал).

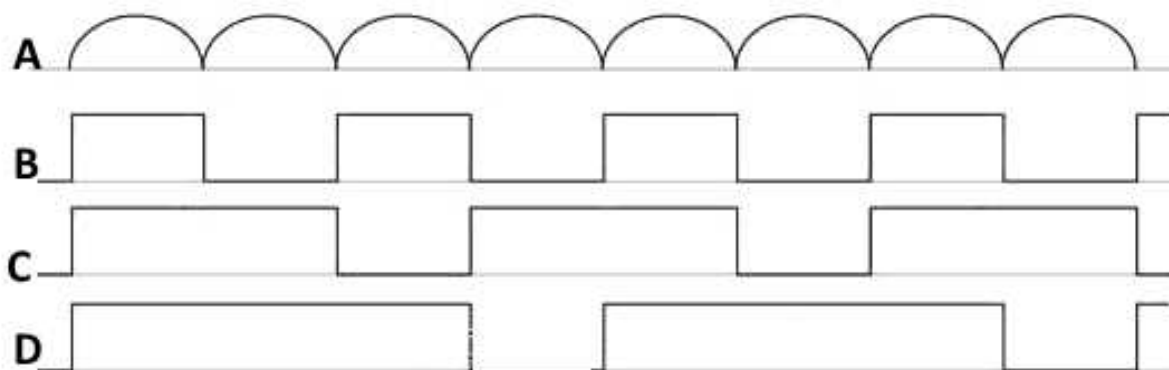
Необходимо подчеркнуть, что управляющие сигналы, необходимые для работы тиристора, на рисунке не отображены. В идеале, это положительные импульсы малой длительности, подаваемые на управляющий электрод относительно катода в строго определенный момент времени. В упрощенных схемах, управляющий сигнал может быть реализован как линейно нарастающее напряжение, возникающее в процессе заряда конденсатора.

Во втором случае, управляющий сигнал подается в середине полупериода, что соответствует фазовому углу $\pi/2$ (момент времени t_2). Это соответствует режиму работы, при котором мощность, выделяемая на нагрузке, составляет примерно 50% от максимальной.

В третьем случае, управляющие импульсы подаются почти в самом конце полупериода (момент времени t_3). Тиристор открывается непосредственно перед

тем, как должен закрыться. В результате, время его проводимости крайне мало, что приводит к незначительной мощности, выделяемой в нагрузке.

Трехфазные регуляторы мощности работают по такому же принципу, но реализуют принцип управления амплитудой напряжения одновременно в трех фазах, обеспечивая регулировку в диапазоне 2-98% от номинального значения. Это позволяет осуществлять плавное управление мощностью электроустановок. Основным недостатком является генерация значительных гармонических искажений в электросети. Для снижения уровня помех применяется метод коммутации тиристоров в моменты перехода синусоиды напряжения через ноль.



A – Графическое представление положительных полувольт переменного напряжения; B, C, D – режимы работы тиристора, пропускающего 50%, 66% и 75% от максимальной мощности, соответственно.

Рисунок 2 — Графическое представление переключения тиристора через «ноль»

График демонстрирует, что тиристор работает в режиме пропуска целых полувольт, а не их фрагментов. Это значительно снижает уровень создаваемых электромагнитных помех. Хотя такой подход исключает возможность плавной регулировки мощности, для инерционных нагрузок, таких как нагревательные элементы, это ограничение не является критичным.

Фазовое регулирование оптимизировано для работы с переменной резистивной или индуктивной нагрузкой. Преимуществами фазового управления является обеспечение плавного и непрерывного изменения мощности, что делает его подходящим для управления нагрузками, требующими динамической регулировки, такими как двигатели и трансформаторы. Недостатком – создание значительных гармонических искажений в сети, что требует использования фильтров для них.

Циклическое регулирование

Тиристоры включаются только в моменты, когда напряжение переменного тока проходит через нулевое значение. Это позволяет подавать на нагрузку целые периоды напряжения, прерываемые паузами. Преимуществом данного типа регулирования является минимизация генерации гармоник и электромагнитных помех, что делает его идеальным для управления мощностью в цепях с емкостной или резистивной (постоянной) нагрузкой. Недостатком является недостаточное обеспечение точности регулирования. Используется в промышленных нагревателях, для управления лампами накаливания и в системах контроля температуры, например, в духовых шкафах.

Гибридное регулирование

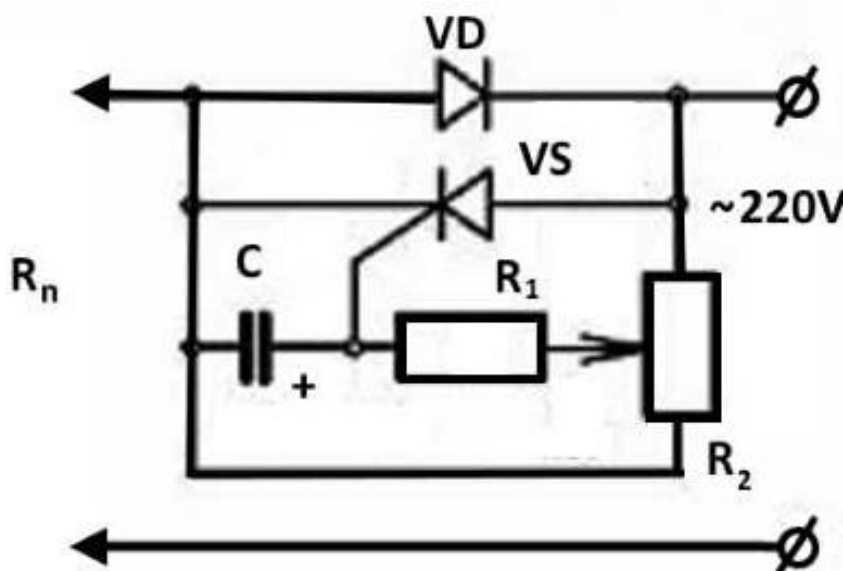
Комбинирует преимущества фазового управления и управления переключением в нулевой точке для достижения оптимальной производительности в системах с различными типами нагрузок. Адаптирует метод управления в зависимости от характеристик нагрузки и требуемой точности регулирования.

Схемы включения тиристоров

Схемы включения тиристоров. Для управления электрическими цепями широко используются тиристорные регуляторы, которые отличаются по сложности, количеству используемых компонентов, назначению и функциональности, а также по своим преимуществам и ограничениям. Подробные схемы включения тиристоров можно найти в специализированной литературе, технических справочниках, журналах по радиоэлектронике, а также в онлайн-ресурсах. При описании работы схем будет обращать внимание на то, каким образом используются тиристоры и их схемы включения.

Пример тиристорного регулятора

Для примера рассмотрим схему, предназначенную для регулирования мощности паяльника (рисунок 2).



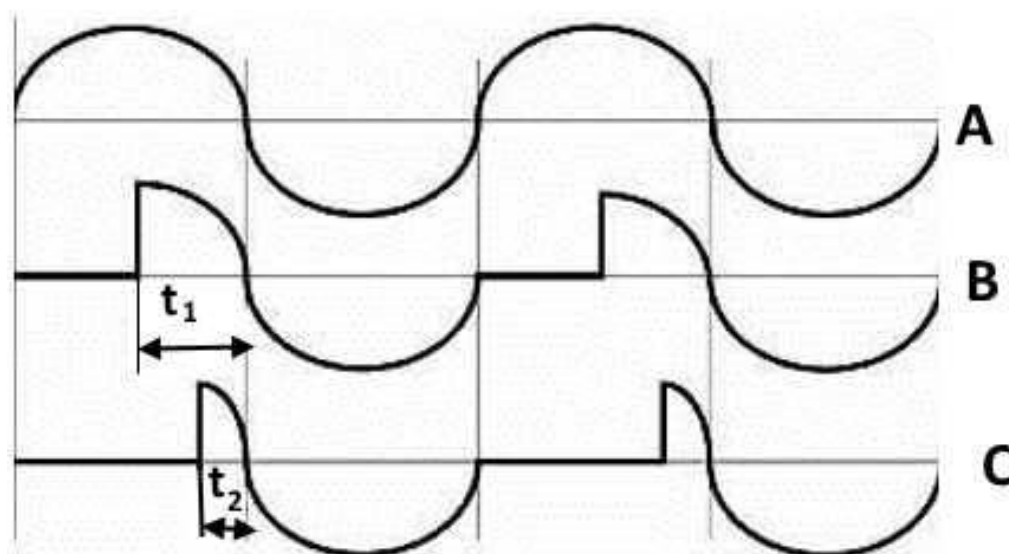
VD — диод; VS — тиристор; R1, R2 — резисторы; C — конденсатор;
Rn — нагрузка (паяльник).

Рисунок 2. Схема тиристорного регулятора мощности паяльника

Нет необходимости регулировать мощность паяльника от минимального значения. Достаточно контролировать только положительный полупериод сетевого напряжения. Отрицательный полупериод, проходя через диод VD без изменений, поступает на паяльник, обеспечивая его половинную мощность.

Тиристор VS используется для фазового управления положительным полупериодом сетевого напряжения. Цепь управления тиристором реализована на основе RC-цепи, состоящей из резисторов R1, R2 и конденсатора C. Управляющий электрод тиристора подключен к конденсатору C. Когда напряжение на конденсаторе достигает напряжения отпирания тиристора, VS переходит в проводящее состояние, пропуская часть положительного полупериода на нагрузку Rn. После

отпирания тиристора конденсатор разряжается. Регулировка угла отпирания тиристора осуществляется изменением сопротивления резистора $R1$, что влияет на скорость заряда конденсатора C .



A — Графическое представление синусоиды переменного напряжения, поступающего на нагрузку R_n при сопротивлении $R2$ близком к 0 Ом; B — при сопротивлении резистора, составляющем половину от его максимального значения; C — при максимальном сопротивлении $R2$.

Рисунок 3 — Влияние сопротивления $R2$ на работу регулятора

Скорость заряда конденсатора напрямую влияет на момент открытия тиристора: чем быстрее конденсатор заряжается до нужного напряжения, тем раньше открывается тиристор, и тем большая часть положительного полупериода напряжения поступит на нагрузку. Данная схема обеспечивает управление только положительной полуволной сетевого напряжения.

Как уже упоминалось выше, устройства, работающие на принципе фазового регулирования, создают значительные помехи в электрической сети. Существуют два способа решения этой проблемы: использовать сглаживающий фильтр или использовать устройство, не вызывающее помех. Пример такой схемы.

Регулятор работающий без помех

Регулятор мощности, работающий без помех, в отличие от фазовых регуляторов, не генерирует помехи, поскольку использует метод пропуска целых полуволн: схема регулятора мощности не искажает форму полуволн, а пропускает их целиком, пропуская или блокируя определенное количество. Диапазон регулирования мощности составляет от 50% до почти максимального значения, аналогично предыдущей схеме.

УДК 621.32

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОТВОДА В ПЛАТАХ
MODERN HEAT DISSIPATION ISSUES IN CIRCUIT BOARDS**

В.А. Орехова

Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

zukovskya@bntu.by

V.Orehova

Supervisor – T. Zhukovskaya, Senior lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: Нагревание плат негативно сказывается на продуктивности и дальнейшего использования оборудования. Поэтому существуют традиционные методы теплоотвода, а также инновационные подходы теплоотвода в платах.

Abstract: Board heating has a negative effect on the productivity and further utilization of the equipment. Therefore, there are traditional methods of heat dissipation as well as innovative approaches to heat dissipation in boards.

Ключевые слова: теплоотвод, печатные платы, радиаторы, вентиляторы, нанотехнологии, эффективные системы охлаждения, жидкостное охлаждение.

Keywords: heat sink, printed circuit boards, heat sinks, fans, nanotechnology, efficient cooling systems, liquid cooling.

Введение

В нашу жизнь все более часто внедряются новые устройства, новые инновации. Но никто не задумывался о внутренних проблемах этих устройств. Одной из главных проблем, теплоотвод внутренних составляющих. И связано это с тем, что современные производители стремятся увеличить мощность конечного продукта, путем уменьшения размера плат и увеличения их плотности составляющих. Но это влечет за собой увеличению шанса перегрева всей микроструктуры электронных устройств, что делает вопрос теплоотвода одной из главных задач проектированию плат.

Основная часть

Теплоотвод (теплоотведение) — это процесс устранения излишнего тепла, выделяемого во время работы электронными компонентами, во избежание перегрева и обеспечения долгосрочной работы. Физические основы теплоотвода состоят из формы передачи тепла, материалов и их теплопроводности, а также методов улучшения теплоотвода.

Формы передачи тепла состоят из трех основных видов теплопередачи. Первое, теплопроводность, когда тепло передаётся через твёрдые тела, такие как слои печатной платы, медные дорожки и радиаторы. Второе, конвекция, при которой тепло рассеивается в окружающую среду через воздух или жидкости, что может происходить естественным образом или с помощью вентиляторов и охлаждающих систем. Третье, излучением, при котором тепло передаётся в виде

электромагнитного излучения, что становится заметным при высоких температурах, но обычно играет второстепенную роль в электронике.

Основными материалами и их теплопроводность выступают медь, алюминий и FR-4. Медь является одним из лучших теплопроводников, используемых в печатных платах, с теплопроводностью около $385 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, что делает её идеальным материалом для создания токопроводящих дорожек, тепловых слоёв и радиаторов. Алюминий, обладая хорошей, но несколько меньшей теплопроводностью ($\approx 205 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), широко применяется в радиаторах благодаря своей лёгкости и доступности. В то же время основной материал печатных плат, FR-4- это стеклотекстолит, представляемый собой композитный материал, состоящий из стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой с антипиренами, что делает его устойчивым к горению, имеет значительно худшую теплопроводность ($\approx 0.3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$). Поэтому для эффективного теплоотведения в конструкциях плат используются тепловые слои, термовставки и специальные переходные отверстия.

Для эффективного теплоотвода в печатных платах применяется несколько методов. Один из них — увеличение площади медных дорожек, включая широкие полигоны и специальные тепловые дорожки, что снижает тепловое сопротивление. Использование многослойных плат с тепловыми слоями помогает равномерно распределять и отводить тепло. Дополнительно, тепловые переходы соединяют разные слои платы, улучшая теплопередачу между ними. Для мощных и сильно греющихся компонентов применяются радиаторы и термопаста, обеспечивающие эффективный теплообмен с окружающей средой

Современные проблемы теплоотвода

Современные проблемы теплоотвода в платах связаны с несколькими факторами, такими как миниатюризация компонентов, увеличение их мощности и требования к энергоэффективности. Увеличенное выделение тепла при нагрузке является одной из главных проблем, так как современные компоненты (например, процессоры и графические карты) становятся более мощными и компактными, что приводит к увеличению нагрева. В условиях узкого пространства и плотного расположения плат традиционные методы охлаждения становятся малоэффективными. Миниатюризация компонентов также создает проблемы, поскольку с уменьшением размеров элементов увеличивается их плотность на платах, что выявляет проблемы с использованием больших радиаторов или более эффективных систем охлаждения, таких как жидкостные. Другой проблемой является неравномерное распределение тепла: теплоотвод от микросхем и других компонентов может быть неравномерным, что затрудняет эффективное охлаждение. В некоторых местах плата перегревается, а в других остаётся холодной, что приводит к неравномерному распределению тепловых потоков и возможному перегреву отдельных участков. В узких пространствах, таких как ноутбуки или смартфоны, возникают проблемы с активным охлаждением, связано это с тем, что не всегда возможно использовать мощные вентиляторы или жидкостные системы охлаждения. Кроме того, в некоторых современных платах (например, гибкие или многослойные) используются новые материалы, которые имеют меньшую теплопроводность, что затрудняет результирующий теплоотвод. В устройствах с высокой плотностью интеграции компонентов, таких как 5G-

устройства и суперкомпьютеры, проблемы с накоплением тепла становятся особенно актуальными, так как традиционные методы охлаждения (например, вентиляторы) могут не справляться с большим нагревом. Наконец, постоянные перепады температур и перегрев могут ускорять деградацию компонентов и материалов платы, снижая срок службы устройства. Для решения этих проблем разрабатываются новые инновации охлаждения, включая инновационные тепло переносящие материалы, улучшенные радиаторы, системы жидкостного охлаждения и комбинированные подходы, которые включают активное и пассивное охлаждение.

Традиционные методы теплоотвода

Уже на этапе проектирования печатных плат нужно учитывать рассеивание тепла. Для этого нужно правильно размещать мощные компоненты, обеспечить достаточное пространство для вентиляции и использовать большую заземляющую плоскость для распределения тепла. Тепловое проектирование печатных плат — сложный, но важный процесс, напрямую влияющий на производительность и надежность электронных приборов. Устройства на плате нужно располагать в зависимости от их теплоотдачи и тепловыделения. Так, устройства с плохой теплостойкостью (маломощные сигнальные транзисторы, малогабаритные интегральные схемы, электролитические конденсаторы) размещают в самом верхнем входе охлаждающего воздушного потока, а силовые транзисторы, крупногабаритные интегральные схемы, у которых теплостойкость высока, размещают, наоборот — в самом низу охлаждающего воздушного потока. Теплочувствительные устройства размещают в нижней части платы, где температура наиболее низкая.

Платы и их компоненты с каждым годом становятся все меньше и применяются во всех электронных устройствах, в ходе их работы происходит выделение тепла, что может привести к повышению их внутренней температуры, поэтому необходимо отводить тепло для продления срока службы плат. Если вовремя не обеспечить отвод тепла, устройство продолжит нагреваться, что может привести к его повреждению из-за перегрева. Это негативно скажется на надежности и долговечности оборудования. Поэтому важно применять эффективные системы охлаждения и мониторинга температуры, чтобы поддерживать оптимальные условия работы и предотвращать возможные сбои.

Самым первым и простым способом отвода тепла является естественное конвекционное охлаждение. Этот метод достаточно простой, но подходит только для маломощных или слабо выделяющих тепло компонентов, так как может быть недостаточным эффективным для отвода большого количества тепла. При нагревании поверхности платы, нагревается и воздух, касающийся поверхности. Он становится менее плотным и поднимается вверх, а на его место приходит холодный воздух. Этот процесс создает естественную циркуляцию воздуха, что способствует отводу тепла от нагретых компонентов.

Для усиления эффекта естественной конвекции обычно добавляют радиаторы, которые увеличивают площадь поверхности, контактирующей с воздухом. Изготавливаются радиаторы зачастую из алюминия и меди. С помощью конвек-

ции тепло распределяется по площади радиатора, и отвод тепла происходит эффективнее (Рисунок 1). Для устройств, использующих естественное воздушное охлаждение, элементы рекомендуется размещать вертикально или горизонтально. В горизонтальном положении мощные устройства следует располагать как можно ближе к краю печатной платы, что поможет сократить расстояние для теплопередачи. В вертикальном положении мощные компоненты лучше размещать ближе к верхней части печатной платы, чтобы минимизировать их воздействие на температуру остальных устройств во время работы.

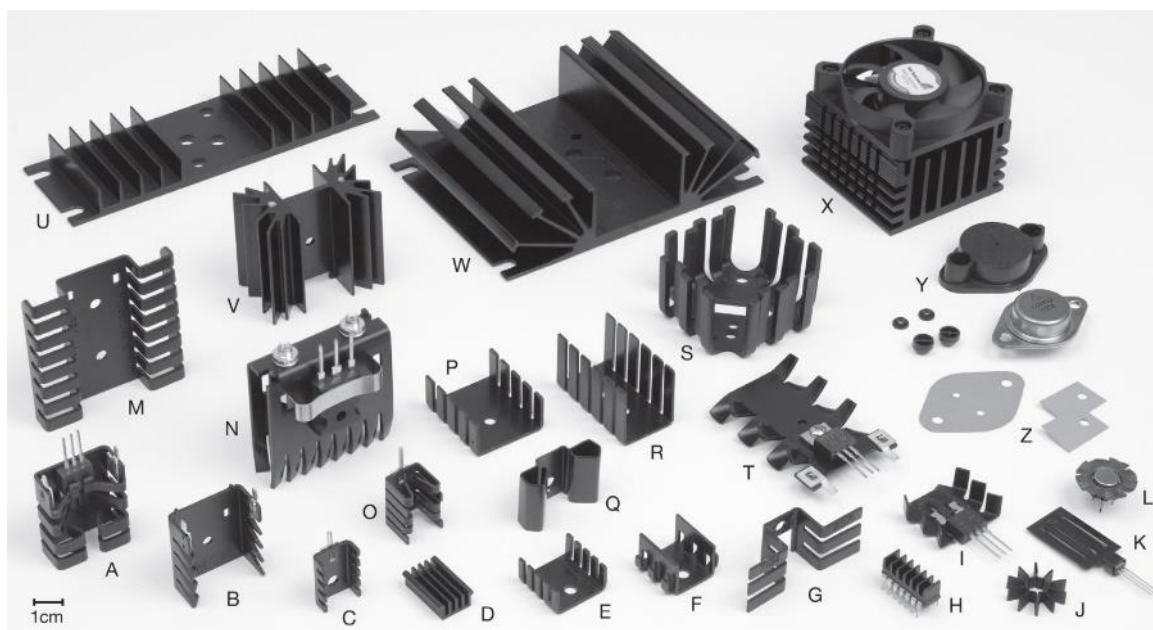


Рисунок 1- Виды радиаторов для охлаждения плат

Не менее простым, но в тоже время более эффективным является принудительное воздушное охлаждение. В этом методе увеличивается поток воздуха для охлаждения компонентов за счет вентиляторов. Он втягивает воздух снаружи и направляет его на поверхность платы или радиаторы. Этот поток воздуха забирает тепло с горячих поверхностей, перенося его в окружающую среду. Преимущество вентиляторов заключается в том, что процесс охлаждения происходит намного быстрее и качественнее. Системы из 2-4 вентиляторов применяются в устройствах средней мощности, таких как персональные компьютеры.

Эффективнее и технологически сложнее является жидкостное охлаждение. Оно используется в высокопроизводительных платах, поскольку может отводить больше тепла, чем воздушное охлаждение, а также в устройствах с плотным расположением элементов и в небольших корпусах, где воздух не может циркулировать достаточно эффективно. Жидкостное охлаждение в качестве рабочего тела использует воду, этиленгликоль для отвода тепла от горячих компонентов. Жидкость циркулирует через систему каналов или трубок, расположенных рядом с горячими компонентами (например, процессорами или видеокартами). Тепло от компонентов передается в жидкость через стенки каналов, и по каналам выводится наружу, где остывает и возвращается в цикл.

Одной из малоиспользуемых, но хорошо действующих служит технология тепловых трубок. Тепловая трубка — это инструмент, который использует процесс испарения и конденсации рабочей жидкости для эффективной передачи тепла. Существует 2 вида тепловых трубок. Первый вид-гладкостенная тепловая трубка. Это трубка из металла (например, меди), запаянная с 2 концов. Также внутри этой трубки понижено атмосферное давление, чтобы жидкость внутри закипала при более низких температурах. Один конец тепловой трубки контактирует с источником тепла, а другой конец подключен к компоненту рассеивания тепла. Внутри тепловой трубки находится специальная жидкость, которая при нагреве от горячих компонентов платы испаряется. Пар движется вдоль трубки в сторону холодной области. Там он конденсируется, возвращаясь в жидкое состояние. Жидкость скатывается вниз под действием силы тяжести, при этом выделяется большое количество тепла. Далее тепло отводится через радиаторы или другие охлаждающие элементы, где оно попадает в окружающую среду (рисунок 2).

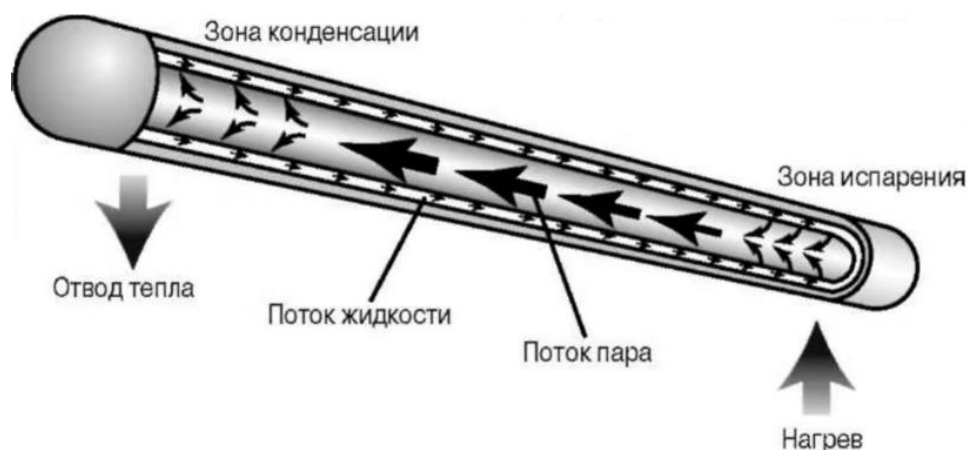


Рисунок 2- Схема распределения тепла в тепловой трубке.

Второй вид тепловых трубок- тепловая трубка с фитилями. Здесь сконденсировавшаяся жидкость под действием капиллярных сил перемещается в зону нагрева по фитилю. Фитилем может служить: сеточка из металла или специальное пористое напыление. Эти трубки используются в видеокартах (рисунок 3).

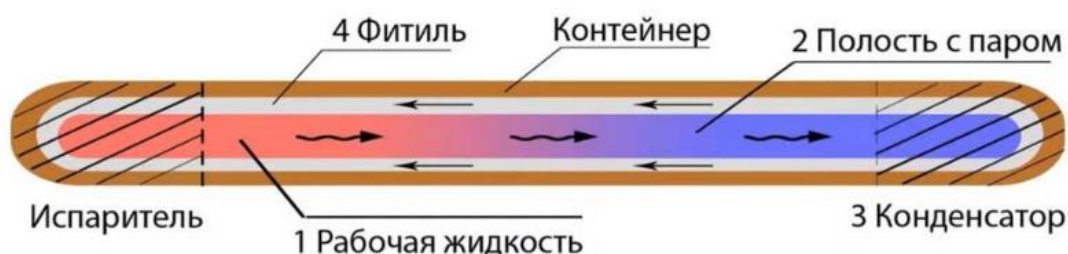


Рисунок 3- Схема распределения тепла в тепловой трубке с фитилем.

Правильный выбор материалы для рассеивания тепла, тоже является способом увеличения теплоотдачи. Выбор подходящего материала для теплового рассеивания является важной часть проектирования системы рассеивания тепла. Использование пластин из материалов с высокой теплопроводностью, таких как

алюминий или медь, может значительно ускорить передачу тепла. Кроме того, можно использовать теплопроводящие клеи, термопрокладки и материалы с изменяемой фазой. Это улучшит эффективность переноса тепла от зоны генерации к радиатору.

Инновационные подходы к теплоотводу плат

Со стремительным прогрессом науки и техники, а также увеличением мощности электронных компонентов, задача эффективного рассеивания тепла на печатных платах для оптимизации схем стала актуальной для специалистов в области электроники. Применение продуманной компоновки, выбор оптимальных материалов для теплоотвода, разработка эффективной структуры рассеивания тепла и использование передовых технологий позволяют успешно справляться с тепловыделением электронного оборудования и повышать общую производительность и долговечность системы. Совершенствование систем охлаждения печатных плат сосредоточено на улучшении теплопроводности, оптимизации расположения компонентов и внедрении новых материалов и технологий. Введение новых металлических оснований хорошо помогают отводить тепло не только с поверхности платы, эти материалы характеризуются высокой теплопроводностью и идеально подходят для мощных устройств. Керамические основания: например, Al_2O_3 , которые обеспечивают отличную теплопроводность и высокую механическую прочность, востребованы в высокочастотных схемах. А графен и углеродные нанотрубки дают хорошую теплопроводность и могут быть использованы для локального охлаждения.

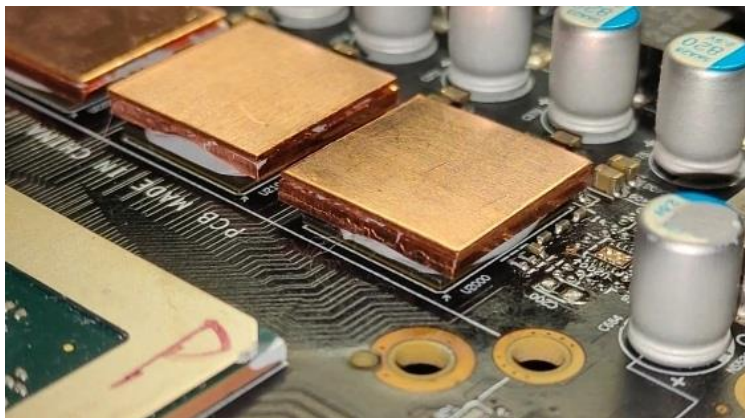


Рисунок 4- Медная вставка в плате.

Проектирование перфорации для рассеивания тепла: интеграция теплоотводящих отверстий под компонентами, выделяющими тепло, существенно улучшает эффективность теплопередачи в многослойных печатных платах. Применение медных вставок: использование медных элементов (например, в виде монет), встроенных в печатную плату и обеспечивающих прямой контакт с теплоизлучающими компонентами, способствует более эффективному отводу тепла. Объемная структура теплоотвода: создание трехмерной конструкции, объединяющей печатную плату и систему теплоотвода, позволяет увеличить площадь рассеивания тепла и повысить общую эффективность (рисунок 4).

Еще один инновационным методом теплоотвода является микрофлюидное охлаждение. Это внедрение микроканалов в печатную плату для отвода тепла посредством циркулирующей жидкости, что оптимально для устройств с высокой плотностью размещения и большой мощностью. Размещение печатной платы в диэлектрической жидкости для непосредственного отвода тепла, приводит к заметному снижению рабочей температуры.

Далее можно применять инновационные конструкции компоновки и выравнивания. Например, оптимизация медной фольги: увеличение остаточного количества медной фольги и добавление теплопроводящих отверстий для улучшения теплоотвода. Или же оптимизация расположения устройств: разумное расположение компонентов, выделяющих большое количество тепла, во избежание его концентрации, а также оптимизация конструкции воздушных каналов.

Комбинация радиатора и вентилятора поможет предотвратить нагревание плат (Рисунок 1-W). При включении системы активного охлаждения вентилятор начинает работать, создавая поток воздуха, который проходит через радиатор. Когда горячий воздух проходит через ребра радиатора, тепло передается от радиатора к воздуху. Процесс конвекции позволяет быстро и эффективно снижать температуру нагревательного элемента. Здесь важно подобрать расположение радиатора. Если он будет находиться на передней стороне элемента, то это значительно повысит эффективность рассеивания тепла.

Использование гибридной подложки и многослойных конструкций являются инновационным подходом теплоотвода плат. Например, гибридные материалы состоят из двух или более различных компонентов. Это могут быть объединения металлов, полимеров, керамики или композитов. Один из компонентов (медь, алюминий) обеспечивает высокую, а другой — улучшает термостойкость (полимеры или керамика) (рисунок 5).

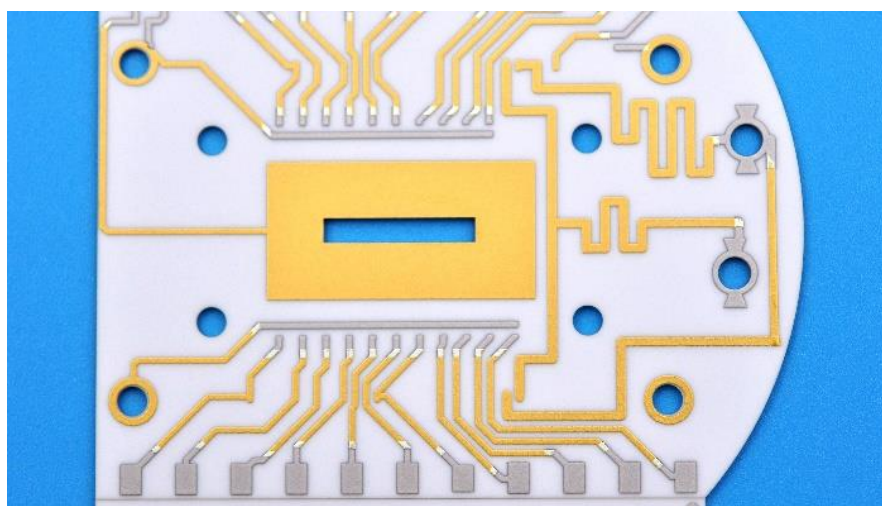


Рисунок 5- Керамическая подложка в плате.

Многослойная конструкция печатной платы также может улучшить теплоотвод, изолировав источник тепла и теплоотводящий слой с помощью нескольких слоев. Принцип работы заключается в том, что при нагревании устройства тепло передается через слои. Каждый слой может иметь разные коэффициенты

теплопроводности, что позволяет эффективно управлять температурным градиентом и направлять тепло в нужном направлении.

Также использование нанотехнологий и передовых покрытий значительно улучшит теплоотвод в платах. Так, нанопокрyтия часто имеют микроструктуры или наноструктуры, увеличивающие общую площадь поверхности. Это позволит эффективнее рассеивать тепло. Нанопокрyтия могут уменьшать тепловое сопротивление между различными материалами, что способствует более эффективному переносу тепла от горячих участков к холодным. Они могут быть более устойчивыми к коррозии и механическим повреждениям, что увеличивает срок службы теплоотводящих систем.

Заключение

Эти инновационные подходы могут решить проблему нагрева плат, не только улучшив тепловую эффективность печатных плат, но и повысив их надежность и производительность для широкого спектра применений - от бытовой электроники до промышленного оборудования. Таким образом, для эффективного решения проблемы теплоотвода в печатных платах требуется учитывать традиционные и инновационные методы, а также тщательное проектирование плат. Это позволит обеспечить надежную работу электронных устройств в условиях повышенных температур и гарантировать их долгосрочную эксплуатацию.

Литература

1. Физико-технологические основы электроники. / Барыбин А.А., Сидоров В.Г. // СПб.: Лань. – 2001.
2. Copper coin PCBs – efficiency and reliability in thermal PCB management [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.ncabgroup.com/blog/copper-coin-pcbs> . – Дата доступа: 06.04.2025
3. Современные подходы к разработке и созданию элементов систем тепловой защиты радиоэлектронных компонентов / Д.А. Коновалов, И.Н. Лазаренко, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов. // Вестник ВГТУ. - 2014.

УДК 621.323.

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ОБЛЕДЕНЕНИЯ
ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ
APPLICATION OF ELECTRONICS TO ELIMINATE ICE FROM WIND
GENERATOR BLADES**

Н.С. Макаренко, Я.А. Субоч

Научный руководитель – Т.Е. Жуковская,
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
zukovskya@bntu.by

N. Makarenko, Y. Suboch

Supervisor – T. Zhukovskaya, Senior Lecturer
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: серьезной проблемой для ветрогенераторов является обледенение лопастей, что снижает их аэродинамику и эффективность и увеличивает нагрузки. Данная работа рассматривает пути решения этой проблемы, используя системы обогрева, мониторинга и прогнозирования.

Abstract: a serious problem for wind turbines is blade icing, which reduces their aerodynamics and efficiency and increases loads. This work considers ways to solve this problem using heating, monitoring and forecasting systems.

Ключевые слова: ветрогенератор, обледенение, системы обогрева, датчик, интеллектуальные системы.

Keywords: wind generator, icing, heating systems, sensor, smart systems.

Введение

Ветроэнергетика наряду с такими видами энергии как солнечная и энергия волн является перспективным направлением возобновляемой энергетики.

Ветрогенератор – механизм, который состоит из лопастей, улавливающих энергию ветра и передающих вращательный момент на хаб (концентратор и ротор). В хабе вращение передается через умножитель (увеличивает скорость вращения) к генератору, который преобразует механическую энергию в электричество.

Для контроля работы механизма предусмотрены тормоз и электрическая система управления, расположенные в гондоле (корпус, в котором размещены основные механизмы). Система ориентации регулирует положение гондолы, чтобы направлять лопасти в сторону ветра.

Вся конструкция установлена на мачте, обеспечивающей устойчивость. Полученная электроэнергия передается потребителю через подсоединение линий передачи энергии.

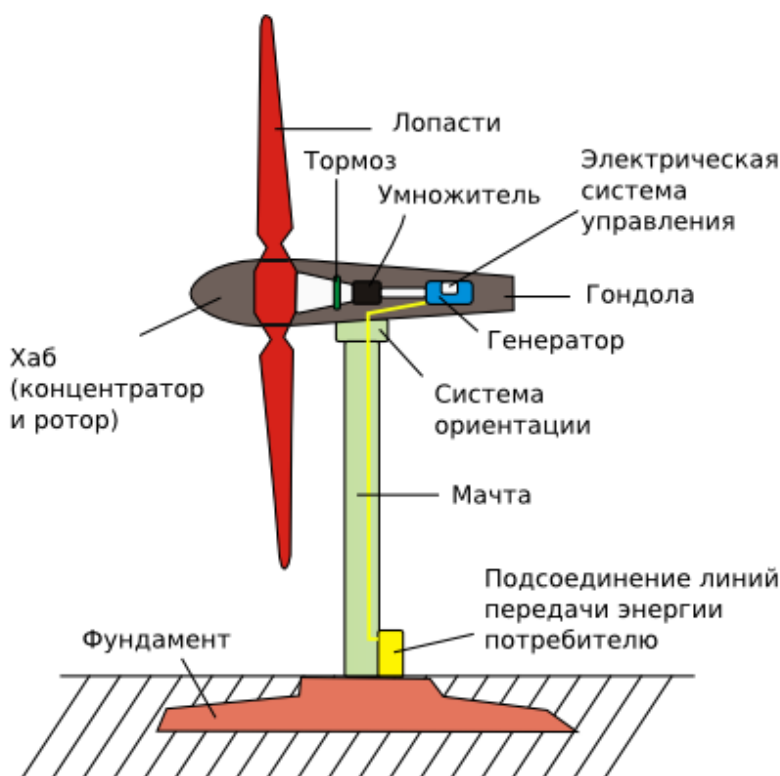


Рисунок 1 – Устройство ветрогенератора.

Основная часть

Обледенение лопастей ветряных турбин является одной из серьезных эксплуатационных проблем, особенно в регионах с холодным климатом. Лед, который образуется на поверхности лопастей, снижает их аэродинамику, увеличивает массу конструкции и, собственно, повышает механические нагрузки на турбину. Это приводит к снижению выработки энергии, ускоренному износу оборудования, возможным поломкам, а как следствие, к увеличению затрат на обслуживание. Однако современные технологии, основанные на использовании электроники, позволяют эффективно решать эту проблему, обеспечивая надёжную работу ветряных электростанций.



Рисунок 2- Обледеневшие лопасти ветрогенератора.

Наиболее распространенный путь решения данной проблемы является внедрение систем обогрева лопастей. Современные ветряные турбины оснащаются встроенными нагревательными элементами, которые предотвращают образование льда. Эти элементы представляют собой нагревательные кабели или гибкие электрические нагреватели, интегрированные в конструкцию лопастей. В основе работы данных систем лежат датчики температуры, которые фиксируют изменения окружающей среды и включают обогрев при достижении критических температурных значений. Автоматическое управление позволяет минимизировать энергопотребление и включать систему только при необходимости, что делает процесс обогрева экономически эффективным.

Дополнительно для контроля лопастей применяются современные системы мониторинга. В их состав входят датчики влажности и температуры, анемометры и другие измерительные приборы, которые отслеживают метеорологические условия. Полученные данные передаются в центральную систему управления, где информация анализируется. После чего система принимает решение о включении или отключении нагревательных элементов. Такой подход дает возможность как оперативно реагировать на погодные изменения, так и прогнозировать потенциальные риски обледенения лопастей генератора.

Для обогрева лопастей ветряных турбин могут использоваться гибкие нагревательные элементы. Они могут быть встроены в конструкцию лопастей без особого увеличения их массы и габаритов. В качестве примера возьмем 3M™ Flexible Heater.

Сам нагревательный элемент изготавливается из сплава никеля и хрома (Ni-Cr), из-за чего он обладает высоким электрическим сопротивлением и стабильностью при работе в области высоких температур. Элемент производится в виде травленной фольги, что дает равномерное распределение тепла по всей площади. Сплав находится между слоями стекловолокна, пропитанного силиконом, благодаря чему конструкция становится прочной и гибкой, а силикон в добавок защищает нагреватель от влаги и химических воздействий, что позволяет использовать его в агрессивных средах. А для надежного крепления и упрощения монтажа на одну из поверхностей наносится клеевой слой на основе акрила. Нагревательный элемент работает в температурном диапазоне от -50°C до $+150^{\circ}\text{C}$. Из преимуществ можно выделить его гибкость, что позволяет адаптировать элемент к любой форме лопастей, пыле, влагоустойчивость, защиту от вибраций и внешних воздействий и толщину до 3 мм, что позволяет минимизировать влияние на аэродинамические свойства, массу и габариты лопастей. В качестве источника питания можно использовать 12V/24V/48V постоянного тока от генератора или аккумулятора.

Для мониторинга температуры возьмем DS18B20 — это цифровой датчик температуры, который может быть использован для точного измерения температуры в широком диапазоне от -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$, что идеально подходит для контроля температуры в обогревательных системах лопастей. Датчик делает примерно 1 измерение в секунду, что позволяет оперативно реагировать на климатические изменения. Питается он от аккумулятора или генератора 3.3V или 5V.

DS18B20 относится к низкому ценовому сегменту, благодаря чему его можно использовать с больших масштабах.

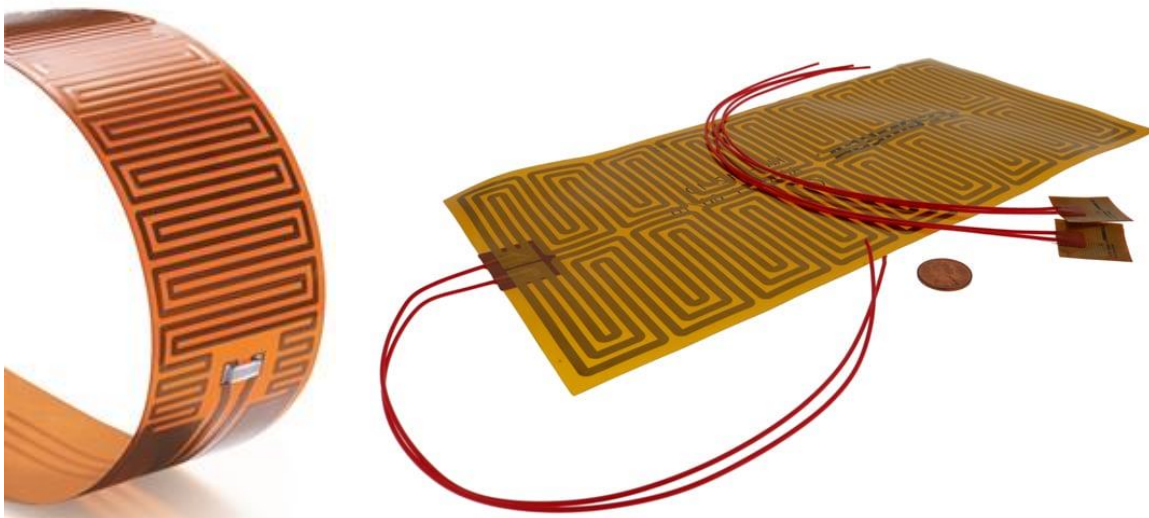


Рисунок 3 – 3M™ Flexible Heater.

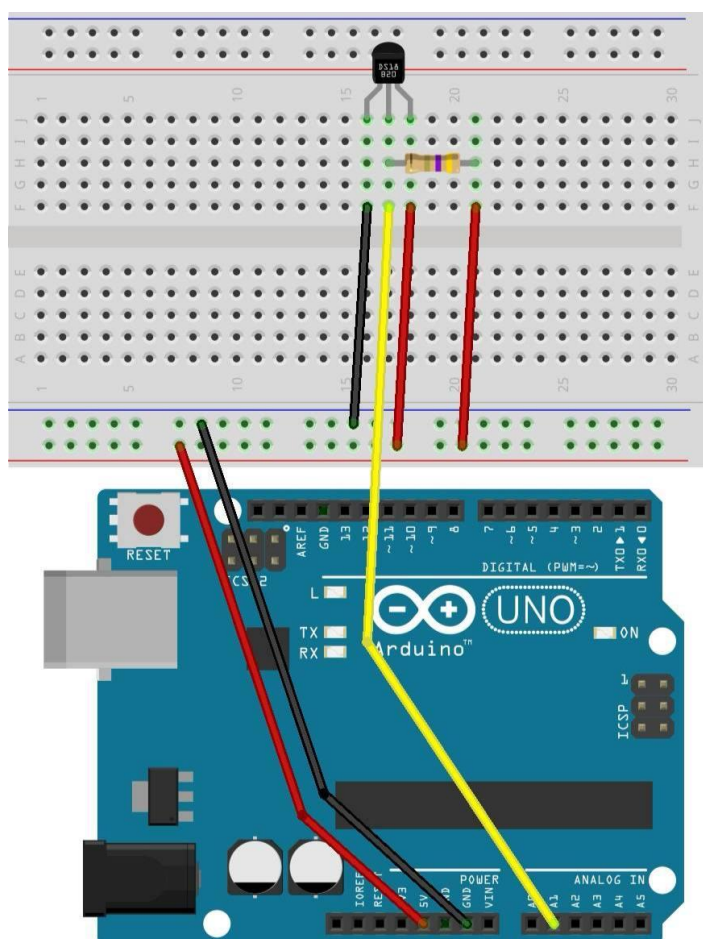


Рисунок 4 – Схема подключения датчика DS18B20 к платформе Arduino.

Для отслеживания уровня влаги будем использовать DHT22 (известный также как AM2302) — цифровой датчик температуры и влажности, который широко используется в системах автоматизации, метеостанциях и климатических

системах. Он обеспечивает точные измерения относительной влажности с погрешностью $\pm 2\text{--}5\%$ RH. Его использование в купе с датчиком температуры позволит анализировать условия обледенения и прогнозировать появление льда на лопастях. Источником питания может служить генератор или аккумулятор 3.3V – 5V.

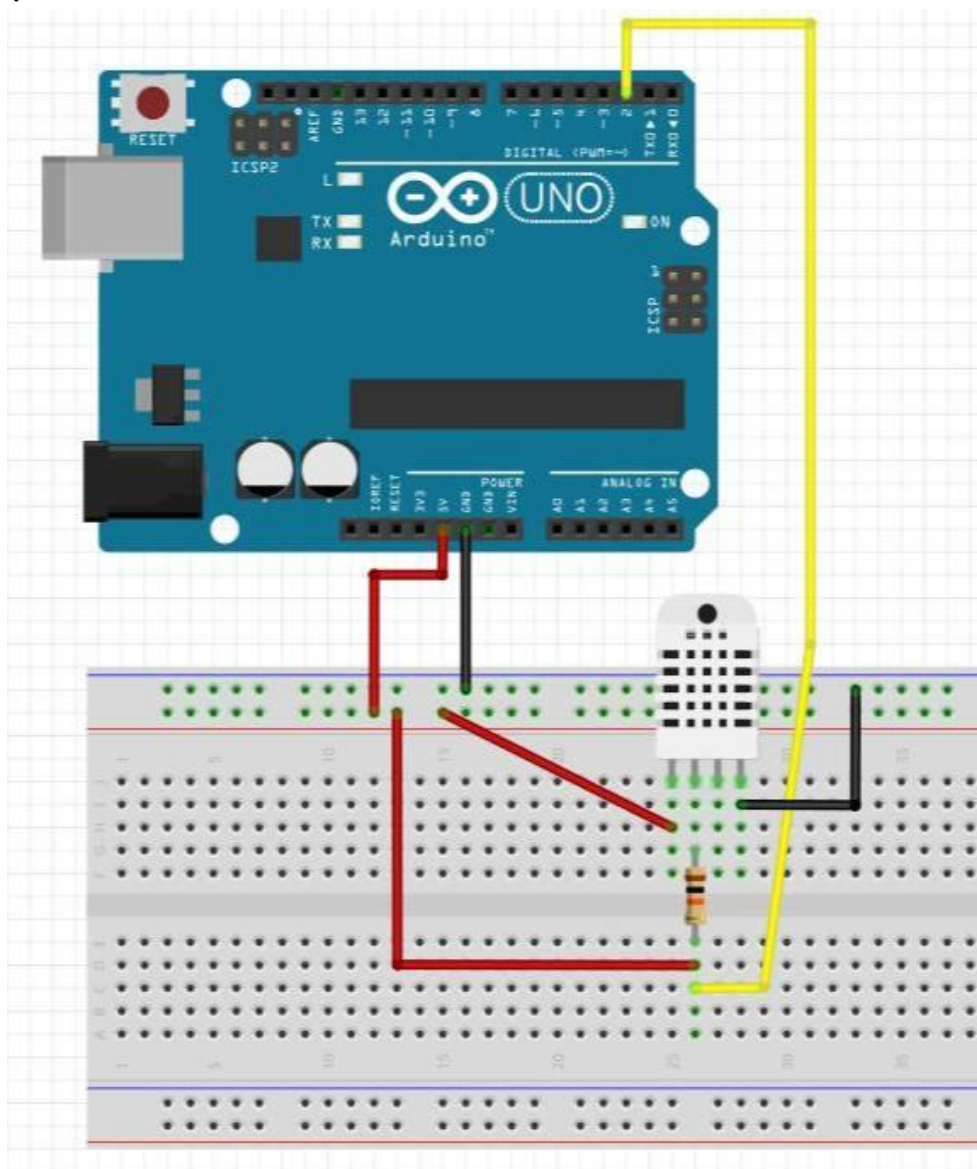


Рисунок 5 – Схема подключения датчика DHT22 к платформе Arduino.

Также для дополнительного анализа погодных условий можно использовать анемометры. Adafruit Anemometer – это датчик скорости ветра, который измеряет скорость воздушного потока. Ветер приводит чашки во вращательное движение, после чего механическая энергия преобразуется в особый электрический сигнал. Этот прибор позволяет измерять скорость воздушного потока в диапазоне от 0 до 32 м/с. Он изготовлен из прочного пластика, устойчивого к ультрафиолетовому излучению и неблагоприятной погоде.

В качестве центрального контроллера данной системой можно использовать такие платформы как Arduino или Raspberry Pi. Они будут регулярно считывать данные с датчиков, анализировать информацию и управлять системой обогрева лопастей. Если, например, температура падает ниже 0°C , система посылает сиг-

нал на обогревательные элементы. А чтобы не допустить случаев перегрева, система также будет отключать, обогрев при достижении определенного порога, например, 5 °С. Также платформу можно дополнить системой связи, например, Wi-Fi модуль, чтоб данные отправлялись на сервер или в мобильное приложение, что дает возможность удаленного мониторинга.

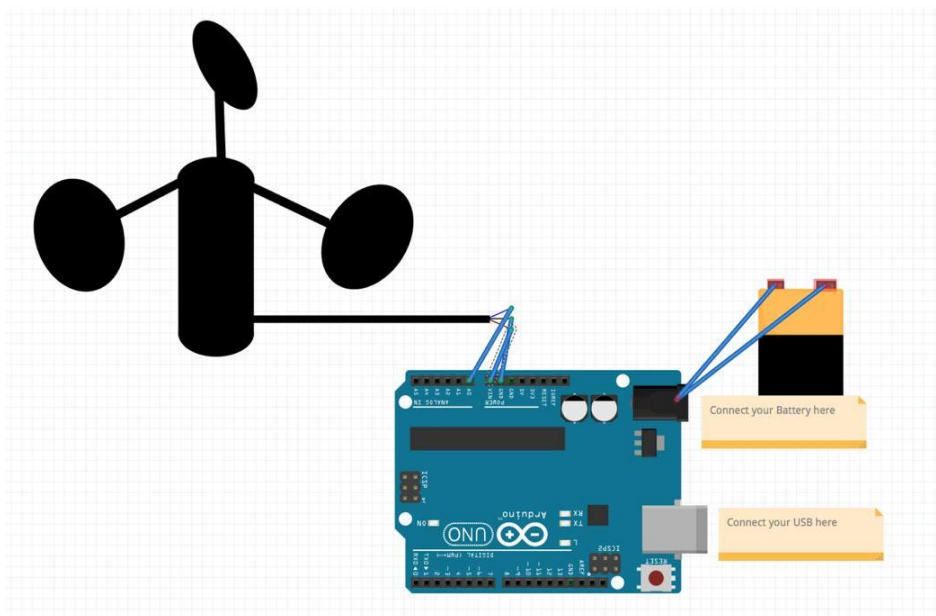


Рисунок 6 – Схема подключения анемометра Adafruit Anemometer к платформе Arduino.

Заключение

Использование электронных систем для борьбы с обледенением дает ряд существенных преимуществ. Прежде всего, это повышение надежности работы ветряной электростанции. Снижается риск повреждений лопастей и других конструктивных элементов турбины, что уменьшает вероятность аварийных ситуаций. Кроме того, предотвращение образования льда сокращает затраты на техническое обслуживание, поскольку уменьшается потребность в частых проверках и ремонтах. Еще одним важным преимуществом является оптимизация энергопотребления. Благодаря интеллектуальному управлению системой обогрева удастся расходовать энергию максимально эффективно, что снижает эксплуатационные расходы и делает работу ветряных турбин более экономичной.

Литература

1. Долгий, С. В. Антиобледенительные системы ветряных турбин: принципы работы и перспективы развития. — Москва: Энергетика, 2021.
2. Гончаров, А. П., Смирнов, В. Л. Современные технологии защиты от обледенения в энергетике. — Санкт-Петербург: Политех-пресс, 2019.
3. Колесников, Ю. В. Использование электроники в системах автоматического управления ветрогенераторами. — Новосибирск: Наука и техника, 2020.
4. <https://www.techinsider.ru/technologies/678773-obledenenie-lopastey-vetrovyh-turbin-mozhet-snizit-effektivnost-vyrabotki-energii-na-80>

УДК 621.3.

**КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРОВ
И СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ**
**QUANTUM TECHNOLOGIES: OPERATING PRINCIPLES OF TRANSI-
STORES AND INFORMATION STORAGE SYSTEMS**

А.Д. Чубукова

Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

zukovskya@bntu.by

A. Chubukova

Supervisor – T. Zhukovskaya, Senior lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: Квантовые транзисторы предлагают преимущества над традиционными и могут интегрироваться в существующие схемы. Квантовое хранение данных с кубитами повышает скорость и безопасность информации.

Abstract: Quantum transistors offer advantages over traditional ones and can be integrated into existing circuits. Quantum data storage with qubits increases the speed and security of information.

Ключевые слова: квантовые технологии, квантовые транзисторы, суперпозиция, запутанность, вычислительные системы, эффективность, кубиты, носители заряда.

Keywords: quantum technologies, quantum transistors, superposition, entanglement, computing systems, efficiency, qubits, charge carriers.

Введение

Квантовые технологии представляют собой одну из самых перспективных областей современных исследований, обещая революционные изменения в вычислительных системах и обработке информации. Квантовые транзисторы, основанные на уникальных квантовых явлениях, таких как суперпозиция и запутанность, обеспечивают возможность выполнения операций с гораздо большей эффективностью по сравнению с традиционными полупроводниковыми транзисторами. Понимание ключевых отличий и принципов работы квантовых транзисторов, их интеграции в существующие системы, а также потенциала для создания новых решений в области хранения данных поможет глубже оценить их влияние на будущее технологий.

Основная часть

Квантовые транзисторы – это устройства, которые используют квантовые эффекты для выполнения операций, связанных с обработкой и передачей информации. В отличие от стандартных полупроводниковых транзисторов, которые используют классические принципы физики, квантовые транзисторы опираются на явления суперпозиции и запутанности.

Основные отличия квантовых транзисторов от стандартных:

1. Принципы работы:

- Стандартные транзисторы используют управляющий ток или напряжение для изменения состояния устройства (включение/выключение).

- Квантовые транзисторы используют квантовые состояния и манипуляции с квантовыми состояниями для выполнения операций.

2. Носители заряда:

- В стандартных транзисторах носителями являются электроны и дырки.

- В квантовых транзисторах носителями могут быть не только электроны, но и квазичастицы, такие как магноны или поляритоны.

3. Скорость и эффективность:

- Квантовые транзисторы могут потенциально работать быстрее и эффективнее за счет уменьшения размеров и энергии, необходимых для управления состоянием.

4. Состояния:

- Стандартные транзисторы имеют два классических состояния (включен/выключен).

- Квантовые транзисторы могут находиться в суперпозиции состояний, что позволяет им выполнять несколько операций одновременно.

Принципиальные схемы квантового транзистора:

Квантовый точечный транзистор (электронный):

Он использует квантовые точки для управления текущим потоком. Управляющее напряжение изменяет состояние квантовой точки, позволяя или блокируя поток тока.

Квантовый электронный транзистор, или одноэлектронный транзистор (SET), работает на основе явления кулоновской блокады, которое возникает в полупроводниковых квантовых точках. Эти точки, имея размеры в несколько нанометров, позволяют электронам перемещаться только в дискретных орбиталях.

Основные элементы SET включают два туннельных перехода и изолированный проводящий участок, называемый «островком». Управляя напряжением на затворе, можно контролировать поток электронов между истоком и стоком (рисунок 1).

При определенных условиях, когда кулоновская энергия превышает тепловую, электроны могут проходить через туннельный переход по одному, создавая ток, который изменяется скачкообразно при изменении напряжения. Это приводит к эффекту «кулоновской лестницы», где ток увеличивается порциями, соответствующими количеству электронов (рисунок 2).

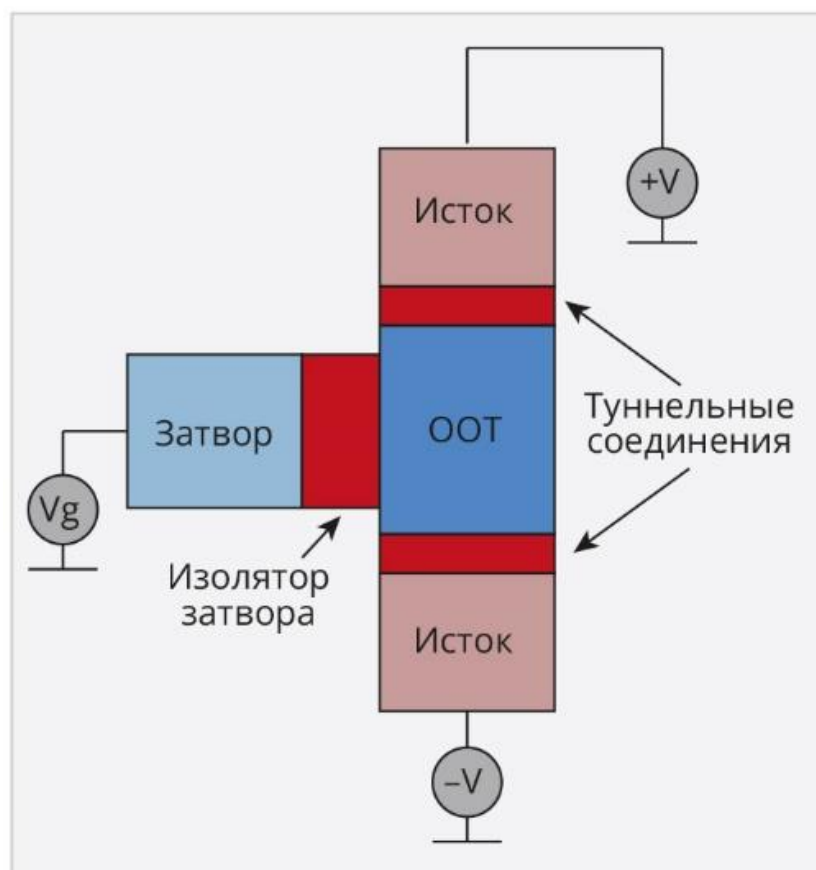


Рисунок 1 – Структурная схема квантового точечного транзистора

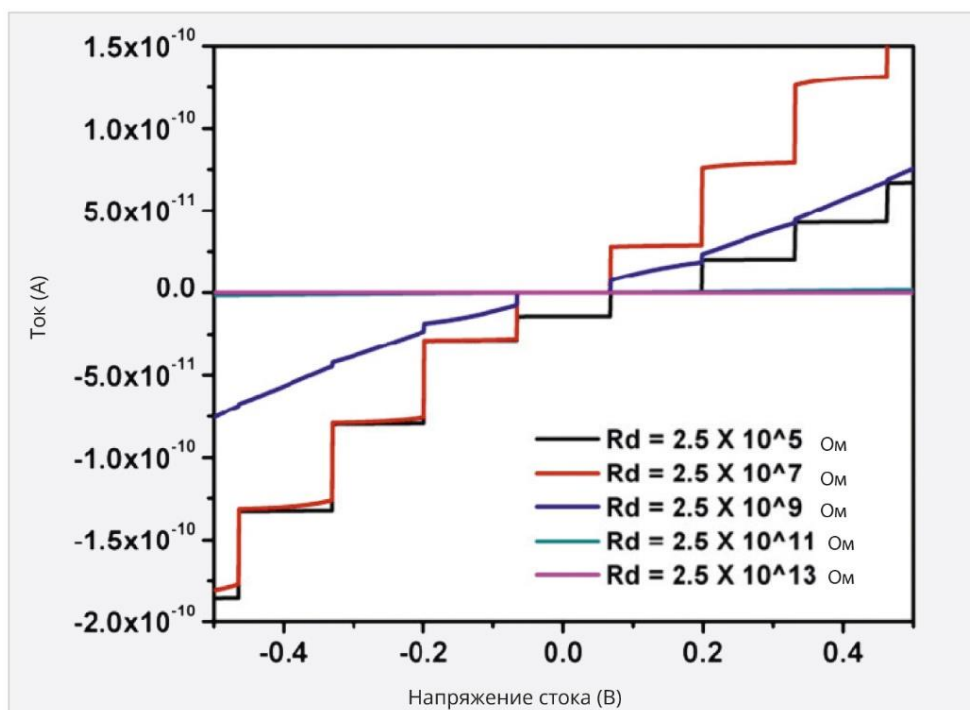


Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики квантового точечного транзистора для различных значений стокового сопротивления туннельного перехода («Кулоновская лестница»)

Интеграция квантовых транзисторов в существующие схемы представляет собой значительный шаг вперед в области вычислений и обработки информации. Хотя квантовые устройства все еще находятся на ранних стадиях разработки, их потенциал может привести к трансформации многих технологий.

Вот некоторые ключевые возможности и аспекты интеграции квантовых транзисторов:

1. Повышение вычислительной мощности

Квантовые транзисторы способны обрабатывать информацию с использованием квантовых битов (кубитов), которые могут находиться в состоянии суперпозиции. Это позволяет выполнять множество расчетов одновременно, что увеличивает вычислительную мощность в сравнении с классическими транзисторами.

2. Квантовые вычисления

Квантовые транзисторы могут стать основным элементом квантовых вычислительных систем. Они могут интегрироваться в схемы, поддерживающие квантовые алгоритмы, что значительно ускоряет комплексные вычисления, такие как факторизация и оптимизация.

3. Улучшенная эффективность

Интеграция квантовых транзисторов может привести к снижению потребляемой энергии благодаря уменьшению размеров устройств и повышению скорости передачи информации. Это особенно актуально для мобильных устройств и систем с ограниченными ресурсами.

4. Гибридные системы

Комбинация квантовых транзисторов с классическими транзисторами может привести к созданию гибридных систем, где квантовые транзисторы используются для специфических задач, требующих высокой вычислительной мощности, в то время как классические транзисторы обрабатывают обычные задачи.

5. Устойчивость к ошибкам

Квантовые транзисторы могут быть разработаны с учетом коррекции ошибок и устойчивости к шумам, что может улучшить надежность вычислений.

6. Применение в области связи

Квантовые транзисторы могут интегрироваться в схемы для квантовых коммуникаций, используя принципы квантовой запутанности и суперпозиции для обеспечения защищенной передачи данных.

7. Физические ограничения

Хотя возможности интеграции квантовых транзисторов обещают много, существуют физические и технические ограничения. Например, управление квантовыми состояниями требует низких температур и вакуума, что вызывает сложности в интеграции с существующими технологиями.

8. Стандартизация и совместимость

Для успешной интеграции квантовых транзисторов необходимо разработать стандарты и протоколы, позволяющие взаимодействовать между классическими и квантовыми устройствами.

Квантовые системы хранения данных

Существуют квантовые системы хранения информации, которые представляют собой перспективное направление в области квантовых вычислений и информатики.

Кубит – это основная единица информации в квантовых системах, аналогичная классическому биту. Однако, в отличие от классического бита, который может находиться только в одном из двух состояний (0 или 1), кубит может находиться в состоянии суперпозиции, то есть одновременно в состоянии 0 и 1. Это свойство позволяет производить сложные вычисления с параллельной обработкой данных.

Квантовые системы хранения данных:

Исследования в области хранения данных с использованием кубитов перспективны благодаря следующим аспектам:

- Суперпозиция: Обеспечивает хранение нескольких значений одновременно, что позволяет увеличить объем хранимой информации.

- Запутанность: Кубиты могут быть запутаны, что позволяет передавать информацию с высокой степенью безопасности и снизить время доступа к данным.

- Коррекция ошибок: Разработка квантовых кодов коррекции ошибок позволяет сохранять информацию даже при наличии ошибок, возникающих из-за декогерентности.

Квантовые системы используют для повышения скорости и безопасности хранения информации

- Увеличенная скорость:

Квантовые системы могут обрабатывать информацию в параллельном режиме благодаря суперпозиции. Это означает, что для определенных задач время обработки может быть значительно уменьшено по сравнению с классическими системами, где каждая единица информации обрабатывается последовательно.

- Безопасность:

Использование квантовых ключей может гарантировать безопасность передачи данных. Запутанные состояния кубитов обеспечивают защиту от перехвата, поскольку любое вмешательство в систему приведет к изменению квантового состояния, о чем можно будет сразу узнать.

- Кодирование данных:

Квантовое кодирование дает возможность хранить информацию в более защищенную форму, делая данные нечитаемыми для злоумышленников.

Квантовые системы хранения данных используют в:

- Квантовых облачных вычислениях;
- Технологии глубокого обучения и ИИ;
- Безопасная онлайн-транзакция.

Заключение

Квантовые транзисторы представляют собой передовые устройства, использующие квантовые эффекты для обработки информации, что открывает новые горизонты в вычислительных системах. Их уникальные свойства, такие как суперпозиция и запутанность, позволяют значительно повысить вычислитель-

ную мощность и эффективность по сравнению с традиционными полупроводниковыми транзисторами. Интеграция квантовых транзисторов в существующие технологии обещает революцию в области хранения данных, квантовых вычислений и связи. Несмотря на существующие технические и физические ограничения, перспективы создания гибридных систем и разработки стандартов для взаимодействия между квантовыми и классическими устройствами подчеркивают важность дальнейших исследований в этой области. Квантовые технологии могут не только ускорить обработку данных, но и обеспечить высокий уровень безопасности, что делает их ключевыми для будущих инноваций в информатике и смежных дисциплинах.

Литература

1. Алексеев, В. Квантовые электронные компоненты. Часть 2. Квантовые транзисторы / В. Алексеев // Современная электроника. – 2023. – №5. – С. 6–9.
2. Квантовые-размерные структуры в электронике: транзисторные структуры и клеточные автоматы : методическое пособие / В. В. Парфенов. – Казань : КГУ, 2007. – с. 7. – URL: https://kpfu.ru/docs/F686035527/07_quantum.pdf [обп.pdf](#) (дата обращения: 01.04.2024).
3. Квантовые вычисления. / Квантовые технологии. – URL: <https://habr.com/ru/articles/785424/> (дата обращения: 02.04.2025).

УДК 621.3.

ДИАГНОСТИКА И УСТРАНЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

DIAGNOSTICS AND TROUBLESHOOTING OF POWER TRANSMISSION LINES USING SPECIALIZED EQUIPMENT

А.Н. Лесота, А.Д. Котов

Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

zukovskya@bntu.by

A. Lesota, A. Kotov

Supervisor – T. Zhukovskaya, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: Современная политическая обстановка вынуждает Республику Беларусь направлять свои энергоресурсы на внутренний рынок страны, а ввиду того, что планируется развитие электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года, вопрос о модернизации линий электропередач становится основополагающим.

Abstract: the current political situation forces the republic of belarus to direct its energy resources to the domestic market of the country, and due to the fact that it is planned to develop electric generating capacities and electric networks for the period up to 2030, the issue of modernization of power transmission lines becomes fundamental.

Ключевые слова: ЛЭП, реактор, обледенение, DiLin.

Keywords: PTL, reactor, icing, DiLin.

Введение

В настоящее время ввиду развития технологий в жизни всё большего числа людей входят электроприборы. Развитие производств, заводов, строительство городов и новых жилых зон требует организацию трансфера энергии. Поэтому, исходя из растущих потребностей в ней, энергосистема необратимо увеличивается в размерах, что приводит зачастую к эксплуатации линий электропередач в сложных климатических и природных условиях.

Основная часть

При эксплуатации линий электропередач в низких температурах возникает обледенение токоведущих частей и изоляторов. Для борьбы с обледенением проводов линий электропередач применяются различные приборы и технологии, которые предотвращают образование льда или удаляют уже образовавшийся лед. Для предотвращения и устранения последствий разработан широкий спектр технологии и приборов, способных эффективно справляться с этой проблемой. Образование гололеда на токоведущих частях может привести к увлечению массы проводов, а это в свою очередь приведет к серьезным последствиям как: обрыв

проводов, разрушение изоляторов, обрыв грозозащитного троса, пляска проводов, повреждение опоры, схлест проводов из-за резкого сброса льда, приводящий к междуфазному замыканию в сети.

Гололёд на линиях электропередач образуется в результате сложных атмосферных явлений, связанных с замерзанием капель дождя, мороси или тумана при отрицательной температуре. При высокой влажности и низкой температуре водяной пар из воздуха оседает на поверхности проводов. При температуре ниже точки замерзания, конденсировавшаяся влага превращается в лед (рисунок 1).



Рисунок 1 – Слой льда на проводах ВЛ

Толщина гололёда существенно влияет на массу провода, что приводит к обрыву проводов и поломке металлических опор. Кроме гололёда, на воздушный ЛЭП может возникать зернистая изморозь в виде снеговидного и рыхлого льда, которая также образуется в туманную и ветреную погоду. Изморозь налипает на провода и может нарастать довольно долго, причём толщина слоя также может достигать десятков сантиметров. На проводах ВЛ холодный атмосферный фронт зачастую меняется на более тёплый, что сопровождается порывистыми движениями воздушных масс, аэродинамическое воздействие которых на провода приводит большому колебанию. Данные природные явления в совокупности и вызывают гололёдные аварии в электрических системах. При расчете ВЛ и их элементов должны учитываться климатические условия ветровое давление, толщина стенки гололеда, температура воздуха, степень агрессивного воздействия окружающей среды, интенсивность грозовой деятельности, колебания проводов и тросов, вибрация.

Для эффективной борьбы с гололёдом на ВЛ необходим расчёт удельных нагрузок:

$$P = \frac{\pi b(d+b)\rho g}{s},$$

где P – нагрузка от веса гололёда, Н;

g — ускорение свободного падения, м /с²;

s — площадь поперечного сечения провода, мм²;

ρ — плотность льда, г/см³;

d — диаметр провода, мм²;

b — толщина стенки гололёда, зависящая от климатического района по гололёду, мм;

$$P_2 = \frac{\alpha C_x (d + 2b) \rho g \sin \beta}{s},$$

α — коэффициент неравномерности ветра по длине пролёта;

C_x — аэродинамический коэффициент;

q — скоростной напор ветра, Па;

β — угол между направлением ветра и проводами, рад.

Существуют различные методы мониторинга образования гололеда на воздушных линиях электропередачи, они позволяют прогнозировать вероятность образования гололеда на основе погодных условий: органолептический (визуальный осмотр ВЛ); инструментальный; аналитический. Самым распространенным и простым способом является визуальный осмотр линий. С наступлением холодного времени года оперативно-выездные бригады периодически выезжают на осмотр ВЛ на предмет образования на них гололеда.

Вторым распространенным способом является инструментальный мониторинг гололедообразования на ВЛ. Он позволяет своевременно обнаруживать накопления льда и предотвращать аварийные ситуации. Для данного способа применяются датчики: гололедной нагрузки, температуры, влажности воздуха, скорости и направления ветра.

К числу методов борьбы с гололёдом на проводах ЛЭП с помощью приборов можно отнести плавку переменным током путём создания искусственных коротких замыканий или постоянным током с использованием неуправляемых или управляемых выпрямительных блоков. Новые средства борьбы с гололёдными отложениями на проводах ВЛ предусматривают использование комбинированных преобразовательных установок, способных при необходимости осуществлять плавку гололёда, а всё остальное время — компенсацию реактивной мощности [1].

Плавка гололеда, основанная на термическом воздействии, применяется на ВЛ напряжением ниже 220 кВ с проводами сечением менее 240 мм². Источником питания служат, как правило, шины 6 – 10 кВ подстанций или отдельный трансформатор. Схема плавки гололёда должна выбираться таким образом, чтобы обеспечить протекание по проводам ВЛ тока в 1,5 – 2 раза превышающего длительно допустимый ток. Такое превышение оправдано кратковременностью процесса плавки (примерно 1 ч), а также более интенсивным охлаждением провода в зимний период. Для сталеалюминиевых проводов типа АС сечением 50 – 185 мм² ориентировочный уровень одночасового тока плавки гололёда лежит в пределах 270 – 600 А, а тока, предупреждающего образование гололёда на проводах, – в пределах 160 – 375 А». Необходимый уровень тока короткого замыкания зачастую невозможно подобрать только за счёт выбора схемы плавки гололёда. Повышение тока плавки сверх указанных значений может привести к прожиганию проводов, что в свою очередь послужит причиной необратимой потери их прочности. Однако меньшей величины тока короткого замыкания однократного

пропускания для полного удаления гололёда может оказаться недостаточно. Это в свою очередь повлечет за собой многократное пропускание токов короткого замыкания, что может привести к худшим последствиям. Чтобы избежать негативных последствий для ВЛ, можно использовать тиристорный регулятор переменного напряжения. В режиме плавки гололёда выключатель 7 выключен, выключатель 8 включен. Возможные способы регулирования тока плавки — импульсно фазовый посредством изменения углов включения силовых тиристоров 1 – 3 или широтно-импульсный — посредством изменения числа периодов подачи напряжения. В режиме компенсации реактивной мощности выключатель 7 включен, а выключатель 8 выключен. В этом случае силовые тиристоры 1 – 3 и реакторы 4 – 6 образуют тиристорно-реакторную группу, соединённую в треугольник, которая представляет собой элемент статического тиристорного компенсатора. Допускается также возможность использования конденсаторов вместо реакторов. В этом случае компенсация реактивной мощности будет осуществляться с помощью регулируемой конденсаторной батареи. Стоит отметить, что независимо от способа регулирования, процесс плавки гололёда осуществляется переменным током промышленной частоты, что требует больших значений мощностей источника питания 22 (десятки МВА), так как индуктивное сопротивление проводов воздушной линии значительно больше активного сопротивления. Большая реактивная нагрузка обуславливает увеличение полной мощности источника. Чтобы повысить эффективность плавки, необходимо использовать продольную ёмкостную компенсацию индуктивного сопротивления в случае использования конденсаторов в составе установки (рисунок 2).

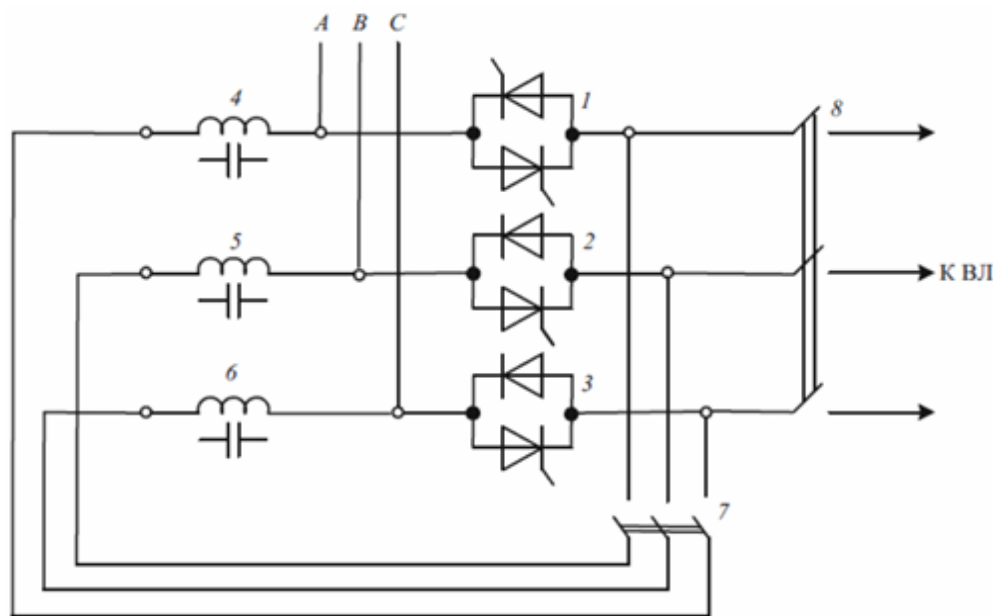


Рисунок 2 - Установка для компенсации реактивной мощности и плавки гололеда

Метод, основанный на термодинамическом воздействии, заключается в предварительном разогреве провода с последующим термодинамическим ударом, из-за которого происходит сброс льда с проводов. Следовательно, в случае частого образования гололедной муфты, недостатком такого способа является

ускоренное изнашивание провода из-за частого воздействия термодинамических ударов.

Также для борьбы с уже образовавшейся коркой льда на проводах используют систему, позволяющую на принципе действия силы Ампера в параллельных проводниках избавиться от этого неприятного погодного явления [2]. При протекании тока параллельные провода притягиваются или отталкиваются. Если периодически пропускать импульсы тока по проводам ВЛ, они будут совершать механические колебания, которые позволят разрушить гололёдные отложения. Частота импульсов тока должна быть близкой к механическому резонансу с амплитудой, достаточной для преодоления внешних и внутренних сил трения. Изменение пропускаемого тока может быть строго периодическим, иметь качающуюся частоту, изменяться по гармоническому закону.

На этом методе основан принцип работы системы DiLin, которая включает в себя (рисунок 3):

- измерительные приборы и датчики;
- генератор тестовых импульсов TPG;
- WDM-приёмник для датчиков температуры
- роутер для передачи информации;



Рисунок 3 - Система DiLin в рабочем состоянии

К уже отключённой от напряжения воздушной линии присоединяют:

- силовой трансформатор, который создаёт необходимое напряжение;
- блок силовой электроники, который формирует импульсы тока;
- системы управления, обрабатывающие информацию с различных датчиков, и вносит корректировки в форму и частоту импульсов тока.

В итоге, за счёт колебаний тока, возникают механические колебания линий электропередач, и корка льда растрескивается.

Чтобы избежать возможных негативных последствий резонанса, необходим тщательный и точный расчет уровня и частоты импульсов тока. Пропускать импульсы следует по проводам, лежащим на разных уровнях, чтобы повысить эффективность разрушения гололеда. Дополнительным разрушающим фактором выступают сила тяжести и инерция льда, при его опадении. К недостаткам данного способа можно отнести необходимость отключения ВЛ. Однако положительной стороной данного метода является меньшая продолжительность затрачиваемого времени, по сравнению с плавкой. Соответственно, затраты электроэнергии сравнительно меньше.

Заключение

Ввиду наличия большого разнообразия устройств и приборов, которые помогают отслеживать состояние сетей и предотвращать образование гололёда на линиях электропередач, можно смело говорить о возможностях успешного развития всей энергосистемы.

Литература

1. Елизарьев А.Ю., Валиев А. Р. Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи без отключения потребителей// «Вестник УГАТУ», № 4, 2015 г. [электронный ресурс]. -Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/plavka-gololeda-na-vozdushnyh-liniyah-elektroperedachi-bez-otklyucheniya-potrebitелей/viewer> /. – Дата доступа: 16.03.2025.
2. Соловьев В.А., Черный С.П., Сухоруков С.И. Об эффективности борьбы с гололедными образованиями на проводах линий электропередач// «ЭСиК», № 1, 2014 г. [электронный ресурс]. -Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-effektivnosti-borby-s-gololednymi-obrazovaniyami-na-provodah-linij-elektroperedachi/viewer> /. – Дата доступа: 16.03.2025.