

XI МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

XI Международная научно-практическая конференция

Инновационные перспективы Донбасса

XI Международная научно-практическая конференция
Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса



XVI Международная научно-техническая конференция
Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование



XXV Международная научно-техническая конференция
Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых



II Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов
Металлургия XXI столетия глазами молодых

Том 2. Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ДОННТУ)**

СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ ДОННТУ

**РОССИЙСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА**

**ФГБОУ ВО «ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

НИЦ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПАРТНЕРСТВА ГОСУДАРСТВА И БИЗНЕСА

ИННОВАЦИОННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДОНБАССА

**Сборник научных трудов 11-й Международной
научно- практической конференции
Том 2. Перспективы развития
электротехнических, электромеханических и
энергосберегающих систем.**

**г. Донецк
27-29 мая 2025 года**



Донецк – 2025

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

ББК 65.30

УДК 330.341 (477.61/62)

И
66
Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 27-29 мая 2025 г. –
Донецк: ДонНТУ, 2025.
Т. 2: 2. Перспективы развития электротехнических,
электромеханических и энергосберегающих систем. – 2025. – 118 с.

Сборник научных трудов 11-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса», состоявшейся 27-29 мая 2025 г. в Донецке на базе ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет». В сборнике представлены статьи ученых и специалистов по вопросам приоритетных направлений научно-технического обеспечения инновационного развития Донбасса и формирования механизмов повышения социально-экономической эффективности развития региона.

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

Редакционная коллегия

Ректор ДонНТУ А.Я. Аноприенко, ректор ДонГТУ Д.А. Вишневский, и.о. ректора РХТУ им.Д.И. Менделеева Румянцев Е.В., директор АНО «НИЦ стратегического партнерства государства и бизнеса» О.Ф. Шахов, проректор ДонНТУ С.В. Борщевский, канд. техн. наук А.Н. Корчевский, канд. техн. наук О.Л. Кизияров, докт. техн. наук Э.Г. Куренный, канд. техн. наук Д.И. Морозов, д-р техн. наук С. П. Еронько, канд.техн.наук А.М. Зинченко, канд. техн. наук С.В. Горбатко, канд. фарм. наук В.С. Федорова, канд. техн. наук А.А. Кравченко, д-р экон. наук Н.В. Гришко, канд. техн. наук И.В. Филатова, канд.техн.наук Д.В. Пронский, канд. техн. наук Р.В. Мальчева, докт. экон. наук Е.Е. Бизянов, председатель Совета молодых ученых ДонНТУ М.П. Руденко.

Под общей редакцией Захарова Андрея Владимировича

Контактный адрес редакции

УНИ ДонНТУ, ул. Артема, 58, Донецк, 283001

Тел.: +7 (856) 305-35-67. Эл. почта: ipd.donntu@yandex.ru

Интернет: <http://ipd.donntu.ru>

© ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
Министерство образования и науки ДНР, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Д. В. Полковниченко, Е. П. Озолин, Я. О. Олексюк. Исследование опыта в области построения подземных подстанций в России и мире</i>	<i>6</i>
<i>А.А. Булгаков, А. Е. Блезниченко. Расчет механической прочности провода с композитным сердечником для высоковольтной линии электропередачи.....</i>	<i>16</i>
<i>А.А. Булгаков, А. А. Олейник. Расчет установившегося режима для электрической сети с нелинейными нагрузками.....</i>	<i>22</i>
<i>И. П. Васьковский, Д. В. Полковниченко. Исследование влияния показателей качества электроэнергии в питающей сети на достоверность и точность диагностирования асинхронных электродвигателей</i>	<i>29</i>
<i>А.В. Захаров, Е. М. Ляхов. Применение программного комплекса CoppeliaSim для моделирования и анализа роботизированных систем на примере лабораторного стенда с манипулятором Rozum Robotics PULSE 75.....</i>	<i>38</i>
<i>А.В. Захаров, Р. А. Кузьменко. Разработка драйвера для управления силовыми ключами обратимого DC-DC преобразователя высокой мощности</i>	<i>42</i>
<i>Д.В. Бажутин, Б.А. Калинин. Разработка виртуальной модели робота-манипулятора в среде ROS</i>	<i>48</i>
<i>С.Н. Ткаченко, Д.А. Тонкошкур. Анализ способов определения скольжения асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций</i>	<i>53</i>

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

Т.И. Хайруллин, Д.А. Исаков, Р.Р. Насыров. Разработка и апробация физических моделей электроэнергетических систем на основе критериев подобия..... 63

А.Д. Иваницкий, Н.Ш. Чемборисова. Использование чувствительности элементов сети для повышения экономичности функционирования ЭЭС 68

В.А. Пронина, М.В. Бурмейстер, И.И. Бердышев, Л.А. Веренцов Разработка имитационной модели системы автоматического управления силовым преобразователем со статизмом по частоте для расчета переходных процессов в изолированной энергосистеме .. 73

Е.О. Ефимов. Концепция интеллектуального управления энергопотреблением в жилых зданиях на основе данных IoT и алгоритмов адаптивной оптимизации 78

Е.О. Ефимов. Энергогенерирующие покрытия для общественных пространств: концепция использования пьезоэлектрических материалов в пешеходных зонах..... 83

Е.О. Ефимов. Оптимизация энергопотребления систем вентиляции жилых зданий на основе анализа временных графиков нагрузки.. 87

Е.О. Ефимов. Оптимизация режимов работы уличного освещения на основе сезонной динамики естественной освещенности 91

Е.А. Изотов, И.А. Бершадский, В.В. Якимшина. WEB-приложение «расчет молниезащиты многократными стержневыми молниеприёмниками»..... 94

А.Н. Назарычев, Д.Д. Манукян. Модель определения фактического сработанного ресурса электроагрегатов нефтегазовых предприятий с учетом индекса технического состояния..... 99

**Перспективы развития электротехнических,
электромеханических и энергосберегающих систем.**

О.К. Маренич, А.А. Тараненко. Пути повышения эффективности максимальной токовой защиты низковольтных электрических сетей 104

А.В. Сенецкий, В.В. Понуровская, Д.О. Сенецкая. Создание автономной климатической системы..... 109

И.В. Скворцов, Ю.Е. Скворцова, Я.Э. Шклярский. Снижение воздействия провалов напряжения в системах ЧРП за счёт применения суперконденсаторных систем..... 114

УДК 621.311

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТА В ОБЛАСТИ ПОСТРОЕНИЯ
ПОДЗЕМНЫХ ПОДСТАНЦИЙ В РОССИИ И МИРЕ**

Д.В. Полковниченко, Е.П. Озолин, Я.О. Олексюк
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

В работе рассматривается опыт строительства подземных подстанций в России и мире, их преимущества и недостатки, конструктивные особенности и требования к их проектированию.

The paper studies the experience of constructing underground substations in Russia and the world, their advantages and disadvantages, design features and requirements for their design.

Ключевые слова: подземная подстанция, элегаз, распределительное устройство, трансформатор, изоляция, мегаполис.

Keywords: underground substation, SF₆, switchgear, transformer, insulation, metropolis.

Главной целью энергетической политики любого государства является обеспечение его энергетической безопасности как основной составляющей национальной безопасности в целом.

Современные мегаполисы обладают рядом специфических особенностей:

- высокая плотность застройки;
- сокращение свободных площадей внутри города, необходимых для развития его инфраструктуры;
- высокие требования к электромагнитной совместимости электрических сетей высокого и сверхвысокого напряжения с оборудованием техносферы и коммуникационными сетями, а также – к допустимому уровню воздействия электромагнитных полей на человека;
- наличие крупных производственных центров и большого числа автотранспорта (который является основным источником загрязнения изоляции воздушных линий (ВЛ) и оборудования подстанций (ПС);
- высокая стоимость свободной земли в городской черте;
- повышенные эстетические требования к архитектурному облику построек и сооружений, расположенных в черте города (в том числе и к объектам электроэнергетики).

Все это серьезно осложняет развитие и поддержание необходимого уровня надежности энергосистем мегаполисов. Очевидно, что возведение традиционных открытых

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

распределительных устройств (ОРУ) и ВЛ в таких условиях в большинстве случаев невозможно [1].

В связи с перечисленными выше факторами строительство подземных подстанций (ПП) представляет собой перспективное направление развития электроэнергетики. Их широкое внедрение требует совместных усилий государства, бизнеса и науки, направленных на создание благоприятных условий для развития этой технологии.

Также, в условиях современной геополитической обстановки и возрастающей угрозы атак с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), актуальность строительства подземных электрических ПС приобретает критическое значение. Традиционные наземные ПС, являясь ключевыми элементами энергетической инфраструктуры, становятся уязвимыми целями для потенциальных диверсий и атак с использованием БПЛА, что может привести к серьезным перебоям в электроснабжении и масштабным экономическим последствиям.

Повышенная защита от физического воздействия, обеспечиваемая подземным размещением, значительно снижает риск повреждения оборудования и нарушения функционирования ПС в результате прямых попаданий или взрывов. Кроме того, ПП менее заметны и сложнее для обнаружения, что затрудняет планирование и осуществление атак.

Внедрение ПП является стратегическим шагом для обеспечения надежности и устойчивости энергетической системы, минимизации рисков, связанных с современными угрозами, и гарантирования бесперебойного электроснабжения потребителей.

Целью работы является исследование опыта построения подземных подстанций в России и мире, их преимуществ и недостатков, особенностей конструктивного исполнения.

В мировой практике, особенно в густонаселенных городах Европы и Азии, ПП стали решением проблемы нехватки земли и улучшения эстетики городской среды. Примерами служат ПС в Токио, Гонконге и Париже, интегрированные в инфраструктуру и обеспечивающие надежное энергоснабжение.

В Японии, Австралии, Швейцарии, США и других странах в мегаполисах реализованы проекты полностью герметизированных и автоматизированных компактных подземных необслуживаемых ПС с напряжением 66-330 кВ и элегазовой изоляцией. Эти ПС являются пожаробезопасными и располагаются под землей, что значительно сокращает объёмы используемой земли и даёт возможность возведения

над ПС многоэтажных зданий, зон отдыха горожан или объектов сферы услуг [2].

Первая в мире ПП 500 кВ Shin-Toyosu была сооружена в Японии (г. Токио). Здание ПС разделено на три сектора, в которых установлено оборудование, в числе которого комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией (КРУЭ) 500 кВ, обеспечившее увеличение надежности и экономию места. Подземная передающая линия 500 кВ – самая протяженная в мире длиной 40 км с использованием кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена. ПС расположена на пяти этажах, только один из которых над землей. На ней установлены два трансформатора мощностью по 1500 МВА и 10 элегазовых выключателей на напряжение 500 и 275 кВ [3];

Первая в Германии подземная трансформаторная ПС расположена в центральной части банковского квартала г. Франкфурта. Причиной нового строительства в грунте явилась острая нехватка свободных площадей в городе. На ПП произведен монтаж трех современных трансформаторов мощностью 50 МВА.

В 2011 г. было завершено строительство первой на постсоветском пространстве ПП 110 кВ № 227 в Азербайджане. Её главной задачей являлось обеспечение бесперебойного электроснабжения горнолыжного курорта «Шахдаг» на севере Азербайджана. ПС оснащена двумя трансформаторами мощностью 63 МВА каждый. Также в Азербайджане начато строительство второй ПП 110 кВ «Баил» мощностью 2×80 МВА.

ПП мощностью 50 МВА, построенная в швейцарском г. Винтертуре, находится под спортивной ареной St.Gallen, не только подогревает само поле, на зеленой траве которого можно играть круглый год, но и отапливает школьное здание.

В Испании в районах Мадрида компанией Iberdrola построено 6 ПП, среди которых ПС 220/20 кВ MIRASIERRA (установлены две рабочие системы шин 220 кВ с восемью присоединениями, 4 трансформатора и две рабочие системы шин 20 кВ с 64 присоединениями), крупная ПС 220/132/20/15 кВ EL PILAR (установлено КРУЭ 220 кВ и 132 кВ), ПС 220/20 кВ DEPORTIVA (установлено КРУЭ 220 кВ).

Первая ПП Park Substation в г. Анахайм (США, Калифорния) расположена на территории в 2 акра и обслуживает район Восточный Анахайм. На ПС установлено КРУЭ с номинальными характеристиками – 69 кВ, 40 кА, что позволило уменьшить необходимое пространство на 30% по сравнению с обычной ПС [4].

В г. Сиднее (Австралия) ПС Haymarket 330/110 кВ является частью

торгового комплекса. Эта узловая в городской системе электроснабжения ПС построена на ограниченной территории на нескольких этажах, большинство из которых расположены под землей [2].

В России, несмотря на значительные территории, в крупных городах также наблюдается дефицит земли, особенно в исторических центрах. Однако, опыт строительства ПП пока ограничен. Реализованные проекты, такие как ПС в Москве и Санкт-Петербурге, демонстрируют технологическую возможность и экономическую целесообразность строительства ПП.

ПС «Сколково» и «Смирново» первые в России ПП и считаются примером внедрения современных и передовых решений в энергетике. Эти ПС – единственные в России магистральные сетевые объекты, расположенные под землей (на глубине 12 и 19 метров соответственно). Обеспечивают электроснабжение резидентов «Сколково», в том числе дата-центра «Сбербанка», научно-исследовательских подразделений компаний СИБУР, «Трансмашхолдинг» и «Татнефть», а также жилых кварталов, социальной инфраструктуры и сети зарядных станций для электротранспорта. Являются основными центрами питания интеллектуальной распределительной сети на территории «Сколково» – одного из крупнейших наукоёмких проектов «Россети ФСК ЕЭС».

На ПС «Сколково» установлены два элегазовых трансформатора 220/20 кВ мощностью по 63 МВА производства Toshiba (Япония) (рис. 1), разработанные для использования на подземных энергообъектах. Ранее подобные автотрансформаторы в России не применялись. Главная их особенность – компактный размер, позволяющий сэкономить много площади. Обычные трансформаторы занимают в три-четыре раза больше места. Второе достоинство трансформатора – он не огнеопасен.



Рисунок 1 – Элегазовый трансформатор 220/20 кВ мощностью по 63 МВА
производства Toshiba (Япония)

При использовании в оборудовании элегазовой изоляции отпадает необходимость в противопожарном оборудовании (огнетушителях), маслосборниках. В случае внутренних неисправностей подъем давления в баке элегазового трансформатора крайне мал, что исключает вероятность взрыва.

Свойства газа делают ненужными в конструкции трансформатора расширительный бак и устройства сброса давления, что позволяет уменьшить высоту помещения ПС. В случае с трансформаторами класса 275 кВ/300 МВА можно добиться снижения высоты на 2-2,5 м.

Компактность компоновки ПС достигается также за счет того, что нет необходимости разделять трансформатор и коммутационную аппаратуру противопожарной перегородкой и разносить по разным помещениям. Напротив, такой трансформатор удобно сопрягать с элегазовой коммутационной аппаратурой.

На ПС «Сколково» для распределения электрической энергии на напряжении 220 кВ сооружено РУ 220 кВ по схеме «четырёхугольника», тип исполнения РУ – КРУЭ. Для распределения электрической энергии на напряжении 20 кВ сооружается РУ 20 кВ, тип исполнения РУ – КРУ 20 кВ. Трансформаторы имеют расщеплённую обмотку 20 кВ. Нейтраль 20 кВ заземлена через низкоомный резистор.

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

ПС «Смирново» имеет восьмиугольную форму и располагается в нижней части четырёхэтажного офисного здания. В центральном зале установлены два элегазовых трансформатора 220/20 кВ мощностью по 63 МВА, а также КРУЭ на напряжение 220 кВ.

В феврале 2013 г. на ПС «Сколково» введена в эксплуатацию система мониторинга технологического оборудования, выполняющая мониторинг и диагностику двух элегазовых трансформаторов GDAF-63000/220/21/21, а в конце июня 2013 г. аналогичная система введена в работу на ПС «Смирново».

В ПС установлены системы автоматического пожаротушения, их баллоны заполнены газом «Инерген», состоящим из азота, аргона и углекислого газа [4, 5].

В 2011 г. в Кронштадте в рамках работы «Оборонэнерго» по восстановлению и реконструкции Кронштадтского Морского собора была построена двухтрансформаторная ПП мощностью 2×2500 кВА. Целью строительства была необходимость повышения энергообеспеченность объекта и сохранение при этом исторического внешнего вида площади рядом с Собором.

Конструкция применённой ПП уникальна, она сочетает в себе малые габариты, стойкость к агрессивным грунтам с тяжелой гидрологией и большую (2×2500 кВА) мощность. При строительстве были применены современные РУ с возможностью дистанционного мониторинга, а так же сухие пожаробезопасные трансформаторы с литыми обмотками производства «BEZ-transformatory» (Словакия-Россия), с пониженными потерями, компактными габаритами и низким уровнем шума [6].

На рис. 2 показана установка в котлован блока № 3 РУ высокого и низкого напряжений ПП в Кронштадте.



Рисунок 2 – Установка в котлован блока № 3 РУ ВН и НН

ПАО «Ленэнерго» запустило первую ПП в Адмиралтейском районе Санкт-Петербурга (рис. 3). Строительство ПС началось в октябре 2016 г. На ПС установлены два сухих трансформатора общей мощностью 2 МВА и автоматическая система учета с интеллектуальными счетчиками электроэнергии [7].



Рисунок 3 – Подземная подстанция в г. Санкт-Петербург

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

На стадии проектирования ПП предъявляются специфические требования (также должны быть применены меры по их соблюдению), такие как [2]:

- пожаробезопасность (разделение оборудования по разным секциям в разных помещениях, использование современного безмасляного оборудования, современных систем пожаротушения и т.п.);

- шумоизоляция (использование звукопоглощающих устройств и конструкций, соответствующее расположение оборудования — источников шума);

- не превышать допустимый уровень вибрации (установка антивибрационных прокладок под оборудование — источник вибрации);

- не превышать допустимый уровень магнитного излучения (установка экранов);

- защита от наводнений и превышения уровня подземных вод (установка водонепроницаемых панелей, заграждений и конструкций);

- возможность круглосуточного доступа и входа в помещения подстанции для проведения ремонтных работ, замены оборудования и т.п.;

- обеспечение достаточной свободной площади рядом с подстанцией для подъезда и размещения средств для транспортировки, ремонта и технического обслуживания оборудования;

- эффективное использование подземного пространства (применение компактного оборудования) и т.д.

Всё это значительно увеличивает стоимость сооружения ПС под землей.

К основным конструктивным особенностям исполнения ПП относятся.

1. Применение КРУЭ позволяет значительно уменьшить площади и объемы, занимаемые (РУ и обеспечить возможность более легкого расширения по сравнению с традиционными РУ. Также использование КРУЭ обеспечивает следующие преимущества:

- многофункциональность – в одном корпусе совмещены сборные шины, выключатель, разъединители с заземляющими разъединителями, трансформаторы тока, что снижает размеры и увеличивает надежность открытых РУ;

- взрыво- и пожаробезопасность;

- надежность и стойкость к воздействию внешней среды, в т.ч. сейсмически активных районов и зон с повышенной загрязненностью;

- отсутствие электрических и магнитных полей.

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

2. Безопасность и удобство эксплуатации, простота монтажа и демонтажа.

3. Монолитное литье корпуса, который не имеет швов и пустот, что обеспечивает механическую защиту оборудования и его устойчивость к пожару.

4. Использование асбестных труб, которые устойчивы к возгоранию и перегреву, при этом не проводят электричество.

5. Система вентиляции и охлаждения, поддерживающая оптимальный температурный режим для оборудования, которая монтируется с наружным выходом, предназначенным для исключения конденсата на внутренних стенках оборудования.

6. Кабельный лоток, через который проводится внутренняя электрика к освещению и другим элементам электрического оборудования.

7. Защита от наводнений и превышения уровня подземных вод, для чего устанавливают водонепроницаемые панели, заграждения и конструкции.

8. Использование специальных битумных средств для защиты заглубленной части ПС от гидроскопических и механических факторов воды.

9. Использование источников света на 36 В, т.к. ПП – объект повышенной опасности.

Экономическая эффективность ПП оценивается с учетом стоимости земли, затрат на строительство и эксплуатацию, а также снижения потерь электроэнергии за счет близости к потребителям. Несмотря на более высокие начальные инвестиции, ПП могут быть экономически оправданы в долгосрочной перспективе, особенно в условиях высокой стоимости земли и необходимости минимизации воздействия на окружающую среду.

В перспективе, развитие ПП в России будет связано с цифровизацией и автоматизацией процессов управления и мониторинга. Внедрение интеллектуальных систем управления позволит оптимизировать работу ПС, повысить ее эффективность и снизить эксплуатационные затраты.

Перспективные направления развития ПП включают интеграцию с возобновляемыми источниками энергии и системами накопления энергии. Это позволит повысить устойчивость энергосистемы и снизить зависимость от традиционных источников энергии. Подземные подстанции могут стать важным элементом интеллектуальных энергосистем будущего, обеспечивая гибкость и надежность электроснабжения.

Перспективы развития электротехнических, электроμηχανических и энергосберегающих систем.

Внедрение новых технологий и материалов, таких как композитные конструкции и высокотемпературные сверхпроводники, может значительно улучшить характеристики ПП. Развитие систем мониторинга и диагностики позволит оперативно выявлять и устранять неисправности, предотвращая аварийные ситуации.

Важным аспектом является экологическая безопасность ПП. Необходимо минимизировать воздействие на окружающую среду, разрабатывая системы защиты от утечек масла и других загрязняющих веществ. Использование экологически чистых материалов и технологий также способствует снижению экологического следа ПП.

Выводы

Проведенные в работе исследования позволили сделать следующие выводы:

- современное градостроительство сталкивается с необходимостью эффективного использования городского пространства, что приводит к росту интереса к ПП;
- выбор в пользу ПП обусловлен комплексом факторов: высокая стоимость земли, экологические требования, архитектурные ограничения и необходимость повышения надежности электроснабжения;
- перспективы развития ПП в России связаны с внедрением передовых технологий, снижением затрат на строительство и эксплуатацию, а также с разработкой нормативной базы, учитывающей специфику подземного строительства.

Перечень ссылок

1. Кузнецов, Д. В. Развитие энергосистем мегаполисов на примере Санкт-Петербурга / Д. В. Кузнецов, Е. О. Васильев // Энергия единой сети. – 2013. – № 5(10). – С. 78-85.
2. Акчурина, С. Целесообразность сооружения в городах подземных подстанций / С. Акчурина, Г. Шведов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2013. – № 6(21). – С. 176-179.
3. Алексеев, Б. А. Подстанции глубокого ввода / Б. А. Алексеев // Энергоэксперт. – 2009. – № 1. – С. 92-97.
4. Ухабова, А. Российские пионеры / А. Ухабова // Энергия единой сети. – 2012. – № 2(2). – С. 26-29.
5. Подземная подстанция 220 кВ «Сколково» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://digitalsubstation.com/blog/2013/02/01/podzemnaya-podstantsiya-220-kv-skolkovo/>.
6. Подземная 2х-трансформаторная подстанция в бетонном корпусе мощностью 2×2500кВА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elec.ru/viewer?url=/files/2012/11/14/Kronshtadt-METK-Fotootchyot.pdf>.
7. В Петербурге запущена первая в России подземная подстанция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sdelanounas.ru/blogs/88203/>.

УДК 621.315.1

**РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПРОВОДА С
КОМПОЗИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ
ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

А.А. Булгаков, А.Е. Блезниченко

ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Рассмотрены вопросы применения современных проводов с композитным сердечником для проектирования воздушных линий электропередачи высокого напряжения. Разработана программа для автоматизации элементов механического расчета провода. Выполнен практический расчет механической прочности проводов для габаритного пролета модельной высоковольтной линии электропередачи при использовании проводов марок АС 240/32, АССС Glasgow 245, АССС Lisbon 325. Расчеты произведены для климатических условий Донбасса.

The study addresses the application of modern composite core conductors in the design of high-voltage overhead power transmission lines. A software tool has been developed to automate components of the mechanical calculation of conductors. A practical analysis was carried out to assess the mechanical strength of conductors for a standard span of a model high-voltage transmission line, using conductor types AC 240/32, ACCC Glasgow 245 and ACCC Lisbon 325. The calculations were performed based on the climatic conditions specific to the Donbas region.

Ключевые слова: провод, линия электропередачи, механический расчет, пролет.

Keywords: conductor, power transmission line, mechanical calculation, span

Постановка задачи. Развитие и своевременная модернизация электрических сетей – залог экономической успешности региона. Развитие промышленности Донбасса естественным образом обуславливает сооружение новых и реконструкцию существующих воздушных линий электропередачи (ЛЭП), необходимых для обеспечения надёжного, качественного и доступного энергоснабжения потребителей. При этом могут быть использованы как традиционные марки проводов (например, АС), так и современные провода различных типов и конструкции.

Опыт внедрения на территории России проводов нового поколения, имеющих значительные отличия по техническим

характеристикам от классических сталеалюминевых проводов, невелик, и исследования вопросов применения проводов с композитным сердечником для воздушных ЛЭП на территории Донбасса являются актуальными.

Цель работы: выявить и оценить преимущества использования провода с композитным сердечником типа АССС при проектировании воздушной ЛЭП напряжением 110 кВ на территории Донбасса.

Технические характеристики и конструктивные особенности. АССС (*Aluminium Composite Core Conductor*) – провод с однопроволочным композитным сердечником и токопроводящей частью, выполненной из скрученных вокруг сердечника концентрическими повивами трапециевидных алюминиевых проволок. При сравнительно одинаковых значениях диаметра, масса провода и сечение имеют значительные отличия, поэтому для количественного расчета и сравнения приняты провода эквивалентные как по диаметру, так и по сечению. Для сопоставления рассматриваем провода *АССС Glasgow 245*, *АССС Lisbon 325* близкие по характеристикам к проводу АС 240/32. Технические характеристики проводов показаны в табл.1 [1], [4].

При сравнении конструкции проводов марки АССС с классическими проводами марки АС выделены следующие отличия:

– форма проволок токопроводящей части у провода марки АССС трапециевидная, что обеспечивает большую компактность.

– количество проволок сердечника, обеспечивающих достаточную прочность. Марка *Lisbon 325* содержит один стержень из углеродного волокна, у марки АС 240/32 – сердечник состоит из 7 стальных проволок.

Механический расчет провода. Систематический расчет механической прочности проводов и тросов воздушных ЛЭП выполняется по методу допустимых напряжений [2]. Механический расчет проводов и тросов ВЛ выполняется с целью определения напряжений в проводе и стрел их провеса. Напряжение в проводе находят из уравнения состояния провода:

$$\sigma - \frac{\gamma^2 l^2}{24\beta\sigma^2} = \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 l^2}{24\beta\sigma_0^2} - \frac{\alpha}{\beta}(t - t_0)$$

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

где l – длина пролета; σ_0 , – напряжение в проводе, γ_0 – удельная нагрузка, t_0 – температура в исходном режиме; σ , γ , t – соответствующие значения для искомого режима провода, α – температурный коэффициент линейного удлинения, β – коэффициент упругого удлинения.

В [2] нормируется допустимое вертикальное расстояние от нижней точки нижнего провода до земли.

Таблица 1 – Технические характеристики проводов

Наименование	АС 240/32	АССС Glasgow 245	АССС Lisbon 325
Масса, кг/км	921	749,8	956,6
Диаметр, мм	21,6	20,79	21,78
Площадь сечения провода в целом, мм ²	275,95	286,9	358,4
Напряжение при наибольшей нагрузке и наименьшей температуре, Н/мм ²	126	181	130
Напряжение при среднегодовой температуре, Н/мм ²	84	120	87
Коэффициент линейного удлинения, $1/^\circ\text{C} \cdot 10^6$	19,8	1,61	1,61
Модуль упругости, Н/мм ²	77000	112300	112300

Автоматизация расчетов. Для выполнения исследования был разработан расчетный файл, который позволяет автоматизировать систематический механический расчет провода. Для расчетов использована программа *Mathcad*. Реализован расчет промежуточных величин, выбор необходимых коэффициентов, расчет удельных нагрузок, критических пролетов, а также определение напряжений в проводе и стрел провеса для различных длин пролета и сочетаний климатических нагрузок в заданных расчетных режимах. Фрагмент реализации показан на рис.1.

Программа позволяет рассчитать величины механических напряжений в проводе и стрелы провеса для различной длины пролетов, что весьма удобно для проведения исследования и анализа результатов.

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

Отметим, что в [2] на данный момент нет величин для большинства коэффициентов характеризующих климатические условия на новых территориях и необходимых для выполнения расчетов механической прочности провода.

Соотношение критических пролетов		Допустимый габарит до земли		Допустимая стрела провеса						
Случай = 1 $l_{1k} < l_{2k} < l_{3k}$		$f_d = 7$		$f_{таб} = 6.1$						
Значения механических напряжений и стрел провеса для различных длин пролета и расчетных режимов.										
stack($\sigma I, \sigma II, \sigma III, \sigma IV, \sigma V, \sigma VI, \sigma VII$) =		0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	"R/L"	50	60	70	80	90	100	110	120
	1	"I"	88.63	91.52	94.55	97.67	100.83	104	107.16	110.2
	2	"II"	0.33	0.46	0.61	0.77	0.94	1.12	1.32	1.53
	3	"III"	87.85	90.52	93.33	96.23	99.19	102.16	105.13	108
	4	"IV"	0.31	0.44	0.58	0.74	0.9	1.08	1.27	1.47
	5	"V"	81.81	82.45	83.17	83.96	84.82	85.72	86.67	87.52
	6	"VI"	0.16	0.23	0.31	0.4	0.5	0.61	0.73	0.86
	7	"VII"	81.03	81.35	81.72	82.13	82.59	83.07	83.59	84
	8	"I"	0.13	0.18	0.25	0.32	0.4	0.49	0.59	0.7
	9	"V"	52.36	53.34	54.39	55.51	56.67	57.86	59.06	60.16
	10	"II"	0.2	0.28	0.37	0.47	0.58	0.71	0.84	0.98
	11	"VII"	126	126	126	126	126	126	126	125.85
12	"I"	0.08	0.12	0.16	0.21	0.26	0.32	0.39	0.47	

Рисунок 1 – Фрагмент расчетного файла

Результаты исследования. Для практических расчетов выбрана модельная ЛЭП 110 кВ. Расчет проводился для габаритного пролета. Принята промежуточная железобетонная опора ПБ 110-5 с высотой до нижней траверсы 14,5 м [4]. С учетом длины изоляционного подвеса габаритная стрела провеса составила провода 6,1 м.

Соотношения критических пролетов для трех рассматриваемых марок проводов различны. Параметры исходного режима для классического провода определялись на основании первого и третьего критических пролетов (случай 1 [3]), для композитных проводов – только третьего (случай 3 [3]).

Результатом работы программы являются расчетные значения механических напряжений в проводе и стрел провеса для различных расчетных режимов [3]. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что наибольшие стрелы провеса возникают в режиме наибольшей нагрузки (табл.2). Значение длины пролета, при котором соблюдается допустимый габарит до земли, для провода АС для заданных исходных данных, составило 250 м. Для марок АССС 245 и

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

325 310 м и 290 м соответственно (рис 2).

В режиме наибольшей нагрузки среднее изменение стрелы провеса для классического провода составило 0,5 м в сравнении с 0,3 м для Glasgow и 0,38 м для Lisbon. При этом для среднеэксплуатационного режима, а также максимальной и минимальной температуры приращение провеса для композитных проводов составило в среднем 0,15 и 0,28 метров, для провода АС 240 – 0,47 метров.

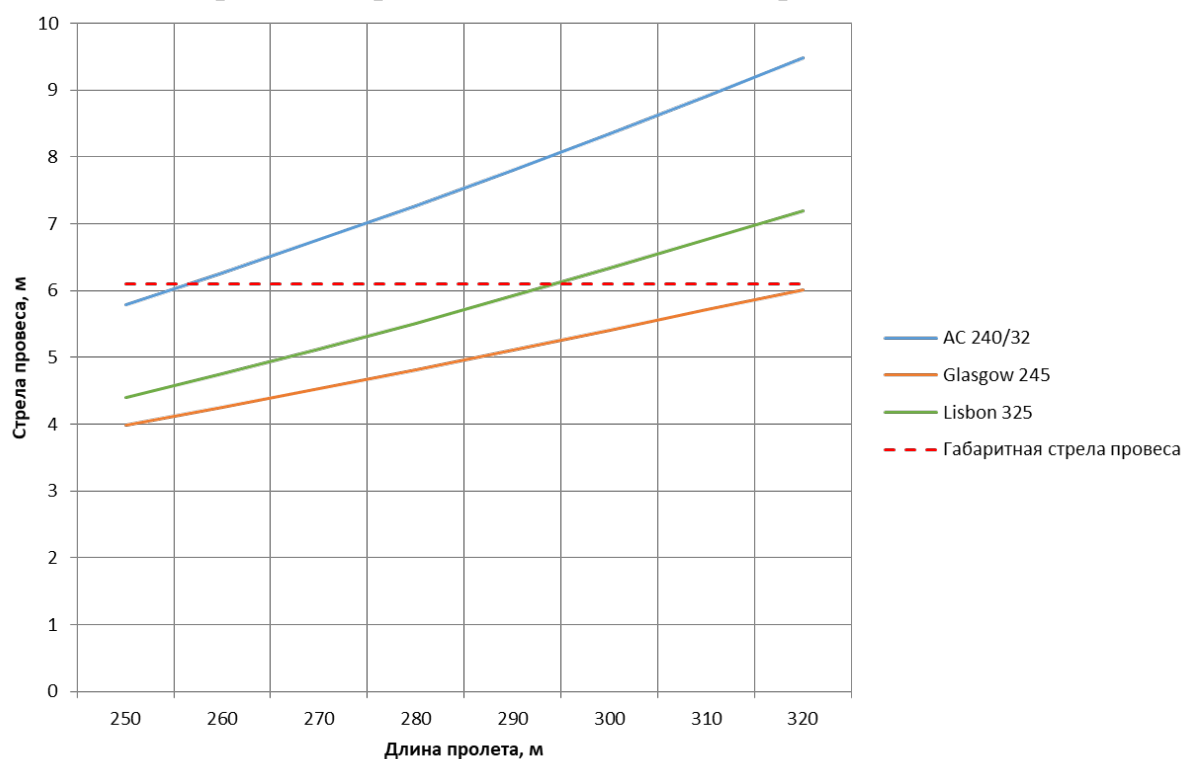


Рисунок 2 – Зависимость стрелы провеса от длины пролета

Таблица 2 – Стрелы провеса в режиме наибольшей нагрузки

Длина пролета	АС 240/32	Glasgow 245	Lisbon 325
250	5,79	4,09	4,51
260	6,27	4,37	4,81
270	6,76	4,66	5,13
280	7,27	4,95	5,51
290	7,8	5,25	5,92
300	8,34	5,55	6,33
310	8,91	5,86	6,76
320	9,49	6,18	7,2

Выводы

1. Из рассмотренных марок проводов для габаритного пролета модельной воздушной ЛЭП 110 кВ провод АССС Glasgow 245 имеет минимальное изменение стрелы провеса при высоких температурах.

2. Анализ результатов механического расчета для провода с композитным сердечником Glasgow 245 и провода марки АС 240/32 на основании сравнения расчетных напряжений и стрел провеса показал принципиальную возможность увеличения длины пролета: с 250м до 320м при использовании Glasgow 245 для климатических условий Донбасса.

3. Оценка расчетных стрел провеса провода обосновывает возможность использования вместо традиционного провода АС 240/32 провод АССС Lisbon 325 на тех же опорах при том же габарите до земли, что позволяет увеличить пропускную способность ЛЭП в 2,2 раза.

Перечень ссылок

1. Высоковольтные провода для воздушных линий электропередач с композитным сердечником / [Электронный ресурс] // Режим доступа. URL: <https://lamifil.be/overhead-conductors/accc/> (дата обращения: 23.04.2025).
2. «Правила устройства электроустановок: все действующие разделы и главы шестого и седьмого изданий» – Москва: ЭНАС, 2019 – 672 с. ISBN978-5-4248-0162-4
3. Крюков К.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи /Крюков К.П., Новгородцев Б.П.// 2-е изд. перераб. и доп. – Ленинград: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979 – 312 с.
4. Баумштейн И.А. Справочник по электроустановкам высокого напряжения/ Под ред. Баумштейн И.А., Бажанов С.А.// 3-е изд. перераб и доп –Москва: Энергоатомиздат, 1989 – 768 с. ISBN978-5-283-01134-8

УДК 621.311

**РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ДЛЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ**

А.А. Булгаков, А.А. Олейник

ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

В статье рассмотрен расчет установившегося режима для электрической сети с нелинейными нагрузками, который позволяет провести исследования гармонических составляющих напряжений в узлах сети. Расчеты выполнены по методу узловых напряжений. При расчете параметров схемы замещения для различных гармоник для линий электропередачи учтено проявление поверхностного эффекта. Для узлов сети проведена оценка выполнения норм действующего стандарта на качество электрической энергии по несинусоидальности напряжения. Разработан расчетный файл для исследования величин гармонических составляющих напряжения электрической сети при различной величине гармоник токов нагрузки.

The article considers the calculation of the steady-state mode for an electric network with nonlinear loads, which allows us to conduct studies of harmonic components of voltage at the nodes of the network. The calculations are performed by the method of nodal voltages. When calculating the parameters of the substitution scheme for various harmonics for transmission lines, the manifestation of the surface effect is taken into account. For nodes of the network the fulfillment of the norms of the current standard on the quality of electric energy by non-sinusoidality of voltage was evaluated. A calculation file was developed to investigate the values of harmonic components of the electric network voltage at different magnitudes of harmonics of load currents.

Ключевые слова: *качество электроэнергии, несинусоидальность, гармоники, нелинейные нагрузки.*

Keywords: *power quality, non-sinusoidality, harmonics, nonlinear loads.*

Постановка задачи. Несинусоидальность напряжения – это искажение синусоидальной формы кривой напряжения. Основной нормативный документ, регламентирующий нормы высших гармоник напряжения – это ГОСТ 32144-2013 [1]¹.

В электрических системах имеются нелинейные элементы, по которым при приложении к ним синусоидального напряжения

¹ Стандарт по нормам гармоник тока в данный момент находится на обсуждении.

Перспективы развития электротехнических, электроμηχανических и энергосберегающих систем.

протекает несинусоидальный ток, в результате чего кривая напряжения также искажается [2].

Целью статьи является автоматизация расчетных процессов для количественной оценки гармонических составляющих напряжения в узлах электрической сети с одним источником питания.

Нормы несинусоидальности напряжения. Действующий стандарт [1] нормирует величины гармонических составляющих напряжения до 40й гармоники ($n = 1, 2 \dots 40$). Показателями качества по несинусоидальности напряжения являются:

- суммарный коэффициент гармонических составляющих K_U ,
- коэффициенты отдельных гармонических составляющих K_{Un} .

Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в табл. 1, в течение 95% времени интервала в одну неделю.

Таблица 1 – Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения, не кратных трем $K_{U(n)}$

Порядок гармонической составляющей n	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6 - 25	35	110 - 220
11	3,5	2	2	1
13	3,0	2	1,5	0,7
23 и 25	1,5	1	1	0,4

Порядок исследования. Структурная схема исследуемой электрической сети показана на рис.1. Номинальные напряжения сети составляют 35кВ (сторона высокого напряжения) и 6 кВ (сторона низкого напряжения). В схеме сети присутствуют одноцепные воздушные ЛЭП, выполненные проводами марки АС, силовые двухобмоточные трансформаторы типа ТМН номинальной мощностью 4 и 2,5 МВА. Моделируемая электрическая сеть содержит один источник питания.

В работе используется модель электрической нагрузки в виде постоянных токов. Нелинейные нагрузки задаются отдельными токами гармонических составляющих в процентах от составляющей основной частоты. В данном исследовании модель нагрузки содержит только нечетные гармоники тока. Расчет проводится для каждой гармонической составляющей отдельно [3-4]. При моделировании

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

зарядными мощностями ЛЭП пренебрегаем. Напряжение является локальным параметром электрической сети, поэтому оценка требований [1] выполняется для каждого узла сети отдельно.

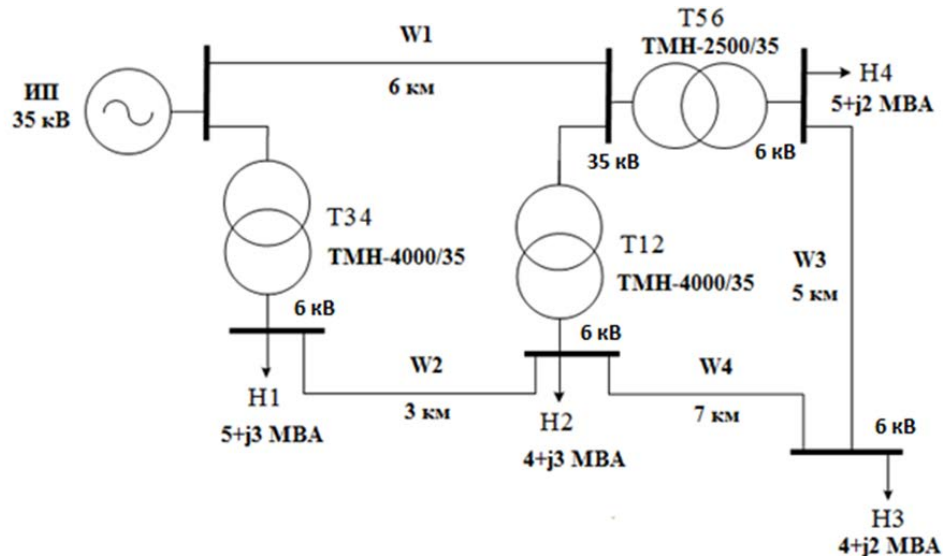


Рисунок 1 – Исходная схема

Расчеты и исследование проводится в несколько этапов:

- задание исходных данных,
- составление расчетной схемы замещения,
- расчет по методу узловых напряжений,
- расчёт коэффициентов гармонических составляющих напряжения для сети,
- кривые задающих тока для каждого узла сети,
- результаты расчета напряжений с учетом гармоник для каждого узла сети,
- оценка соблюдения требований стандарта [1] по несинусоидальности напряжения.

Автоматизацию расчетов удобно выполнять при помощи пакетов программ, например, *Mathcad*. Для количественной оценки воздействия несинусоидальности напряжения был разработан и автоматизирован расчетный файл (программа).

В качестве нелинейной нагрузки рассматриваем 12-фазный преобразователь. Такие электроприёмники характерны для сетей, например, с тяговыми подстанциями.

Практическое моделирование. Для структурной схемы сети составим расчетную схему замещения (рис. 2).

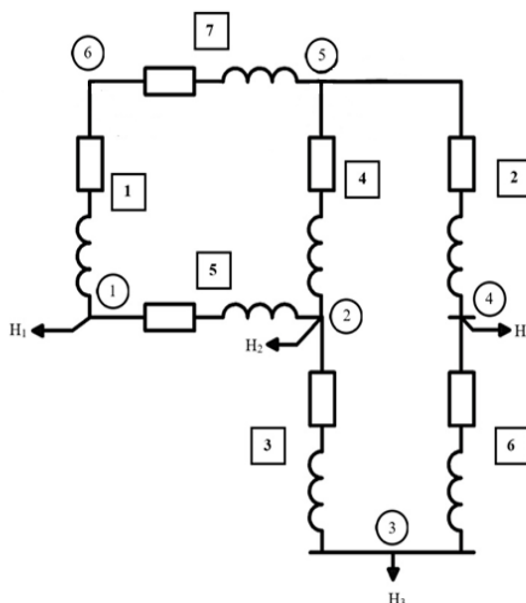


Рисунок 2 – Расчетная схема замещения

Метод узловых напряжений является частным случаем метода независимых напряжений. При этом матрица узловых проводимостей симметричная и для цепей без взаимоиндукции ее можно сформировать прямо по заданной схеме. Не нужно также формирования матрицы контуров N . Матрица узловых проводимостей Y_u – неособенная квадратная матрица, порядок которой равен количеству независимых узлов. Элемент Y_{ii} находится как сумма проводимостей ветвей, которые соединяются с узлом i . На месте Y_{ij} находится проводимость ветви $i - j$ с обратным знаком. Элементы $Y_{ij} = Y_{ji}$, то есть матрица симметричная относительно главной диагонали. Если между узлами i и j отсутствует непосредственная связь, то на месте $Y_{ij} = Y_{ji}$, ставится 0. Для схемы рис.2 составим первую матрицу соединения и матрицу сопротивлений ветвей рис. 3. Параметры ЛЭП и трансформаторов берем из справочной литературы [5].

В литературе [3] отмечается, что при расчете параметров схемы замещения следует учитывать проявление поверхностного эффекта, таким образом, значение активного и индуктивного сопротивлений ЛЭП для различных гармоник возрастает пропорционально $\sqrt{n}$:

$$Z_{Bn} = \sqrt{n} \cdot Z_B$$

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

Расчет задающих токов	Первая матрица соединений	Матрица сопротивлений ветвей
$I_{n1} := \frac{-S_1}{\sqrt{3 \cdot 35}} \text{ A}$ $I_{n2} := \frac{-S_2}{\sqrt{3 \cdot 35}} \text{ A}$ $I_{n3} := \frac{-S_3}{\sqrt{3 \cdot 35}} \text{ A}$ $I_{n4} := \frac{-S_4}{\sqrt{3 \cdot 35}} \text{ A}$	$M\Sigma := \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$Z_B := \begin{pmatrix} z_{t34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_{t56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z_{w4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & z_{t12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & z_{w2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & z_{w3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & z_{w1} \end{pmatrix}$

Рисунок 3 – Расчет по методу узловых напряжений

При работе 12-фазного преобразователя в сети возникают 11я, 13я, 23я и 25я гармоники напряжения. Для оценки нагрузки высшими гармониками используем значения процентного содержания гармоник в токе нагрузки для электроприводов с 12-фазной схемой выпрямления (табл. 2).

Таблица 2 – Процентное содержание гармоник в токе нагрузки для электроприводов с 12-фазной схемой выпрямления

Гармоника	Значение, %	Гармоника	Значение, %
11-я	8,0	23-я	3,0
13-я	7,0	25-я	3,0

Результаты исследования. Расчет установившегося режима работы сети проводим для каждой гармоники. При этом структурно схема замещения остаётся неизменной, меняются величины её параметров. Результаты расчетов отдельных гармонических составляющих напряжения для 5и узлов сети (узел №6 является базисным) сводим в табл.3. Оценку выполнения требований [1] проводим для 11й, 13й, 23й и 25й гармоник. В табл. 3 даны максимальные значения для гармонических составляющих напряжения с учетом номинального напряжения узла, превышение которых согласно [1] не допускается 95% времени.

По кривым напряжений (рис. 4) видим, что в узле №3 гармоники выражены сильнее, чем в узле №1. Узел №3 по схеме сети расположен

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

дальше от шин силовых трансформаторов и дальше от источника питания.

Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения при заданном уровне гармоник тока не превышают значений, установленных стандартом [1] только в узлах №1 и №5. В остальных же узлах, требования стандарта на несинусоидальность напряжения в данной сети не выполняются (жирный шрифт в табл.3).

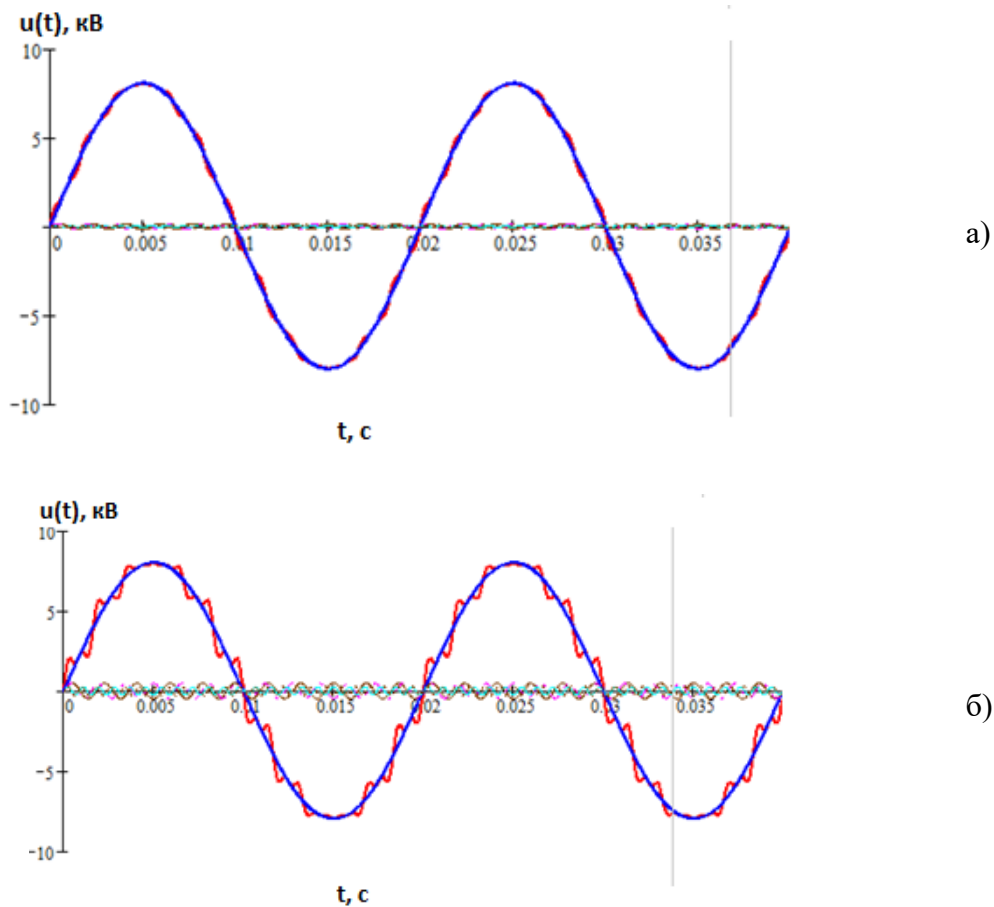


Рисунок 4 – Кривые гармоник напряжений для узла №1 (а) и узла №3 (б)

Таблица 3 – Сравнение результатов расчета гармонических составляющих напряжения в узлах сети с требованиями ГОСТ 32144-2013 для вероятности 95%

№ узла	U _н , кВ	Результат расчета $K_{U(n)}$, % для гармоник №				Значение $K_{U(n)}$, %, согласно ГОСТ для гармоник №			
		11	13	23	25	11	13	23	25
1	6	1,89	1,798	1,025	1,069	2	2	1	1
2	6	2,379	2,263	1,29	1,345	2	2	1	1
3	6	5,694	5,416	3,087	3,219	2	2	1	1
4	6	3,495	3,324	1,895	1,976	2	2	1	1
5	35	0,509	0,485	0,276	0,288	2	1,5	1	1

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

Выводы

1. Разработан файл для расчета установившегося режима электрической сети с одним источником питания с нелинейными нагрузками, программа позволяет провести исследования величин гармонических составляющих напряжения в узлах сети.

2. Анализ сравнения гармоник напряжения в узлах исследуемой сети показал, что в узле №3 гармоники выражены сильнее, чем в узле №1. Это связано с тем, что узел №3 расположен по схеме дальше от шин силовых трансформаторов и источника питания.

3. Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения при заданном уровне гармоник тока не превышают значений, установленных стандартом, только в узлах №1 и №5. В остальных же узлах сети, требования ГОСТ 32144-13 на несинусоидальность напряжения не выполняются. Требуется разработка мероприятий по ограничению гармонических составляющих напряжения в узлах №2, №3 и №4.

Перечень ссылок

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. с 01.07.2014.
2. Качество энергии в электрических сетях : пер. с англ. / Куско А., Томпсон М. ; пер. Рабодзей А. Н. - М. : Додэка-XXI, 2008. - 333 с. : ил. - (Электротехника и энергетика). - Библиогр. в конце глав. - ISBN 978-5-94120-182-2.
3. Черепанов, В.В. Расчеты несинусоидальных и несимметричных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий / В.В.Черепанов // Учебное пособие – Горький: изд. ГТУ, 1989. – 88с.
4. Виноградов, А. А. Особенности расчета несинусоидальных режимов электрических сетей методом узловых напряжений / А. А. Виноградов, В. В. Володин, А. М. Рысев // IV Всесоюзн. сов. по качеству электрической энергии. Винница: Тез. докл. – Киев: ФОЛ Института электродинамики АН УССР, 1978. – Ч. 3. – С. 106-108.
5. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций / Б.Н Неклепаев, И.П. Крючков // Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: изд. Энергоатомиздат, 1989. – 608С.

УДК 621.313.333

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ НА
ДОСТОВЕРНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Д.В. Полковниченко, И.П. Васьковский
ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ» г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

В работе проведены исследования влияния показателей качества электроэнергии в питающей сети на характеристики асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Обоснована целесообразность совершенствования диагностики электродвигателей с учетом отклонения показателей качества электроэнергии в питающей сети.

The paper studies the influence of power quality indicators in the power supply network on the characteristics of asynchronous electric motors with a squirrel-cage rotor. The expediency of improving the diagnostics of electric motors taking into account the deviation of power quality indicators in the power supply network is substantiated.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, качество электроэнергии, дефект, напряжение, частота, несимметрия.

Keywords: asynchronous motor, squirrel cage rotor, power quality, defect, voltage, frequency, asymmetry.

Бесперебойное функционирование технологических процессов на промышленных объектах зависит от стабильной работы всех задействованных рабочих механизмов. В качестве привода большей части этих механизмов применяют трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АД с КЗР). Это объясняется тем, что изготовление таких роторов существенно проще и дешевле, чем фазных. Отсутствие контактных колец, щеточного аппарата и пусковых реостатов снижает общие размеры машины, увеличивает ее надежность и упрощает обслуживание.

Качество электроэнергии в питающей сети оказывает значительное влияние на работу АД с КЗР. Учет отклонений показателей качества электроэнергии позволяет повысить точность диагностики и предотвратить преждевременные отказы оборудования.

Целью данной работы являются исследования влияния показателей качества электроэнергии в питающей сети на характеристики АД с КЗР и обоснование целесообразности

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

совершенствования диагностики электродвигателей с учетом отклонения указанных показателей.

К одним из основных показателей качества электроэнергии относятся отклонения напряжения и частоты, а также несимметрия напряжения в электрической сети.

Для двигателей, работающих с полной нагрузкой отклонение напряжения влияет на частоту вращения ротора через изменение скольжения. При снижении напряжения частота вращения падает, при повышении – увеличивается, но эффект ограничен характеристиками двигателя и нагрузкой. Если производительность механизмов зависит от частоты вращения двигателя, то на выводах таких двигателей рекомендуется поддерживать напряжение не ниже номинального. При значительном снижении напряжения на выводах двигателей, работающих с полной нагрузкой, момент сопротивления механизма может превысить вращающий момент, что приводит к «опрокидыванию» двигателя, т.е. к его остановке [1].

В табл. 1 приведены результаты исследования влияния отклонения напряжения на некоторые характеристики АД.

Таблица 1 – Влияние отклонения напряжения на характеристики АД

Характеристика АД	Отклонения напряжения δU , %	
	–10% от $U_{ном}$	+10% от $U_{ном}$
Пусковой и максимальный вращающий момент	–19	+21
Скольжение	+23	–17
КПД		
– при номинальной нагрузке	–2	+1
– 75% от номинальной нагрузки	–2	+1
– 50% от номинальной нагрузки	– (1-2)	+(1-2)
Ток ротора	+14	–11
Ток статора	+10	–7

Снижение напряжения ухудшает и условия пуска двигателя, так как при этом уменьшается его пусковой момент.

В случае снижения напряжения на зажимах двигателя реактивная мощность намагничивания уменьшается (на 2-3 % при снижении напряжения на 1 %), при той же потребляемой мощности увеличивается ток двигателя, что вызывает перегрев изоляции.

Если двигатель длительно работает при пониженном напряжении, то из-за ускоренного износа изоляции срок службы двигателя

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

уменьшается. Поэтому с точки зрения нагрева двигателя более опасны в рассматриваемых пределах отрицательные отклонения напряжения.

Повышение напряжения на выводах двигателя приводит к увеличению потребляемой им реактивной мощности. При этом удельное потребление реактивной мощности растет с уменьшением коэффициента загрузки двигателя. В среднем на каждый процент повышения напряжения потребляемая реактивная мощность увеличивается на 3 % и более (в основном за счет увеличения тока холостого хода двигателя), что в свою очередь приводит к увеличению потерь активной мощности в элементах электрической сети.

В табл. 2 приведены значения основных параметров АД в долях от их номинальных значений при отклонении напряжения и частоты [2].

Таблица 2 – Значения основных параметров АД при отклонении
напряжения и частоты

Параметры	Значения параметров АД при значениях			
	напряжения		частоты	
	0,9	1,1	0,95	1,05
Пусковой и номинальный момент	0,81	1,21	1,05	0,95
Синхронная частота вращения	1	1	0,95	1,05
Асинхронная частота вращения при номинальной нагрузке	0,985	1,01	0,95	1,05
Ток при номинальной нагрузке	1,11	0,93	1,02	0,98
Пусковой ток	0,9	1,1	1,05	0,95
Превышение температуры при номинальной нагрузке	1,07	0,96	1,02	0,98
Скольжение	1,01	0,99	1	1
КПД при номинальной нагрузке	0,98	1,01	0,99	1,01
Cosφ при номинальной нагрузке	1,01	0,97	0,99	1,01

Жесткие требования стандарта к отклонениям частоты питающего напряжения обусловлены значительным влиянием частоты на режимы работы электрооборудования и ход технологических процессов производства. Анализ работы предприятий с непрерывным циклом производства показал, что большинство основных технологических линий оборудовано механизмами с постоянным и вентиляторным моментами сопротивлений, а их приводами служат АД. Частота вращения роторов двигателей пропорциональна изменению частоты сети, а производительность технологических линий зависит от частоты вращения двигателя. Наиболее чувствительны к понижению частоты двигатели собственных нужд электростанций. Снижение частоты

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

приводит к уменьшению их производительности, что сопровождается снижением располагаемой мощности генераторов и дальнейшим дефицитом активной мощности и снижением частоты (имеет место лавина частоты).

Вследствие несимметричных токов нагрузки, протекающих по элементам системы электроснабжения, на выводах электроприемников появляется несимметричная система напряжений. Даже небольшая несимметрия напряжений ($k_{2u} \sim 1 \%$) вызывает значительные токи обратной последовательности. Токи обратной последовательности накладываются на токи прямой последовательности и вызывают дополнительный нагрев статора и ротора АД, что приводит к ускоренному старению изоляции, уменьшению располагаемой мощности и КПД двигателя. Так, срок службы полностью загруженного АД, работающего при несимметрии напряжения 4 %, сокращается в два раза. При несимметрии напряжения – 5 % располагаемая мощность двигателя уменьшается на 5-10 %.

В табл. 3 приведены результаты расчета влияния величины несимметрии напряжения на рост температуры и коэффициент полезного действия АД.

Таблица 3 – Влияние величины несимметрии напряжения на рост температуры и коэффициент полезного действия АД

Величина несимметрии напряжения, %	Δt , %	КПД, %
0	0	100
1	2	99
2	7	96
3	17	90
4	30	84
5	50	77

Для исследования влияния показателей качества электроэнергии питающей сети на точность диагностирования технического состояния АД в работе был использован обобщенный параметр диагностирования АД с КЗР – коэффициент его исправного состояния [3]:

$$k_{\partial} = \frac{c_i k_i + c_p k_p}{c_i + c_p},$$

где c_i , c_p – весовые коэффициенты, равные 1÷3, которые могут быть уточнены на основе опыта эксплуатации электродвигателя;

**Перспективы развития электротехнических,
электрохимических и энергосберегающих систем.**

$$k_i = \frac{I_1 - I_2}{I_1} - \text{коэффициент несимметрии токов};$$

I_1, I_2 – действующие или амплитудные значения составляющих тока соответственно прямой и обратной последовательностей;

k_p – критерий, характеризующий крутизну механической характеристики АД в области рабочих скольжений, определяемый по выражению

$$k_p = \frac{P / P_{ном}}{s / s_{ном}} \cdot \left(\frac{U_{ном}}{U} \right)^2,$$

где $P_{ном}, s_{ном}, U_{ном}$ – номинальные значения соответственно потребляемой АД активной мощности, скольжения и напряжения статора АД;

P, s, U – определяемые по результатам контроля соответственно потребляемая АД активная мощность, скольжение и напряжение статора АД.

Для исправного двигателя $k_d = 1$. Отклонение этого параметра в сторону понижения от единицы свидетельствует о наличии дефектов обмоток АД с КЗР.

В табл. 4 показана зависимость обобщенного параметра диагностирования АД типа АВ-8000 от величины отклонения питающего напряжения.

Таблица 4 – Зависимость обобщенного параметра диагностирования
от величины отклонения питающего напряжения

$\delta U, \%$	$U, \text{кВ}$	$n, \text{об/мин}$	s	$P, \text{кВт}$	k_p	k_d
10	6600	2959	0,0138	9680	1,210	1,105
8	6480	2957	0,0143	9331,2	1,166	1,0832
6	6360	2955	0,0148	8988,8	1,124	1,0618
4	6240	2954	0,0154	8652,8	1,082	1,0408
2	6120	2952	0,0160	8323,2	1,040	1,0202
0	6000	2950	0,0167	8000	1	1
-2	5880	2948	0,0174	7683,2	0,960	0,9802
-4	5760	2946	0,0181	7372,8	0,922	0,9608
-6	5640	2943	0,0189	7068,8	0,884	0,9418
-8	5520	2941	0,0197	6771,2	0,846	0,9232
-10	5400	2938	0,0206	6480	0,810	0,905

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

В табл. 5 приведены зависимости обобщенного параметра диагностирования от количества оборванных стержней КЗР в рабочем режиме АД типа АВ-8000.

Таблица 5 – Зависимость обобщенного параметра диагностирования от количества оборванных стержней КЗР в рабочем режиме АД типа АВ-8000

$n_{об.ст.}, шт.$	$k_{2i}, \%$	k_p	k_o
0	0	1,0	1,0
1 (неполный обрыв)	1,73	0,976	0,979
1 (полный обрыв)	2,47	0,959	0,967
2 (№ 1,2 – неполный обрыв)	3,41	0,941	0,954
2 (№ 1,19 – полный обрыв)	4,08	0,931	0,945
2 (№ 1,2 – полный обрыв)	4,39	0,918	0,937
3 (№ 1,2,3 – неполный обрыв)	5,12	0,906	0,927
3 (№ 1,13,26 – полный обрыв)	5,62	0,899	0,922
3 (№ 1,2,3 – полный обрыв)	6,15	0,887	0,913

На рис. 1 приведена зависимость обобщенного параметра диагностирования в рабочем режиме АД типа АВ-8000 от количества замкнувшихся витков фазы обмотки статора АД.

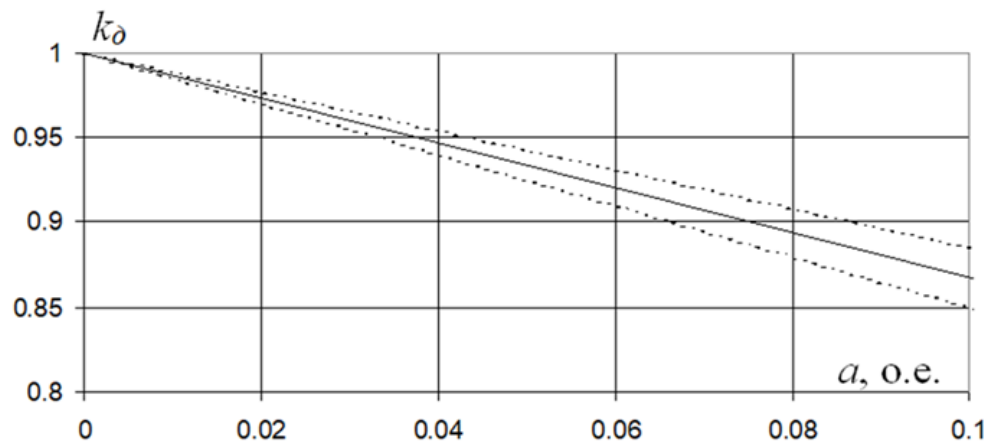


Рисунок 1 – Зависимость обобщенного параметра диагностирования от количества замкнувшихся витков фазы обмотки статора АД

На рис. 2 приведена зависимость обобщенного параметра диагностирования в рабочем режиме АД типа АВ-8000 от количества оборванных параллельных ветвей обмотки статора.

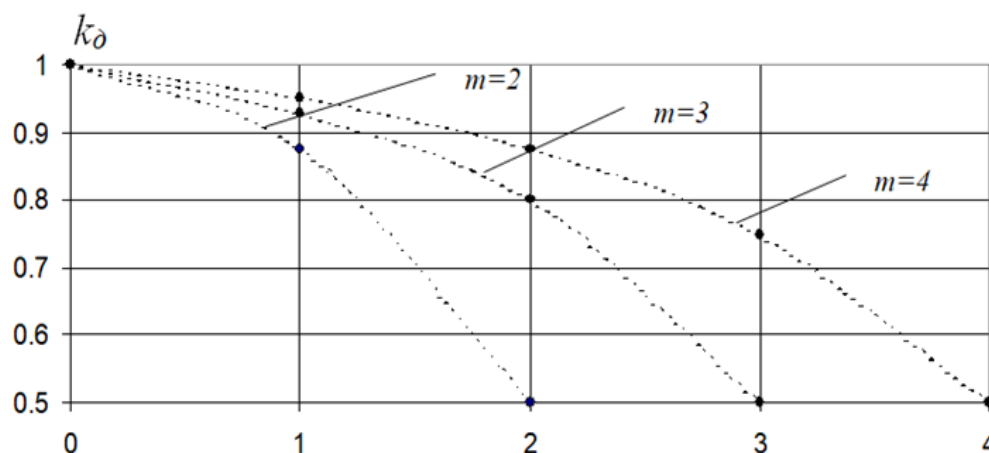


Рисунок 2 – Зависимость обобщенного параметра диагностирования от количества оборванных ветвей обмотки статора АД

Анализ полученных зависимостей показывает, что неучет отклонения напряжения в питающей сети может привести к постановке не достоверного диагноза о техническом состоянии АД.

Так при полном обрыве одного стержня короткозамкнутой обмотки ротора величина обобщенного параметра диагностирования составляет 0,967. Примерно такая величина диагностического параметра имеет место при витковом замыкании 2 % витков обмотки статора и при обрыве одной из четырех ветвей обмотки статора.

Если посмотреть на результаты, приведенные в табл. 2, то можно заметить что оно практически совпадает с значением этого параметра при снижении напряжения на -4% от номинального.

Таким образом, неучет показателей качества электроэнергии в питающей сети может привести к постановке недостоверного диагноза о техническом состоянии АД.

Учет отклонений показателей качества электроэнергии в питающей сети является важным шагом к совершенствованию диагностики АД, что способствует повышению их надежности и эффективности эксплуатации.

Одним из таких способов является использование интегрированной системы контроля. Она отслеживает несимметрию и гармонический состав токов и напряжений.

Также для повышения точности диагностики можно применить метод спектрального анализа потребляемого тока [4]. Он позволяет учитывать влияние на электрические параметры привода параметров питающей сети, характера нагрузки, внешних электромагнитных полей и переходных процессов в приводе.

Ещё один способ – непрерывное измерение питающего напряжения и фазного тока в трёх фазах электродвигателя [5]. По

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

сигналам мгновенных значений тока и напряжения вычисляют мгновенные значения потребляемых мощностей, рассчитывают значение средней мощности за период, строят спектрограммы потребляемых мощностей и рассчитывают величину потерь энергии в двигателе на каждой из частот спектра. Оценку технического состояния двигателя осуществляют путем сравнения полученных спектрограмм потерь с аналогичными спектрограммами, полученными на заведомо исправном двигателе.

Выводы

1. Отклонения таких параметров, как напряжение, частота, гармонические искажения и несимметрия фаз, могут приводить к перегреву, вибрациям и другим дефектам в двигателях. Это требует разработки методов диагностики, учитывающих эти факторы.

2. Для повышения точности диагностики необходимо интегрировать анализ качества электроэнергии в существующие методы диагностики, такие как анализ токов статора, вибродиагностика и тепловой контроль.

3. Совершенствование диагностики с учетом качества электроэнергии снижает затраты на ремонт и простои оборудования, а также увеличивает его ресурс, что делает такой подход экономически оправданным.

4. Проведенные исследования влияния показателей качества электроэнергии на характеристики АД являются основой для разработки способов совершенствования методов диагностирования.

Перечень ссылок

1. Суднова, В. В. Качество электрической энергии / В. В. Суднова. – М. : Энергосервис. – 2000. – С. 22-29.

2. Обеспечение надежности асинхронных двигателей / П. И. Захарченко, И. Г. Ширнин, Б. Н. Ванеев, В. М. Гостищев; УкрНИИВЭ. – Донецк : УкрНИИВЭ, 1998. – 324 с.

3. Сивокобыленко, В. Ф. Диагностика асинхронного электропривода по данным измерений рабочего режима / В. Ф. Сивокобыленко, Д. В. Полковниченко, К. А. Кукуй // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический университет». Сборник научных трудов. Тематический выпуск. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003. – № 10. – Т.1. – С. 502-505.

4. Шевчук, В. А. Сравнение методов диагностики асинхронного двигателя / В. А. Шевчук, А. С. Семенов // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 3-4. – С. 419–423.

5. Патент № 2537744 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Способ диагностирования изоляции обмоток статора асинхронного электродвигателя : № 2013133371/28 : заявл. 17.07.2013 : опубл. 10.01.2015 / И. Ф. Суворов, Р. В. Горбунов, Г. А. Палкин, Д. В. Коряков ; заявитель ФГБОУ ВПО «ЗабГУ».

УДК 621.865.8

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА
CORPELIASIM ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА
РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ
ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА С МАНИПУЛЯТОРОМ ROZUM
ROBOTICS PULSE 75**

А.В. Захаров, Е.М. Ляхов

ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ» г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

В статье рассматривается применение среды Coppeliasim для моделирования роботизированных систем на примере промышленного манипулятора Rozum Robotics PULSE 75. Приведены преимущества виртуального моделирования, этапы создания цифровой модели. Показана эффективность Coppeliasim как инструмента для обучения, проектирования и тестирования.

This article explores the application of the Coppeliasim environment for modeling robotic systems using the industrial manipulator Rozum Robotics PULSE 75 as an example. The advantages of virtual modeling, stages of digital model creation. The efficiency of Coppeliasim as a tool for education, design, and testing is demonstrated.

Ключевые слова: моделирование, робототехника, Coppeliasim, манипулятор, Rozum Robotics PULSE 75, автоматизация, симуляция

Keywords: *simulation, robotics, Coppeliasim, manipulator, Rozum Robotics PULSE 75, automation, modeling*

Постановка задачи. Данная работа обусловлена наличием на кафедре учебно-исследовательского стенда на базе промышленного манипулятора Rozum Robotics PULSE. Для обеспечения эффективной и безопасной работы с реальным оборудованием необходимо предварительное виртуальное моделирование и отладка алгоритмов управления, настройка кинематических параметров и исследование взаимодействия с объектами.

Цель работы:

Разработка виртуальной модели лабораторно-исследовательского стенда на базе робототехнического манипулятора ROZUM PULSE с использованием среды Coppeliasim. Исследование и оценка функциональных возможностей данной среды для решения лабораторных и исследовательских задач в области робототехники.

Технические характеристики и конструктивные особенности.

Лабораторный стенд с манипулятором Rozum Robotics PULSE — это учебно-исследовательская установка, предназначенная для

моделирования, анализа и отладки робототехнических систем. В его состав входит шестиосевой промышленный манипулятор, который обеспечивает высокую гибкость и точность движений. Рабочая зона представляет собой закреплённый стол с интегрированным конвейером для подачи и перемещения объектов, что позволяет моделировать производственные процессы с высокой степенью автоматизации.

Манипулятор PULSE обладает рабочим радиусом 75 см и способен перемещать грузы массой до 6 кг [1]. Высокая точность позиционирования (до $\pm 0,1$ мм) достигается благодаря современным энкодерам и оптимизированной системе управления. Эти характеристики делают манипулятор универсальным для решения задач, таких как сварка, сборка, транспортировка, нанесение покрытий и других.

Стенд предназначен для использования в образовательных и научных целях, позволяя проводить исследования в области кинематики, динамики, управления и взаимодействия компонентов робототехнических систем.

Моделирование Rozum pulse в CoppeliaSim

В среде CoppeliaSim пользователи могут работать как с существующими моделями роботов [2], так и создавать собственные [3]. Основой модели являются шесть подвижных звеньев, соединённых вращательными шарнирами (joints), каждый из которых соответствует одной степени свободы реального манипулятора (рис.1). Ключевым этапом моделирования является точная установка начальных положений звеньев. Исходные углы для каждого сочленения задаются в градусах и затем переводятся в радианы, после чего вносятся в параметры Initial Value. Эти значения обеспечивают корректную инициализацию модели, что необходимо для её адекватного функционирования и дальнейшего анализа.

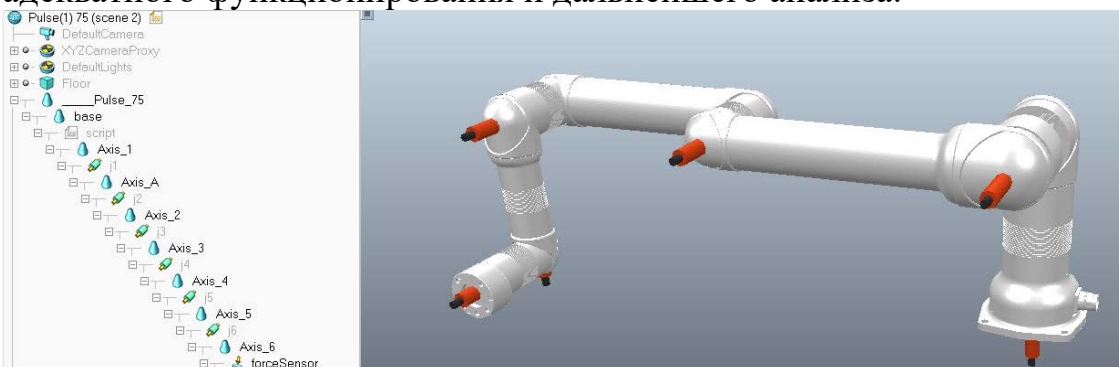


Рисунок 1 – модель промышленного манипулятора Rozum Robotics PULSE с видимыми Joint

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

Все параметры сочленений (Joint), использованные при моделировании манипулятора Rozum PULSE в среде CoppeliaSim, были взяты из официальной технической документации на изделие (таблица 1).

Таблица 1 – технические характеристики звеньев

Номер оси	Рабочая зона	Максимальная скорость
Ось 1 (Base)	От -360° до 360°	180 °/с
Ось 2	От -360° до 360°	180 °/с
Ось 3	От -160° до 160°	180 °/с
Ось 4	От -360° до 360°	230 °/с
Ось 5	От -360° до 360°	230 °/с
Ось 6	От -360° до 360°	230 °/с

Моделирование рабочей зоны

После создания базовой кинематической структуры манипулятора в CoppeliaSim следующим этапом разработки стало формирование виртуального стенда, моделирующего реальную рабочую зону. Ключевым аспектом этого этапа является точная установка всех элементов сцены в соответствии с координатной сеткой, с учетом реальных геометрических параметров и рабочих диапазонов манипулятора. Внешний вид разработанной модели и оригинального стенда приведен на рисунке 2

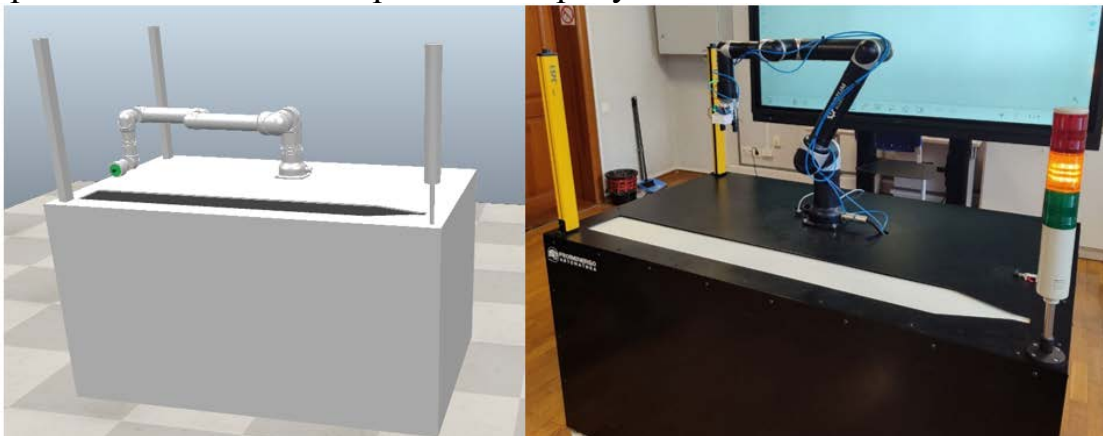


Рисунок 2 – Модель и реальный лабораторный стенд

Прямое управление манипулятором Rozum PULSE

Для верификации корректности настройки разработанной модели было проведено тестирование системы прямого управления углами поворота звеньев. В среде CoppeliaSim использовался встроенный механизм скриптинга на базе языка Lua, интегрированный с элементами сцены. С его помощью была реализована операторская панель, включающая шесть ползунковых регуляторов, каждый из которых отвечает за управление углом поворота отдельного звена манипулятора. Эта панель позволяет оператору в режиме реального времени изменять конфигурацию

звеньев и наблюдать за изменением положения рабочего органа манипулятора.

Для проверки работоспособности модели был проведен эксперимент, включающий вывод манипулятора в стандартное начальное положение. Полученные углы поворота звеньев были переданы модели. Панель и результаты тестирования представлены на рисунке 3. Эксперимент показал, что поза модели манипулятора точно соответствует позе реального манипулятора, что свидетельствует о корректности построения модели.

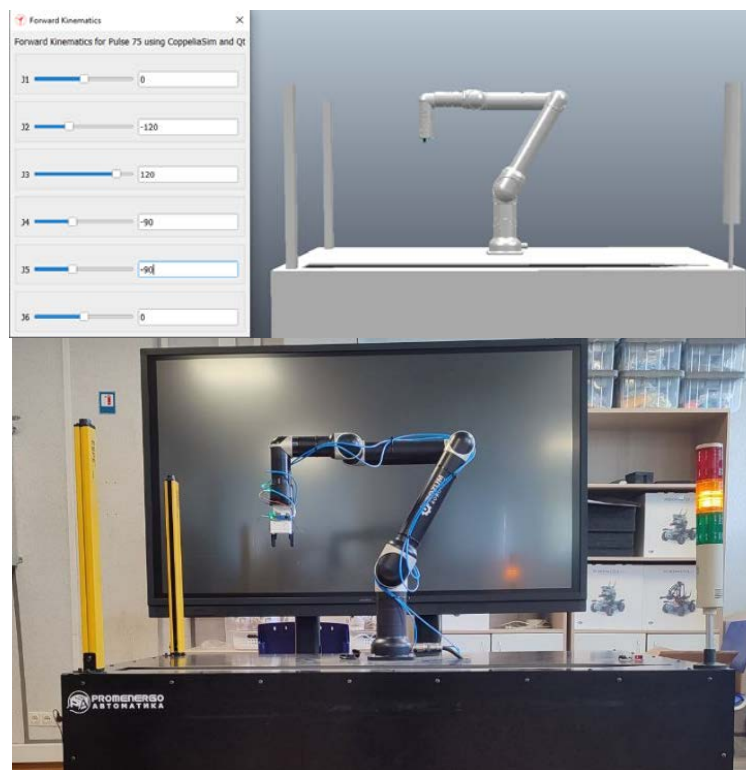


Рисунок 3 – Тест начального положения Rozum Robotics
PULSE

Функциональность среды

CoppeliaSim обладает высокой степенью модульности, что обеспечивает гибкость при интеграции компонентов. Система использует коллизионные оболочки для моделирования геометрии объектов и обнаружения столкновений. Точные коллизионные формы позволяют анализировать взаимодействия между манипуляторами и окружением. Встроенные функции проверки столкновений автоматизируют обработку данных, что важно для алгоритмов аварийной остановки и обеспечения безопасности. Полученные траектории движения можно передавать на реальный манипулятор, что позволит избегать столкновений со статичными объектами, заложенными в модель. Модель также можно улучшить с помощью

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

внешнего решателя обратной кинематики для точного позиционирования инструмента. В CoppeliaSim имеется возможность интегрировать камеры и модули машинного зрения для тестирования алгоритмов захвата, распознавания объектов и выравнивания. Использование библиотек компьютерного зрения, таких как OpenCV, позволяет реализовать системы визуального позиционирования и контроля качества.

Выводы:

1. Разработана цифровая модель манипулятора Rozum Robotics PULSE в CoppeliaSim, точно воспроизводящая его кинематические и физические характеристики.
2. Анализ модели подтвердил возможность точной настройки сочленений и корректного взаимодействия с виртуальным стендом, включая обнаружение коллизий и управление движением.
3. Созданная сцена в CoppeliaSim применима для отладки управляющих алгоритмов и расширения функциональности: подключение внешнего решателя обратной кинематики и интеграция камеры позволяют тестировать системы машинного зрения.
4. Результаты обосновывают целесообразность использования CoppeliaSim для обучения, проектирования и тестирования промышленных роботизированных систем в условиях ограниченного доступа к физическому оборудованию.

Перечень ссылок

1. Rozum Robotics PULSE. Техническое описание. – URL: <https://rozum.com/robotic-arm/#documentation>
2. Coppelia Robotics. CoppeliaSim User Manual. URL: <https://manual.coppeliarobotics.com/index.html>
3. Петренко, К. Б. Решение обратной задачи кинематики для робота манипулятора Katana и симуляция управления с помощью программных средств Coppeliasim / К. Б. Петренко, Д. Н. Мирошник, А. В. Захаров // Инновационные перспективы Донбасса : материалы 10-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 28–30 мая 2024 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. – С. 123-136

УДК 621.865.8

РАЗРАБОТКА ДРАЙВЕРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ КЛЮЧАМИ ОБРАТИМОГО DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

А.В. Захаров, Р.А. Кузьменко

ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ» г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Обратимые DC-DC преобразователи находят применение в системах рекуперации энергии, где важно не только преобразовать напряжение, но и вернуть часть энергии обратно в систему. В статье будут рассмотрены основные технические вызовы, связанные с разработкой таких устройств, и предложены возможные пути их решения.

Reversible DC-DC converters find application in energy recovery systems, where it is important not only to convert voltage but also to return part of the energy back to the system. The article will discuss the main technical challenges associated with the development of such devices and propose possible solutions.

Ключевые слова: силовые преобразователи, DC-DC преобразователь, драйвер IGBT, силовая электроника, MDIBC

Keywords: power converters, DC-DC converter, IGBT driver, power electronics, MDIBC

Одним из ключевых компонентов в системах электропитания являются обратимые DC-DC преобразователи, которые обеспечивают необходимое напряжение для работы различных электронных компонентов и способны возвращать энергию в исходную форму.

На текущий момент топология Multidevice Interleaved Boost Converter (MDIBC) является одной из наиболее перспективных для применения в системах электропитания электромобилей благодаря своей высокой надежности, энергоэффективности и компактному размеру [1,2].

Типовая структура MDIBC включает четыре стойки по два силовых ключа, конденсатор и два индуктивных элемента (рис.1). Преобразование энергии осуществляется за счет управления ключевыми элементами, что требует использования специализированного драйвера транзисторов. Этот драйвер обеспечивает оптимальное включение и надежное отключение ключей, что критически важно для стабильной работы преобразователя.

Драйвер транзистора — это электронная схема, предназначенная для управления полупроводниковым прибором. Основная задача драйвера — обеспечить правильное функционирование транзистора в соответствии с управляющими сигналами, а также обеспечить гальваническую развязку между силовой и управляющей цепями.

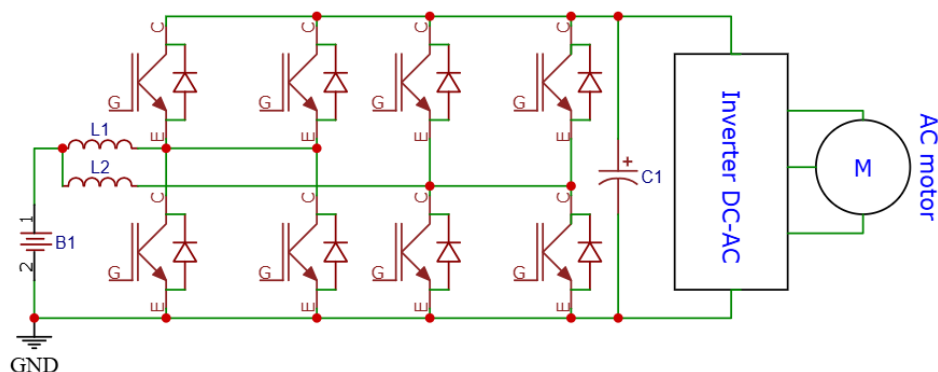


Рисунок 1. Схема обратимого DC-DC преобразователя MDIBC.

Драйвер транзистора — это электронная схема, предназначенная для управления полупроводниковым прибором. Основная задача драйвера — обеспечить правильное функционирование транзистора в соответствии с управляющими сигналами, а также обеспечить гальваническую развязку между силовой и управляющей цепями.

Современные драйверы также включают схемы защиты, которые предотвращают повреждение транзистора при аварийных ситуациях, таких как некорректное напряжение питания, короткое замыкание в силовой цепи, перегрев и т.д. [3]

Основные требования к схеме управления включают своевременную подачу сигнала необходимой амплитуды на затвор транзистора для его открытия за время, определяемое технологическим процессом. Это обуславливает ключевые параметры драйвера: выходной импульсный ток, рабочую частоту, выходную мощность и предельное напряжение изоляции для гальванической развязки.

Организация драйверов определяется не только количественными характеристиками управляемых элементов, но и качественным аспектом работы преобразователя. Для схемы с отдельным управлением верхними и нижними ключами полумоста (рис. 1) драйвер функционирует индивидуально для каждого ключа.

Расчёта параметров драйвера. Расчет будет осуществлён для схемы, собранной в соответствии рис.1 и следующими параметрами нагрузки:

$$U_{CE} = 600\text{В}; I_{CE} = 100\text{А}; f = 20\text{кГц}$$

Где: U_{CE} - напряжение коллектор-эмиттер

I_{CE} – ток коллектор-эмиттер

f – частота коммутации ключа.

Для обеспечения надёжной работы IGBT-транзисторов в данной схеме, необходимо выбрать ключи 6-12 класса (с рабочим напряжением 600–1200 В и током до 120–200 А). Такие ключи часто реализуются в виде модульных сборок IGBT-транзисторов, что упрощает их интеграцию и управление.

Для удовлетворения требований нагрузки с запасом подходит IGBT модуль – «6MBI150U4B-120» компании Fuji Electric. Так же необходимо заранее определиться с диапазоном напряжений нужным для точного открытия и закрытия транзистора. Для ключей 12-ого класса, в основном, применяются напряжения +8В - +17В и -5В до -10В. Для данного модуля в соответствии с паспортными данными достаточным для открытия будет 8.5 В.[4]

Для расчета примем +13/-8 В, т.е. напряжение подаваемой на затвор транзистора от драйвера - $V_{drive} = 21\text{В}$

Для расчета основных характеристик драйвера будет достаточно знать паразитную ёмкость затвора транзистора, определяемую из паспортных данных и выраженную в величине заряда – 750nC[4]

Мощность управления затвором (1)

$$P = U_{GE} * q * f = 21\text{В} * 750\text{nC} * 20\text{кГц} = 315 \text{ мВт} (1)$$

Средний ток управления затвором (2)

$$I = q * f = 750\text{nC} * 20\text{кГц} = 15 \text{ мА} (2)$$

Импульсный ток затвора (3)

$$I_{pulse} = \frac{U_{dr}}{R_{toGt}} (3)$$

Где R_{toGt} – общее сопротивление цепи затвора. По графикам зависимости времени коммутации ключа от R_{toGt} можно определить предельное R_{toGt} , необходимое для проектируемой работы преобразователя. Для частоты коммутации в 20 кГц ($T=50 \text{ мкс}$ – период импульсов) примем допустимое время коммутации ключа в 1% от периода т.е. 500 нс. Для данной скорости необходимо: $R_{toGt} = 10 \text{ Ом}$

Тогда в соответствии с (3)

$$I_{pulse} = \frac{21\text{В}}{10 \text{ Ом}} = 2.1 \text{ А}$$

Для управления таким силовыми ключами потребуется драйвер, способный рассеивать мощность не менее 315 мВт при токе 2,1 А и

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

переключать нагрузку с частотой до 20 кГц. При этом напряжение изоляции драйвера должно быть не менее 600 В.

Для обеспечения гальванической изоляции и выполнения необходимых функций управления целесообразно использовать оптодрайвер HCPL-3120. Этот драйвер обладает необходимыми характеристиками, широко распространен и отличается доступной стоимостью.[5]

Особенностью схемы питания является то, что нагрузка подключена между полумостами: в цепи эмиттера верхних ключей и коллектора нижних. Напряжение отпираания ключей формируется относительно эмиттера. Для предотвращения короткого замыкания необходимо обеспечить гальваническую развязку нейтральных точек между верхними и нижними ключами, а для каждого верхнего ключа — свою нейтральную точку, используя, например, многообмоточные трансформаторы малой мощности (рис.2,3).

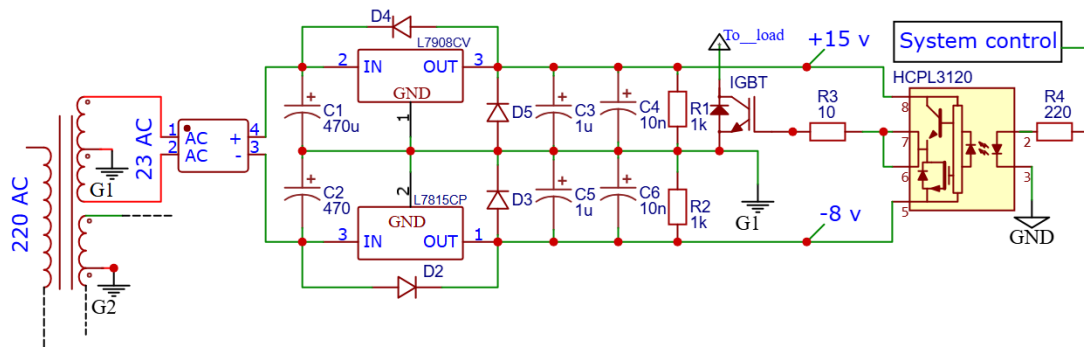


Рисунок 2. Схема питания каждого ключа преобразователя.

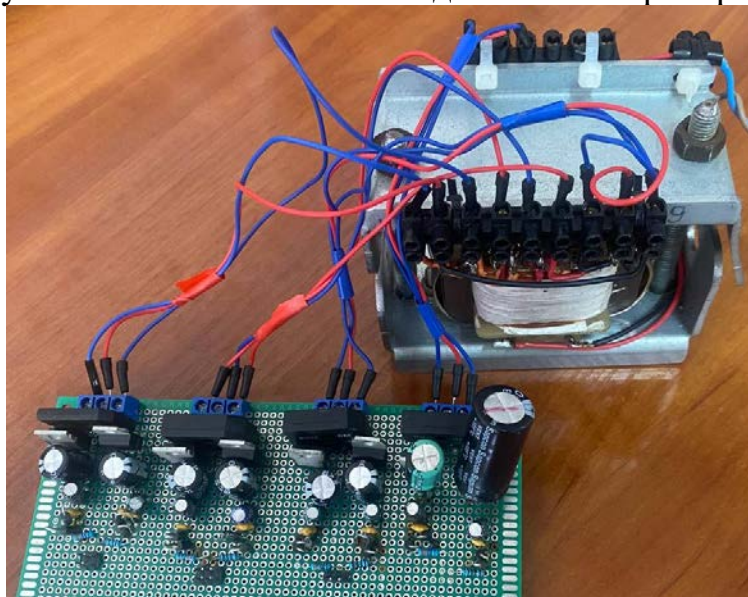


Рисунок 3. Реализованная схема питания драйвера ключей преобразователя.

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

Для проверки правильности расчётов был проведен эксперимент. Используя один транзистор были получены осциллограммы работы ключа (рис. 4а и 4б), смотря на которые можем убедиться в правильности расчета, получив время отпирания t_{on} и время запирания t_{off} 500нс и 600 нс, что соответствует времени отпирания приведенным в паспорте устройства.

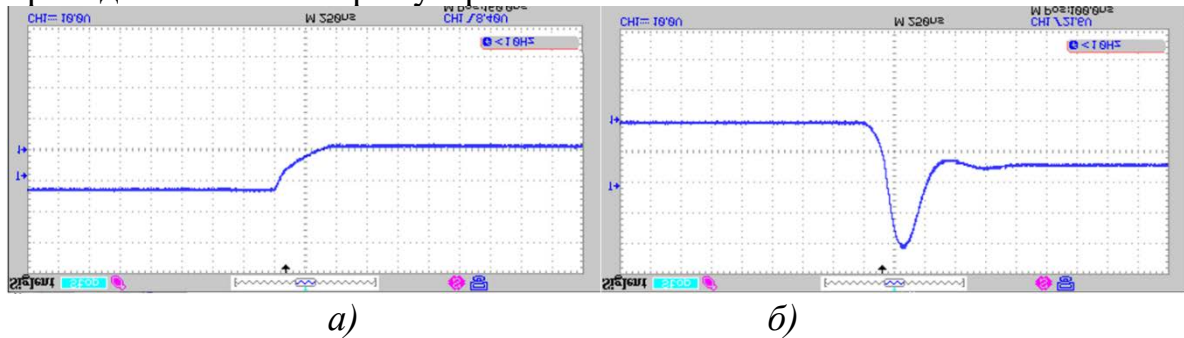


Рисунок 4 Осциллограммы напряжения коллектор-эмиттер при коммутации ключа. (а – открытие; б – закрытие)

Для проверки правильности работы драйвера соберём схему полного моста (рис 5.а) и получим на нагрузке следующий график (рис 5.б).

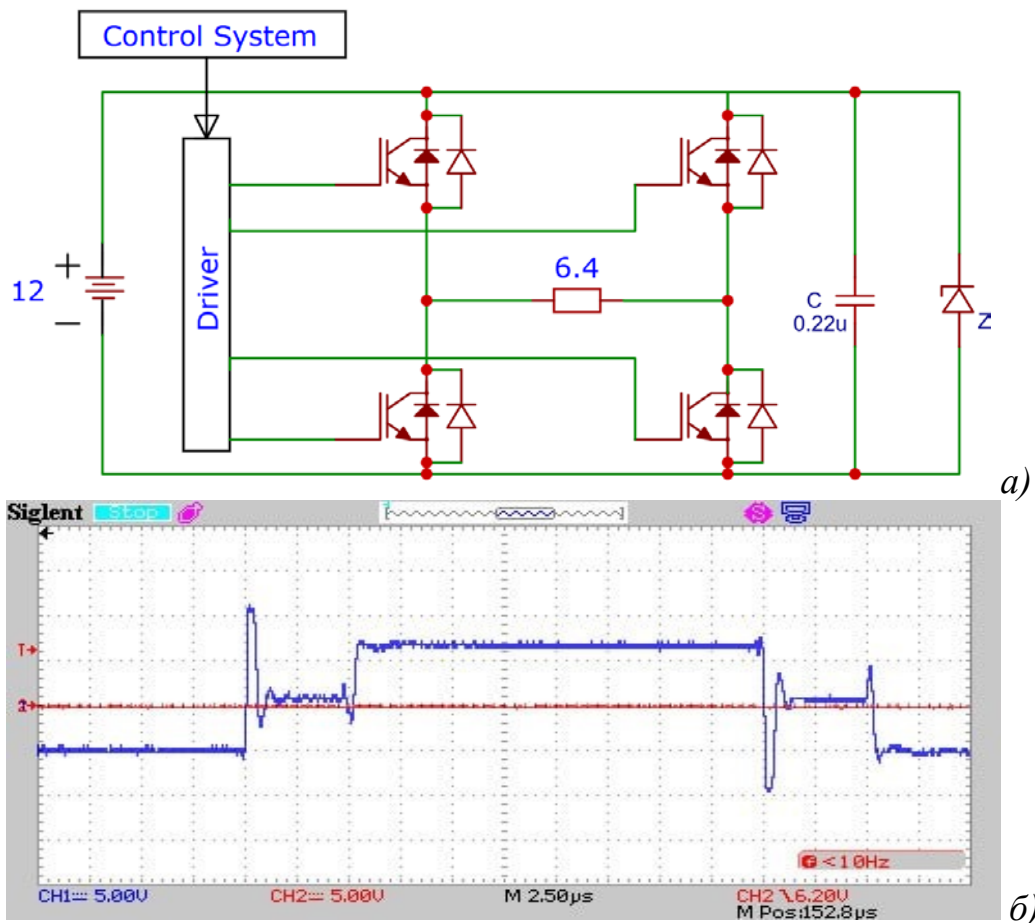


Рисунок 4. а- Схема включения; б-напряжение на нагрузке

Выводы

Приведенные методы расчета и реализации драйвера вполне соответствуют практической необходимости и отвечают заданными динамическим характеристикам, могут успешно применяться в различных схемах управления силовыми транзисторами.

Перечень ссылок

1. Omar Hegazy, Member, IEEE, Joeri Van Mierlo, Member, IEEE, and Philippe Lataire. Analysis, Modeling, and Implementation of a Multidevice Interleaved DC/DC Converter for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 27, NO. 11, NOVEMBER 2012
2. Захаров, А. В. Пути повышения эксплуатационных свойств гибридного источника «аккумуляторная батарея-суперконденсатор» для электромобилей / А. В. Захаров, П. И. Розкаряка, Д. Н. Мирошник // 65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации : Сборник тезисов докладов юбилейной международной научно-технической конференции, Алчевск, 13–14 октября 2022 года. Том Часть 1. – Алчевск: Донбасский государственный технический институт, 2022. – С. 241-243. – EDN UTJZKY.
3. Флоренцев С.Н., Аванесов В.М. Силовая Электроника. Управление силовыми транзисторами с изолированным затвором. // «Электротехника» №12. Москва.2000г.
4. SPECIFICATION IGBT MODULE 6MBI150U4B-120.
5. Data Sheet HCPL-3120.

УДК 007.52:004.94

**РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РОБОТА-
МАНИПУЛЯТОРА В СРЕДЕ ROS**

Б.А. Калиниченко, Д.В. Бажутин

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

В работе представлена методика разработки модели робота-манипулятора в среде ROS2, которая позволяет проводить исследования различных алгоритмов управления на предмет их реализуемости. Описывается процедура импортирования готовой 3D модели, настройка ее параметров и способов взаимодействия с другими компонентами ROS2.

The paper presents an approach for developing a robotic manipulator model in the ROS2 environment, which allows studying various control algorithms for their feasibility. The procedure for importing a complete 3D model, setting its parameters and means of interaction with other ROS2 components is given.

Ключевые слова: манипулятор, ROS2, Gazebo, симуляция, моделирование, управление движением.

Keywords: robotic manipulator, ROS2, Gazebo, simulation, modeling, motion, control.

Разработка и отладка алгоритмов управления роботом-манипулятором связана с необходимостью решения существенного количества задач планирования и анализа траектории движения как рабочего органа, так и отдельных звеньев. При этом отладка алгоритмов на реальном оборудовании сопряжена с рисками его повреждения, в результате чего возникает актуальная задача разработки виртуальных физических моделей, которые бы позволяли с высокой степенью достоверности моделировать процессы перемещения манипулятора при заданном алгоритме управления.

С этой точки зрения очень удобным инструментом является фреймворк ROS2 (Robot Operating System), который помимо задач моделирования с помощью модуля Gazebo, позволяет организовать информационную структуру взаимодействия всех программных и физических модулей в виде, максимально приближенном к конечному варианту. **Целью** данной работы является разработка виртуальной модели робота манипулятора в среде Gazebo и организация ее взаимодействия с компонентами ROS2 с целью отладки алгоритмов управления.

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

Первым этапом разработки модели манипулятора является импорт его модели в среду моделирования Gazebo [1]. Gazebo — это симулятор робототехники с открытым исходным кодом, который позволяет получить доступ к высокоточным моделям физики, рендерингу и моделям датчиков.

Основные возможности Gazebo Sim:

1. Моделирование динамики.
2. Расширенная 3D-графика.
3. Датчики и модели шума.
4. Поддержка пользовательских расширений (plugins).

Создание виртуальной модели робота удобно выполнять по готовой 3D-модели, созданной в одной из САПР. При этом, несмотря на существенные различия в методике работы современных САПР, которые выражаются в том числе и в формате хранения данных, практически все они имеют возможность импортирования сборочных моделей в формат URDF, который также поддерживает среда моделирования Gazebo.

При этом следует заметить, что сама по себе URDF модель является статичной, т.е. движение отдельных ее элементов невозможны. Поэтому следующим этапом является конвертация имеющейся модели в формат SDF и настройка физических свойств отдельных элементов, таких как масса, матрица инерции, трение, просчет контакта, взаимное движение тем и т.д [2]. На рисунке 1 показан внешний вид интерфейса среды Gazebo с импортированной моделью.

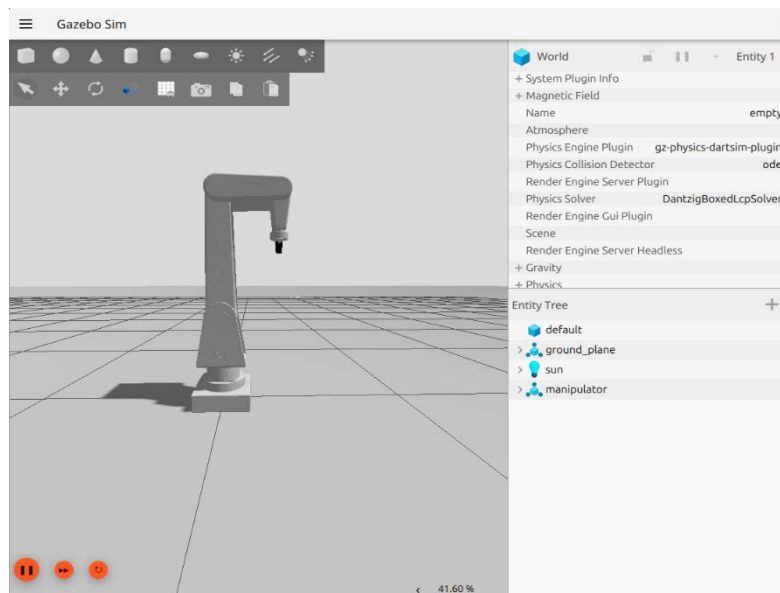


Рисунок 1 – Вид SDF-модели манипулятора, загруженной в симулятор Gazebo

Следующий шаг – добавление в SDF-модель требуемых для работы плагинов, а именно JointStatePublisher (для передачи в информационную среду ROS информации о текущем состоянии узлов модели) и JointPositionController (для управления шарнирами модели в режиме реального времени).

Плагин JointPositionController создаёт и привязывает к определённому сочленению модели узел Gazebo [3]. Этот узел ожидает поступления информационных сообщений, содержащих в себе требуемое смещение объекта, что, при корректной настройке SDF-файла, приведет к изменению положения соответствующей части модели в симуляторе в соответствии с отправленным значением, при условии, что это значение не выходит за пределы допустимых значений, установленных в SDF-файле.

Чтобы корректно настроить плагин JointPositionController, необходимо указать имя привязываемого сочленения, а также режим, в котором плагин будет работать с ним. По умолчанию используется режим ПИД-регулятора, которому необходимо настроить пропорциональные, интегральные и дифференциальные составляющие, и, опционально, можно настроить сдвиг и максимальные/минимальные выходные значения.

В нашем случае целесообразным представляется использование режима «идеальной» позиции, т.е. максимально быстрое и точное перемещение объекта по указанному принципу. Особенностью этого режима является автоматический расчет всех сил реакции, которые бы возникают в системе при указанном законе движения. Также из необходимых настроек плагина для каждого отдельно взятого звена можно выделить: индекс сочленения, отвечающий за требуемую ось действия (при условии, что сочленение поддерживает многоосное движение), тема/подтема, к которой будет привязано сочленение, начальное положение привязанного сочленения.

Следующим этапом разработки виртуальной модели является организация информационного взаимодействия со средой ROS, для чего необходимо использовать пакет `ros_gz_bridge` [4]. Данный пакет позволяет организовывать «мосты» для передачи данных между ROS2 и Gazebo (3 вида: из ROS2 в Gazebo, из Gazebo в ROS2, двунаправленный), что необходимо из-за использования особого метода упаковки данных в информационных сообщениях.

Из пакета `ros_gz_bridge` вызывается исполняемый файл `parameter_bridge` со следующими аргументами: наименование темы моста, связанной с определённым сочленением манипулятора, формат чисел с плавающей запятой, передаваемых из ROS2, направление

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

обмена данными (двунаправленный), тип данных, который симулятор Gazebo должен получить. Несмотря на то, что и ROS2, и Gazebo используют формат чисел с плавающей запятой, это число необходимо корректно извлечь из информационного сообщения, конвертировать в новый формат и передать в требуемую тему. Все эти действия выполняются автоматически.

Для проверки работоспособности модели был разработан графический интерфейс, передающий значения с ползунков в тему «моста» в реальном времени. С учётом интерфейса, ниже представлена схема передачи данных для работы с моделью манипулятора (рисунок 2).



Рисунок 2 – Схема передачи данных из интерфейса в Gazebo

Из графического интерфейса в момент изменения значений публикуется сообщение формата с плавающей точкой в тему «моста» между ROS2 и Gazebo, после, перед тем как передать сообщение в Gazebo, «мост» преобразует формат данных сообщения из формата с плавающей точкой в читаемый симулятором формат с плавающей точкой, и наконец, сообщение, попавшее в симулятор изменяет текущее задание на движение звена манипулятора, и звено начинает двигаться, как это показано на рисунке 3.

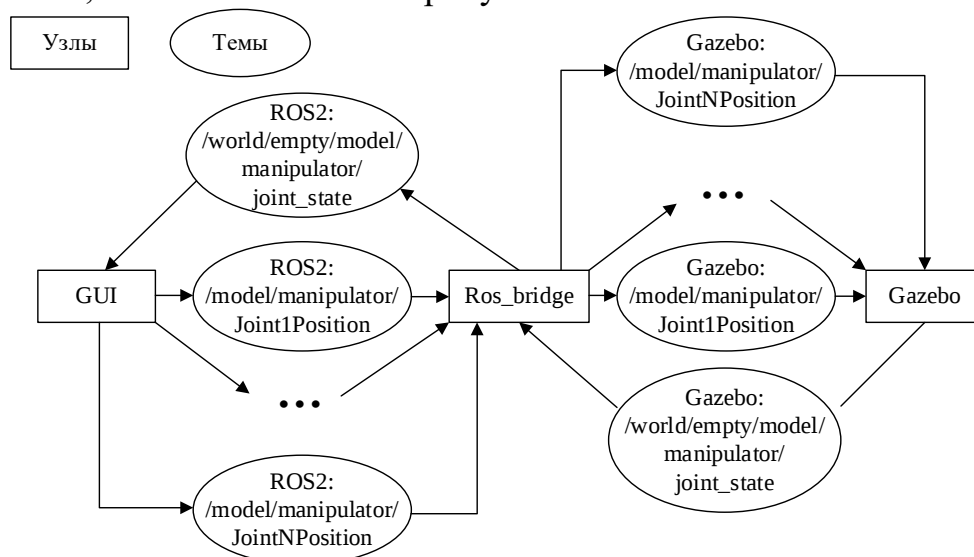


Рисунок 3 – Структура обмена данными в разработанной модели

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

Обратите внимание на то, что имена тем, управляющих сочленениями в Gazebo, и имена тем, на которые поступают значения из графического интерфейса в ROS2, одинаковы, это обусловлено тем, что создание темы в Ros_bridge, имеющей совпадающее имя с темой Gazebo автоматически связывает их. Это один из самых простых методов связи между темами ROS2 и Gazebo при помощи Ros_bridge.

Пример движения манипулятора при помощи интерфейса указан на рисунке 4.

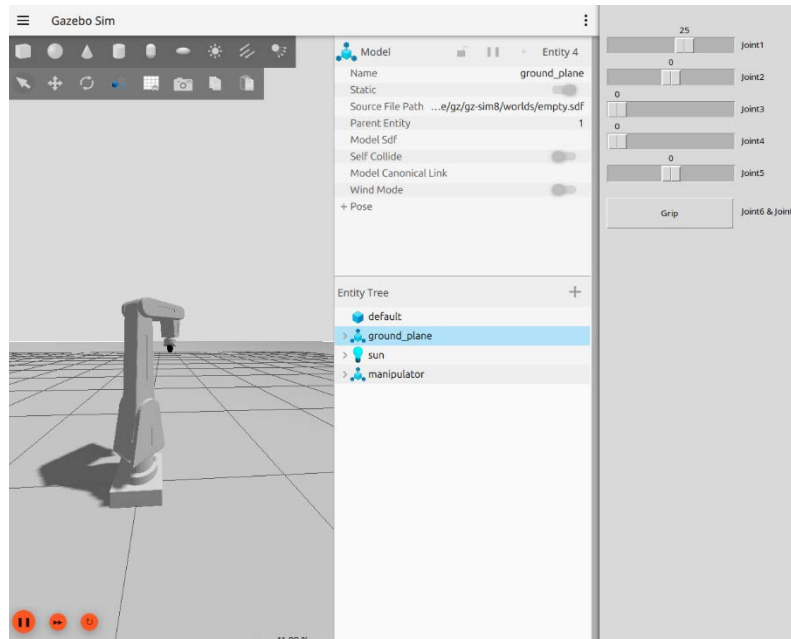


Рисунок 5 – Положение модели манипулятора при повороте первого звена на 45°

Разработанная модель позволяет проводить подробный анализ особенностей реализации тех или иных алгоритмов управления роботами-манипуляторами, обнаруживать проблемы их реализуемости, оптимизировать процесс перемещения рабочего органа и анализировать информацию о состоянии робота в течение всего процесса перемещения.

Перечень ссылок

1. Информация о Gazebo Sim [Электронный ресурс]: URL: <https://gazebo-sim.org/home>.
2. Информация о формате SDF [Электронный ресурс]: SDF format URL: <http://sdformat.org/>.
3. Плагин Joint Position Controller [Электронный ресурс]: URL: https://gazebo-sim.org/api/sim/8/classgz_1_1sim_1_1systems_1_1JointPositionController.html.
4. Плагин Ros_gz_bridge [Электронный ресурс]: ros_gz_bridge. URL: https://github.com/gazebo-sim/ros_gz/blob/ros2/ros_gz_bridge/README.md.

УДК 621.313

**АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ СОБСТВЕННЫХ
НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

С.Н. Ткаченко, Д.А. Тонкошкур

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена вопросам определения в масштабе реального времени величины скольжения асинхронных двигателей системы собственных нужд современных электрических станций для использования в перспективных алгоритмах цифровой релейной защиты и автоматики. Выполнен детальный анализ существующих прямых и косвенных способов идентификации скольжения, основанных как на использовании современных энкодеров и датчиков, так и классических способов – тахогенераторов и резольверов. Также рассмотрены подходы без использования каких-либо дополнительных датчиков или устройств. Установлено, что наиболее оптимальным способом определения величины скольжения асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций в темпе процесса, а также при выполнении экспериментальных исследований, является сочетание оптического энкодера приращений, устанавливаемого на валу электрической машины, с программируемым частотно-токовым преобразователем.

Abstract. The paper is devoted to the issues of determining the real-time slip value of induction motors of the auxiliary power system of modern power plants for use in advanced algorithms of digital relay protection and automation. A detailed analysis of existing direct and indirect methods for slip identification is performed, based on both the use of modern encoders and sensors, and classical methods – tachogenerators and resolvers. Approaches without using any additional sensors or devices are also considered. It is established that the most optimal method for determining the slip value of induction motors of the power plants auxiliaries of at the pace of the process, as well as when performing experimental studies, is a combination of an optical increment encoder installed on the shaft of an electric machine with a programmable frequency-current converter.

Ключевые слова: скольжение, асинхронный двигатель, система собственных нужд, электрическая станция, энкодер, датчик, частотно-токовый преобразователь.

Keywords: slip, induction motor, auxiliaries, power plant, encoder, sensor, frequency-current converter.

Постановка задачи. В настоящее время большая часть машин и механизмов системы собственных нужд (СН) современных тепловых, атомных и гидравлических электростанций (ЭС) имеют электрический привод [1-3]. Основным типом электродвигателей переменного тока в основном используются асинхронные электродвигатели (АД) как с короткозамкнутым (КЗР), так и с фазным ротором (ФР), ключевой особенностью которых является разность частоты вращения ротора и частоты вращения создаваемого током статора магнитного поля статора на величину скольжения (s). В нормальных или типовых режимах, а также в ряде аномальных режимов работы, величина скольжения непостоянна и весьма невелика и составляет несколько процентов. Благодаря широкому внедрению микропроцессорных систем релейной защиты и автоматики (МСРЗиА) на объекты электроэнергетической системы в том числе на низковольтные и высоковольтные АД СН ЭС наблюдается тенденция совершенствования алгоритмов существующих стандартных защит [3]. Примером этого являются защиты от тепловой перегрузки (ЗТП), основанные на контроле режимных параметров – мгновенных значений фазных токов, фазных напряжений и скольжения [3,4]. Точность вышеуказанных алгоритмов в большой степени зависит от точности определения величины скольжения. Поэтому задача выполнения анализа способов определения скольжения асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций для использования в алгоритмах МСРЗиА является актуальной.

Результаты исследований. Для реализации цели измерения величины скольжения можно выделить несколько ключевых способов, представленных на рисунке 1.

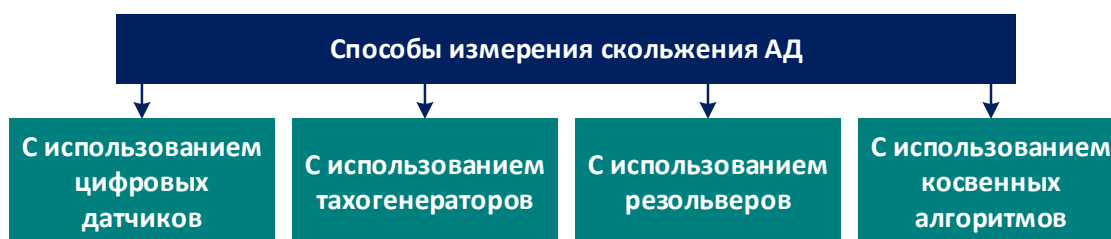


Рис. 1. Классификация способов определения скольжения АД

К первому, и наиболее современному, способу относится использование различных цифровых датчиков угла положения ротора (ДПР), как например оптических, индуктивных и магнитных энкодеров или преобразователей угловых перемещений, представляющих собой специальное электронное устройство, которое позволяет с

необходимой точностью осуществлять преобразование в темпе процесса линейное или угловое перемещение в электрические импульсы.

Оптические энкодеры представляют собой вращающиеся датчики обратной связи (ДОС), на выходе которых в зависимости от угла поворота ротора происходит изменение цифрового сигнала [5-7]. Питание данных ДОС осуществляется от источника постоянного тока напряжением $\pm 5-24$ В. По принципу действия все оптические энкодеры делятся на два типа – абсолютные и инкрементальные (накапливающие).

Инкрементальный энкодер по конструкции является более простым по сравнению с абсолютным и используется в подавляющем большинстве случаев в электроприводе. Данное устройство можно представить в виде специального диска с наличием прорезей, который просвечивается оптическим датчиком. В процессе вращения вышеуказанного диска, изготовленного из металла или из стекла, датчик включается или выключается в зависимости от того, находится ли он над прорезью или нет [5-7]. В результате на выходе инкрементального энкодера формируется последовательность дискретных импульсов, частота которых в свою очередь зависит от разрешения устройства (количество импульсов, генерируемых энкодером за один оборот вала двигателя) и частоты его вращения.

Одним из недостатков инкрементальных энкодеров является необходимость выполнения непрерывной обработки и анализа сигналов, требующих для этого наличия специального контроллера и соответствующего программного обеспечения. Помимо этого, для того, чтобы узнать реальное положение энкодера инкрементального типа после подачи на него питающего напряжения, необходимо осуществить инициализацию для поиска нуля-метки. Данный сигнал обрабатывается и далее подается на устройство индикации, на электропривод или МСРЗиА.

Для идентификации начального положения или точки отсчёта, используется так называемая нуль-метка (Z-выход, Zero), которая формируется один раз на полный оборот вала асинхронной машины. Для определения направления вращения у инкрементальных энкодеров, как правило, имеются два выхода «А» и «В», на которых импульсы сдвинуты по фазе на $\frac{1}{4}$ периода. Благодаря наличию разницы фаз можно однозначно определить, в какую именно сторону вращается вал АД.

Абсолютный энкодер по сравнению с инкрементальным имеет более сложную конструкцию, однако позволяет определять угол

поворота ротора АД в любой момент времени, включая заторможенное состояние механизма сразу после подачи напряжения на статор.

В отличие от инкрементального ДОС разрядность оптического энкодера абсолютного типа определяет его разрешение, которое зависит от разрядности используемого на его выходе параллельного кода Грея [5-7].

По типу монтажа промышленностью выпускаются несколько разновидностей ДПР – с полым глухим валом, полым сквозным валом и сплошным валом. Следует отметить, что для АД ССН ТЭС и АЭС более предпочтительным является вариант энкодера, имеющего сплошной вал по причине наличия на большинстве машин вала больших диаметров. Сочленение датчика с валом машины осуществляется с использованием специальной переходной или сильфонной муфты, позволяющей устранить вибрации и компенсировать возможную несоосность валов. При этом корпус ДПР жёстко фиксируется. Также в некоторых случаях на практике применяется способ подключения энкодера с помощью ременного редуктора, для которого необходимо рассчитывать отношение шкивов. Недостатком такого подключения является наличие погрешности измерения скольжения в начальный момент времени в режиме прямого пуска АД и других динамических режимах.

Основным недостатком оптических энкодеров является их неустойчивость при их установке и эксплуатации в агрессивной среде.

Альтернативой оптическим ДПР для контроля скольжения возможно использовать индуктивные энкодеры (ИЭ) [7]. Достоинствами ИЭ относятся очень высокое разрешение, а также повышенная устойчивость к агрессивной среде (грязь, различные жидкости, работа при высокой температуре вплоть до $+125^{\circ}\text{C}$, повышенная вибрация). Такие энкодеры целесообразно устанавливать при необходимости на АД – электроприводах особо ответственных механизмов ТЭС и АЭС, как например, главные циркуляционные насосы (ГЦН), питательные электронасосы (ПЭН), резервный возбудитель (РВ) и др. Ключевым недостатком ИЭ является чувствительность к мощным магнитным полям. Также при использовании таких энкодеров на агрегатах с наличием периодических чрезмерных ударных нагрузок и предельно высоких температур может произойти размагничивание магнитных доменов индуктивного энкодера.

Вторым способом измерения скорости АД являются устаревшие, но до сих пор используемые в промышленности, тахогенераторы (ТХГ), представляющие собой вращающиеся электрические

микромашины. На практике применяются ТХГ как переменного, так и постоянного тока, текущее значение частоты вращения вала ротора АД преобразуется в электрический сигнал (величина генерируемой ТХГ ЭДС или величина частоты сигнала), содержащий информацию о частоте вращения машины [5]. Как правило, в большинстве случаев тахогенераторы соединяются с валом электродвигателя с использованием специальной соединительной муфты.

ТХГ постоянного тока представляет собой коллекторную электрическую машину с наличием системы возбуждения в основном с использованием постоянных магнитов, устанавливаемых на её станине. Тахогенераторы переменного тока выпускаются промышленностью двух типов – асинхронные (асинхронная микромашина с короткозамкнутым ротором) и синхронные (бесколлекторная синхронная микромашина с системой возбуждения в виде постоянных магнитов) ТХГ.

К достоинствам ТХГ можно отнести отсутствие требований к обеспечению питания. Согласно [5] недостатками тахогенераторов являются сложности работы в агрессивных средах (особенно для коллекторных тахогенераторов постоянного тока), наличие больших габаритов по сравнению с датчиками скольжения других типов, весьма низкая чувствительность на низких оборотах, вносимый тормозящий момент, а также наличие необходимости в периодическом техническом обслуживании.

Третьим способом контроля частоты вращения ротора асинхронных машин являются резольверы (РЗВ), представляющие собой аналоговые датчики или вращающиеся электромагнитные преобразователи трансформаторного типа, используемые в качестве обратной связи по скорости или положению. По принципу действия РЗВ осуществляет преобразование угла поворота ротора АД в электрическое напряжение с амплитудой, пропорциональной или являющейся функцией (обычно синусоида или косинусоида) угла или самому углу [8]. В теории разрешение односкоростного РЗВ равно бесконечности в виду того факта, что данный ДПР является аналоговым устройством, на выходе которого электрические сигналы непрерывны в течение полного механического оборота.

К достоинствам резольверов или вращающихся трансформаторов следует отнести способность надёжного функционирования в тяжёлых условиях (работа в агрессивных средах) благодаря отсутствию встроенной электроники, а также наличие хорошей помехозащищённости и устойчивости к различным вибрациям и ударным нагрузкам по сравнению с другими ДПР [7].

К недостаткам резольвера относятся: более высокая стоимость по сравнению с ДПР другого типа, сложная интеграция с позиции построения и настройки системы обработки сигналов с РЗВ, понижение точности при быстром изменении скорости, наличие точности в пределах трёх угловых минут.

С позиции монтажа резольверы соединяются с валом электродвигателя либо с использованием специальной соединительной муфты, либо с помощью ременной передачи.

Четвёртым способом измерения величины скольжения АД является использование косвенных алгоритмов идентификации скольжения, к которым можно отнести подходы, основанные на применении оптических или индуктивных бесконтактных датчиков положения или обнаружения объектов (БДП). Вышеуказанный БДП устанавливается рядом с валом двигателя под определённым углом, напротив которого на участок вала либо наклеивается специальная лента белого цвета с нанесёнными с определённым шагом метками черного цвета (для оптических датчиков), либо устанавливается специальный металлический диск с наличием пазов (для индуктивных датчиков), расположенных также с определенным шагом [5-7]. Примером оптического БДП является датчик типа BF4R производства компании Autonics® и представляет собой датчик-усилитель, изначально предназначенный для обнаружения каких-либо объектов с частотой до 20000 раз/сек или малоразмерных объектов с высоким разрешением до 1/10000 [9]. Примером индуктивных или магнитных БДП являются датчики производства компании Pepperl+Fuchs® GmbH [10]. В процессе вращения вала асинхронного двигателя при изменении цвета для оптических БДП и изменения глубины (прохождение паза) датчики осуществляют генерацию прямоугольных импульсов +5-24 В. Для определения величины скольжения вышеуказанными датчиками необходимо применять специальные алгоритмы подсчёта импульсов за один оборот вала ротора, а затем определяя текущее значение частоты напряжения статора вычислять скольжение машины. Точность измерения скольжения зависит от разрешения применяемого типа БДП, а также от диаметра вала и от количества нанесённых меток на ленту или количества выфрезерованных на специальном диске или участке вала пазов.

К достоинствам таких систем является их удобство установки на контролируемом объекте без какой-либо необходимости механического соединения с валом электродвигателя, что также повышает надёжность всей системы измерений в целом. Недостатком БДП является безусловно сравнительно низкая точность

идентификации скольжения по сравнению, например, с оптическими или индуктивными энкодерами, а также резольверами, что на практике ограничивает использование бесконтактных датчиков положения исключительно в типовых режимах работы, в которых отсутствуют существенные колебания частоты вращения ротора (например, продолжительный режим работы двигателя S1 согласно ГОСТ ИЕС (МЭК) 60034-1-2014) [11]. Также БДП оптического типа нежелательно применять на агрегатах, работающих в агрессивных средах, например при повышенной запылённости или влажности.

Также к косвенным алгоритмам идентификации величины скольжения следует отнести способы, основанные на контроле мгновенных значений фазных токов или напряжений [4,12,13]. Наиболее интересный и обладающий достаточной точностью является подход, предложенный в [4]. Идея заключается в бесконтактном способе измерения скольжения, основанном на использовании известных параметров эквивалентной схемы замещения АД и результатов измерения текущих входных сопротивлений статора машины [4]. Вышеуказанные косвенные алгоритмы определения величины скольжения обладают более низкой точностью по сравнению со способами, основанными на использовании оптических или индуктивных датчиков.

Для асинхронных двигателей ССН электростанций как напряжением статора 0,4 кВ, так и напряжением 6 или 10 кВ, наиболее оптимальным и точным для применения в алгоритмах МСРЗиА подходом к идентификации в процессе работы величины скольжения является использование оптических или индуктивных датчиков, связанных в валом электродвигателя посредством сильфонной соединительной муфты или с помощью ременной передачи. Однако такой подход применим лишь только для тех асинхронных машин, у которых имеется открытый участок вала со стороны торца, к которому возможно беспрепятственно осуществить подключение датчика угла положения ротора. Исходя из анализа, применяемых в ССН нужд энергоблока номинальной мощностью 300 МВт Зуевской ТЭС высоковольтных АД подобного конструктивного типополнения достаточно мало. Основная масса применяемых электродвигателей имеет защищённое исполнение без наличия выхода торца вала за пределы корпуса подшипника. Этот факт сильно усложняет или делает невозможным в некоторых случаях установку датчика через соединительную муфту. В таких случаях возможными и хорошим решением является либо применение ременной передачи в сочетании с оптическим или индуктивным ДПР, либо установку устойчивых к

работе в агрессивных и запылённых средах индуктивных БДП. Также следует отметить, что для АД, территориально расположенных на большом удалении свыше 250 м от закрытого распределительного устройства собственных нужд помимо обеспечения качественного экранирования сигнального кабеля, по которому передаются в темпе процесса прямоугольные импульсы необходимо применять специальные усилители сигнала. Следует подчеркнуть, что в независимости от того какого именно типа устанавливаются, а затем эксплуатируются датчики на электродвигателях ССН ЭС требуется привлечение дополнительных как финансовых средств, так и дополнительной рабочей силы (высококвалифицированных специалистов в области релейной защиты, автоматизации и измерений), что безусловно усложняет и удорожает конструкции. Однако несмотря на это, применение на практике датчиков частоты вращения ротора в сочетании с современными МСРЗиА, включающих перспективные алгоритмы релейной защиты и автоматики присоединений «силовой кабель-АД», позволит повысить надёжность работы ССН ЭС в целом за счёт своевременной идентификации различных аномальных и аварийных режимов работы асинхронных двигателей, и при необходимости последующего отключения от питающей сети.

На кафедре «Электрические станции» ФГБОУ ВО «ДонНТУ» в специализированной лаборатории систем мониторинга, диагностики и защиты был создан лабораторный стенд для исследования режимов работы АД ССН напряжением 0,4 кВ. Для регистрации режимных параметров используется как регистратор Рекон-08мс производства НПП «Рекон», так и цифровой ПЭВМ-регистратор на базе платы АЦП/ЦАП L-Card L-783М производства ООО «Л Кард» [3].

Для измерения величины скольжения испытуемого АД с короткозамкнутым ротором типа АИР-112М4 номинальной мощностью 5,5 кВт используется присоединённый посредством сильфонной муфты оптический энкодер приращений с разрешением 1200 импульсов за один оборот производства компании Autonics®, а также оптический БДП типа Autonics® BF4R, ранее упомянутый по тексту.

Для удобства подсчёта импульсов ДПР применяется промежуточный дополнительный программируемый частотно-токовый преобразователь типа IFM DW2503 MONITOR/FA-1 /100-240VAC/DC (частотно-пропорциональный выход по току или напряжению), работающий с высокой частотой входных импульсов до вплоть до величины в 600000 импульсов за одну минуту [14]. Данный

преобразователь позволяет на выходе в масштабе реального времени получать кривую частоты вращения ротора АД в виде пропорционального токового сигнала, которого удобно подключать к одному из каналов АЦП цифрового регистратора или осциллографа.

Выводы

1. Выполнен детальный анализ способов определения в масштабе реального времени величины скольжения асинхронных двигателей системы собственных нужд современных электрических станций.

2. Установлено, что наиболее оптимальным способом определения с позиции точности величины скольжения асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций в темпе процесса является использование современных оптических энкодеров;

3. Установлено, что для асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций, у которых отсутствует доступ к торцу вала ротора, и работающих в типовых режимах работы без существенных колебаний частоты вращения ротора, оптимальным подходом к измерению величины скольжения является применение индуктивных бесконтактных датчиков положения или обнаружения объектов;

4. Установлено, что для удобства измерения величины скольжения асинхронного двигателя при выполнении экспериментальных исследований оптимально сочетать оптический энкодер приращений, устанавливаемый на валу электрической машины, с программируемым частотно-токовым преобразователем, что позволяет качественно выполнять подсчёт импульсов и формирование аналогового токового сигнала, пропорционального скорости, удобного для регистрации современными цифровыми осциллографами или регистраторами.

Перечень ссылок

1. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока [Учебник для вузов.] / А. И. Вольдек, В. В. Попов – СПб.: Питер, 2007. – 350 с.

2. Аббасова Э. М. Собственные нужды тепловых электростанций / Ю. М. Голоднов, В. А. Зильберман, А. Г. Мурзаков: под ред. Ю. М. Голоднова – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.

3. Сивокобыленко, В. Ф. Режимы работы, релейная защита и автоматика асинхронных электродвигателей : монография / В. Ф. Сивокобыленко, С. Н. Ткаченко; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Донецкий национальный технический университет. – Донецк : ИП Криничная И. В., 2024. – 422 с.

4. Сивокобыленко, В. Ф. Математическое моделирование комбинированной тепловой защиты глубокопазного асинхронного двигателя / В. Ф. Сивокобыленко, С. Н. Ткаченко // Электрические станции. – 2020. – № 2 (1063). – С. 46-53.

5. Васюхно, Н. С. Сравнительный анализ датчиков измерения скорости / Н. С. Васюхно // Энергетика, управление и автоматизация: инновационные решения проблем : Материалы II Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей Научное издание, Санкт-Петербург, 22 декабря 2022 года / Под общей редакцией Т.Ю. Коротковой, сост. М.С. Липатов, Е.Н. Лашина. – Санкт-Петербург: Высшая школа технологии и энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", 2023.

6. F. Briz, J. A. Cancelas and A. Diez, "Speed measurement using rotary encoders for high performance AC drives," Proceedings of IECON'94 - 20th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Bologna, Italy, 1994, pp. 538-542 vol.1, doi: 10.1109/IECON.1994.397844.

7. Сергеева, А. Индуктивные энкодеры широкого применения от Fenac Technology / А. Сергеева // Control Engineering Россия. – 2023. – № 2(101). – С. 13-17.

8. ГОСТ 27471-87 Машины электрические вращающиеся. Термины и определения. Дата обращения: 17 июня 2022. Архивировано 25 января 2021 года.

9. Autonics® Corporation : офиц. сайт. – Пусан, 2025. – URL: <https://www.autonics.com/us/> (дата обращения: 01.04.2025).

10. Мозоляк, Е Индуктивные датчики положения фирмы Pepperl+Fuchs / Е. Мозоляк // Журнал «Современная электроника и технологии автоматизации». – Выпуск 3. – Москва, 2003. – С.6-20;

11. ГОСТ ИЕС (МЭК) 60034-1-2014 Машины электрические вращающиеся. Ч. 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики: изд. офиц.: утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 402-ст от 25.05.2015 г.: введ. впервые: дата введ. 2016-03-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 62 с.

12. M. Meira, C. Ruschetti, C. Verucchi, J. M. Bossio and G. Bossio, "A Speed Estimation Strategy for Wound Rotor Induction Motor," 2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), San Miguel de Tucuman, Argentina, 2018, pp. 1-8, doi: 10.1109/ARGENCON.2018.8646111.

13. Скляр А.В. Совершенствование методики и устройства определения частоты вращения асинхронных двигателей на основе частотного анализа тока статора: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Омск. – 2018. – 196 с.

14. ifm electronic ltd. : офиц. сайт. – Hamton, 2025. – URL: <https://www.ifm.com/gb/en/product/DW2503> (дата обращения: 01.04.2025).

УДК 621.311.2:519.876.5

**РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ
КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ**

Т.И. Хайруллин, Д.А. Исаков, Р.Р. Насыров

ФГБОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

В докладе рассматриваются возможные подходы к тестированию инновационных решений, внедряемых в электроэнергетическую систему, а также анализируются критерии подобия и практические аспекты реализации лабораторных стендов на примере линии электропередачи.

The report examines possible approaches to testing innovative solutions implemented in the electric power system, as well as analyzes similarity criteria and practical aspects of the implementation of laboratory stands using the example of a power transmission line.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, испытательный стенд, физическое моделирование, критерии подобия

Keywords: power systems, test bench, physical modeling, similarity criteria

Вопрос повышения качества управления режимами работы электроэнергетическими системами в современном мире остается открытым. Особенно актуальна данная проблема в технологически изолированных энергосистемах, для которых характерны ограничения в резерве активной мощности и малая инерционность генерации, что может привести к возмущениям даже при малых отклонениях режима от нормального. Для таких энергосистем традиционные способы регулирования частоты и напряжения в некоторых случаях оказываются недостаточно эффективными, откуда возникает необходимость разработки инновационных алгоритмов адаптивного управления. При этом тестирование и проведение натурных испытаний новых алгоритмов усложнено из-за высокой вероятности нарушения электроснабжения потребителей.

В то же время в современных электроэнергетических системах растет внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с применением систем накопления электроэнергии и систем виртуальной инерции, обладающих сложными системами управления и малым опытом эксплуатации [1]. Экспериментальная апробация данных инновационных решений в реально энергосистеме может привести к существенным технико-экономическим последствиям, таким как нарушение статической или динамической устойчивости с последующим возникновением каскадных аварий и высоким финансовым последствиям от недоотпуска электроэнергии и повреждения функционирующих энергообъектов. Кроме того,

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

предъявляемые требования к надежности энергосистемы не допускают возможности преднамеренной имитации аварийных режимов в промышленных масштабах.

Одним из подходов к данной проблеме является математическое имитационное моделирование на специализированных программно-вычислительных комплексах, позволяющих с высокой точностью воспроизводить различные режимы работы энергосистемы. Однако данный метод предусматривает принятие допущений эксперимента (например, неучет нелинейности характеристик оборудования, реальный износ или реальную динамику систем управления). Поэтому даже достаточно точная математическая модель требует экспериментального подтверждения даже в малом масштабе внедрения.

Альтернативным подходом может являться физическое моделирование. Лабораторный стенд, обеспечивающий физически корректное масштабирование электрохимических и электромагнитных процессов в энергосистеме, позволяет исследовать её в контролируемых условиях с исключением технологических и экономических рисков. Физическая модель в уменьшенном масштабе позволяет исследовать новые алгоритмы управления, инновационную релейную защиту, новое оборудование, а также может служить тренажером для подготовки оперативно-диспетчерского персонала. При разработке физического стенда ключевым аспектом является обеспечение динамического и статического подобия (соблюдение критериев подобия - *idem*), обеспечивающего соответствие моделируемых процессов их оригиналам [2].

В случае физического моделирования генераторов и двигательных нагрузок, к необходимым и достаточным критериям подобия можно отнести сохранение инерционных характеристик машины и ее сосредоточенных параметров:

$$M_{*0} = \frac{T_j}{\omega_0 t^2} = idem \quad (1)$$

$$R_m = m_R R_0 \quad X_m = m_X X_0 \quad (2)$$

Для физического моделирования сетевых элементов (линии электропередач (ЛЭП), трансформаторов, реакторов и т.д.) критерием подобия являются безразмерные отношения сосредоточенных параметров схемы замещения. ЛЭП с обеспечением достаточно высокой точности режимных параметров по ее концам можно представить П-образной схемой замещения [3]:

$$Z_{\Pi} = R_{\Pi} + jX_{\Pi} \quad (3)$$

$$R_{\Pi} = R_0 L \quad X_{\Pi} = X_0 L \quad (4,5)$$

$$Y_{\Pi} = jB_{\Pi} \quad B_{\Pi} = B_0 L \quad (6,7)$$

В таком случае критерием подобия физической модели и оригинала является соотношения:

$$\frac{X_{\text{ор}}}{R_{\text{ор}}} = \frac{X_{\text{мод}}}{R_{\text{мод}}} = idem \quad (8)$$

$$X_{\text{ор}} B_{\text{ор}} = X_{\text{мод}} B_{\text{мод}} = idem \quad (9)$$

Из выражений (8) и (9) вытекает подобие волновых характеристик линий, то есть равенство волновых длин линий и в первом приближении $\lambda_{\text{ор}} = \lambda_{\text{мод}}$.

При разработке стенда немаловажным элементом является выбор номинального напряжения, который определяется из доступности для реализации в лаборатории. Как правило, целесообразным напряжением являются низковольтные диапазоны, которые позволяют безопасно проводить эксперименты с сохранением адекватного подобия. Моделируемая мощность генераторов стенда также выбирается из исходя из возможностей лаборатории. В таблице 1 представлены наиболее распространенные классы напряжения и мощности генераторов для разработки испытательных стендов.

Таблица 1 – Применяемые классы напряжения и мощности лабораторных стендов

Мощность стенда, кВт	1,5	2,2	5,5	7	11	15	20	-	-
Напряжение стенда, В	12	24	48	60	110	220	380	690	1000

Для апробации рассчитываемых режимных параметров необходимо ввести масштабные коэффициенты напряжения и мощности модели к оригиналу:

$$m_u = \frac{U_{\text{ор}}}{U_{\text{мод}}} \quad m_s = \frac{P_{\text{ор}}}{P_{\text{мод}}} \quad (10,11)$$

Откуда следует, что масштабный коэффициент сопротивлений и проводимостей схемы определяется:

$$m_z = \frac{Z_{\text{ор}}}{Z_{\text{мод}}} = \frac{m_u^2}{m_s} \quad (12)$$

Адекватность модели также характеризуется возможностью подбора параметров ее элементов, удовлетворяющих критериям подобия (8) и (9). Иными словами, перед реализацией стенда необходимо удостовериться в возможности подбора уменьшенных $X_{\Pi}, R_{\Pi}, B_{\Pi}$ свойств ЛЭП, а значит выбора резистора, катушек индуктивности и конденсаторов, предназначенных для работы под напряжением и токовой нагрузкой стенда. Для этого были рассчитаны модели ЛЭП для различных классов напряжения оригинальной

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

энергосистемы, сечениях проводов электропередачи, а также их изменение при различных мощностях лабораторного генератора и напряжения стенда (рисунок 1 и рисунок 2), соответствующих критериям подобия. В качестве исходных данных при различных классах напряжения оригинала ЛЭП взяты технико-экономические предельные перетоки активной мощности и соответствующие им сечения сталеалюминиевых проводов (таблица 2) [4]. Также в таблицу 2 сведены результаты режимных параметров после выбора реальной емкости, резистора и катушки модели ЛЭП с учетом реалистичности реализации.

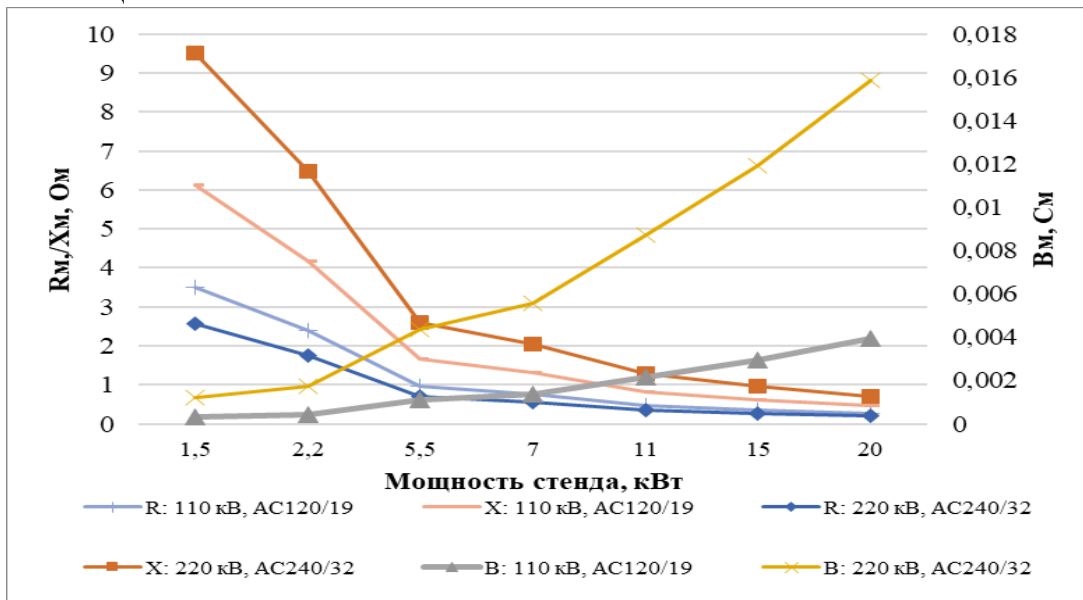


Рисунок 1 – Зависимость параметров модели ЛЭП от мощности стенда при неизменном напряжении 380 В

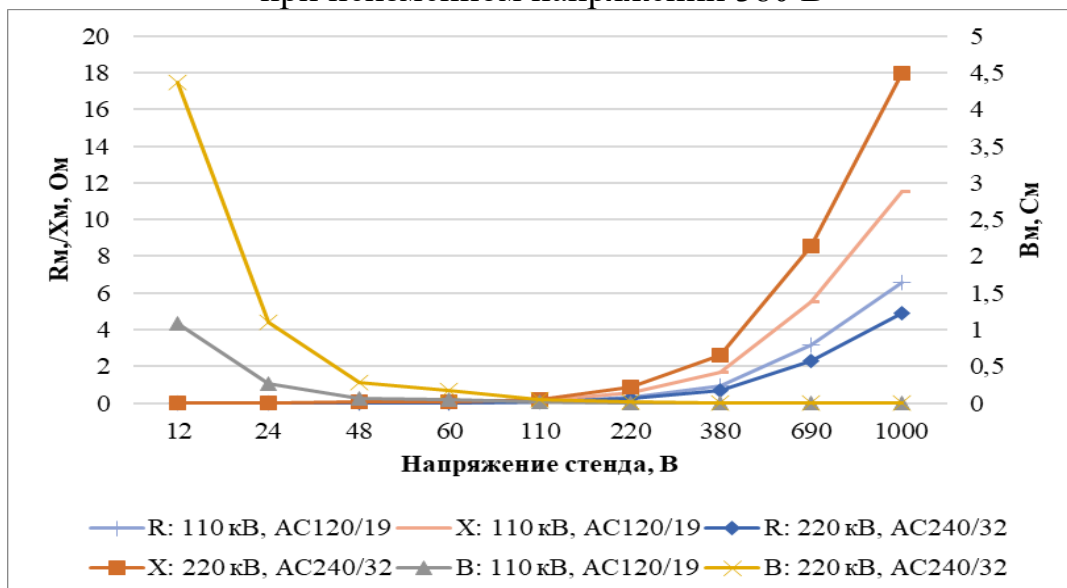


Рисунок 2 – Зависимость параметров модели ЛЭП от класса напряжения стенда при неизменной мощности 5,5 кВт

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

Таблица 2 – Результаты расчетов параметров модели ЛЭП и сравнение с оригиналом при мощности стенда 5,5 кВт и напряжении 380 В

Исходные данные	Параметры ЛЭП оригинал	Параметры ЛЭП стенда	Необходимые элементы	Доступные элементы	Погрешность режимных параметров
$U_{ор} = 110 \text{ кВ}$ $P_{ор} = 45 \text{ МВт}$ $P_{лэп} = 30 \text{ МВт}$ АС 120/19	$R = 9,76 \text{ Ом}$ $X = 17,08 \text{ Ом}$ $B = 106 \text{ мкСм}$	$R = 0,953 \text{ Ом}$ $X = 1,668 \text{ Ом}$ $B = 1089 \text{ мкСм}$	$R = 0,953 \text{ Ом}$ $L = 5,31 \text{ мГн}$ $C = 3,47 \text{ мкФ}$	$R = 1 \text{ Ом}$ $L = 5,2 \text{ мГн}$ $C = 3,3 \text{ мкФ}$	$\Delta_P = 4,93\%$ $\Delta_Q = -4,84\%$
$U_{ор} = 220 \text{ кВ}$ $P_{ор} = 110 \text{ МВт}$ $P_{лэп} = 100 \text{ МВт}$ АС 240/32	$R = 11,8 \text{ Ом}$ $X = 43,5 \text{ Ом}$ $B = 260 \text{ мкСм}$	$R = 0,704 \text{ Ом}$ $X = 2,596 \text{ Ом}$ $B = 4364 \text{ мкСм}$	$R = 0,7 \text{ Ом}$ $L = 8,26 \text{ мГн}$ $C = 13,9 \text{ мкФ}$	$R = 0,7 \text{ Ом}$ $L = 8,3 \text{ мГн}$ $C = 13,3 \text{ мкФ}$	$\Delta_P = -0,6\%$ $\Delta_Q = -4,3\%$

Таким образом, можно сделать следующие **выводы**:

1. При увеличении мощности стенда продольные параметры ЛЭП R и X квадратично уменьшаются, а поперечная проводимость B возрастает. При достаточно высоких мощностях подбор элементов R и X для физической модели становится невозможен в силу ограничения резисторов и катушек индуктивности по номинальному току (допустимый нагрев). В то же время существующий выбор конденсаторов не препятствует для моделирования зарядной составляющей ЛЭП.

2. При увеличении номинального напряжения стенда наблюдается обратная картина, где поперечная проводимость линии квадратично уменьшается, в то время как продольные параметры увеличиваются. При малых напряжениях физические модели резисторов и катушек также затруднительно из-за отсутствия столь низких резисторов и индуктивностей.

3. При оптимальной мощности стенда от 3 до 7 кВт и напряжении 380 В погрешности моделирования электрического режима не превышают 5% от оригинальной линии электропередачи под нагрузкой.

Перечень ссылок

1. Бурмейстер М. В. Системы виртуальной инерции: новый подход к интеграции ВИЭ в электроэнергетические системы / М. В. Бурмейстер, И. И. Бердышев, Р. В. Булатов, Р. Р. Насыров // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 6(81). – С. 74-81.
2. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) : Учебник для вузов по специальности "Кибернетика электрических систем" / В. А. Веников, Г. В. Веников. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1984. – 439 с.
3. Электрические системы и сети : учебник для электроэнергетических специальностей / В. И. Идельчик. – 2-е изд., стер., перепеч. с изд. 1989 г. – М. : Альянс, 2009. – 592 с.
4. Справочник по проектированию электрических сетей / И. Г. Карапетян, [и др.] ; ред. Д. Л. Файбисович. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2017. – 376 с.

УДК 621.311.001.57

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
СЕТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЭС**

А.Д. Иваницкий, Н.Ш. Чемборисова
ФГБОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Оптимизацию работы ЭЭС можно эффективно проводить с учетом оценки чувствительности её элементов к изменениям схемы и режима с использованием метода сальдо-проводимостей. Это позволяет сократить объем расчетов для нормализации напряжения, снижения потерь активной мощности и повышения качества электроэнергии, для целей энергосбережения.

Annotation. The optimization of the power system operation can be effectively carried out taking into account the assessment of the sensitivity of its elements to changes in the scheme and mode using the balance-conductivity method. This allows you to reduce the number of calculations for voltage normalization, reducing active power losses and improving the quality of electricity for energy saving purposes.

Ключевые слова: метод сальдо-проводимости, матрица узловых проводимостей, коэффициент чувствительности.

Keywords: balance-conductivity method, nodal conductivity matrix, sensitivity coefficient.

При функционировании сложных электроэнергетических систем (ЭЭС) часто возникают возмущения, которые вызывают изменения таких параметров режима как модули и фазы напряжений в узлах, перетоки мощностей и токи в ветвях. Эти изменения могут значительно отличаться для разных элементов системы, что позволяет разделить узлы на две группы: «сенсорные», обладающие высокой чувствительностью к изменениям схемы или режима, и «жесткие», параметры которых остаются стабильными при возмущениях [4]. При управлении режимами и анализе свойств ЭЭС наибольший интерес представляют сенсорные узлы с более выраженной реакцией на возмущения. Традиционные методы идентификации таких узлов основаны на сингулярном или спектральном анализе матрицы Якоби [2], используемой при расчетах установившихся режимов, но эти методы не всегда применимы из-за возможной расходимости расчетов.

Проектирование и эксплуатация сложных ЭЭС требуют

значительных вычислительных ресурсов из-за необходимости моделировать разные нормальные, аварийные, послеаварийные, ремонтные схемы и режимы. Целесообразна разработка методики выбора ключевых элементов (сенсорных узлов), анализ которых наиболее информативен, обеспечить сопоставление схем и режимных параметров на единой математической основе для решения перечисленных ранее задач до выполнения трудоемких расчетов. Управление напряжением в сенсорных узлах, как показано в исследованиях [3], способствует снижению потерь активной мощности, что подчеркивает значимость их идентификации.

Одним из перспективных подходов к решению этой задачи является метод сальдо-проводимостей, основанный на анализе элементов матрицы узловых проводимостей (МУП). Этот метод предполагает вычисление разности ΔY_i между собственной проводимостью узла Y_{ii} и суммой его взаимных проводимостей Y_{ij} с выделением реактивной составляющей ΔB_i , которая играет ключевую роль в управлении уровнями напряжений и реактивных мощностей. Узлы с индуктивным характером ΔB являются более сенсорными, а с емкостным – более жесткими. Сравнение схем по количеству сенсорных узлов позволяет прогнозировать уровни напряжений: схемы с преобладанием сенсорных узлов характеризуются пониженными напряжениями. Эффективность метода сальдо-проводимостей подтверждается практическими исследованиями. Например, анализ режимов ретроспективной схемы Московской энергосистемы для узлов 110 кВ показал, что изменение напряжения в наиболее сенсорном узле составило 6%, в то время как в наиболее жестком узле – лишь 0,7% при одинаковом изменении реактивной мощности, величина изменения (снижения) активных потерь в сети при управлении в сенсорном узле в 1,5 раза больше, чем при управлении в жестком узле [3]. Это подтверждает корректность предварительной оценки чувствительности узлов и использования их для повышения экономичности работы ЭЭС.

Анализа связи модуля напряжения U_i с небалансом реактивной мощности в i -м узле базируется на функциональной зависимости небаланса реактивной мощности и напряжения в узле

$$W_Q = U_i^2 Y_{ii} \cos \alpha_{ii} - U_i \sum_{j=1, i \neq j}^n U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) - \\ - Q_{yi} - U_i U_{i0} Y_{i0} \cos(\delta_i - \alpha_{i0}) = 0,$$

где Y_{ii} и α_{ii} характеризуют собственную проводимость i -го узла, Y_{ij} и α_{ij} характеризуют взаимные проводимости i -го и j -х узлов; δ_i и δ_j – фазы

Анализ значения производной W_{Qi} по приращению напряжения U_i с учетом допущения о равенства напряжений во всех узлах номинальным значениям и пренебрежении фазовыми сдвигами ($\delta_i \approx \delta_j$) показывает, что производная будет пропорциональна $(b_i + \Delta b_i)$, где Δb_i отражает чувствительность узла. Таким образом, сенсорные узлы, обладающие наибольшей эффективностью управления напряжением, являются предпочтительными для решения задач нормализации напряжения и снижения суммарных активных потерь в сетях ЭЭС.

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

1. Алгоритм формирования МУП является достаточно известным, в связи с чем подробно не описывается [1].

2. Анализ чувствительности узлов.

Ранжирование узлов выполняется на основе разности мнимой составляющей диагонального элемента матрицы и суммы взаимных составляющих для этого узла.

Расчетные результаты представлены в таблице 1. Из нее видно, что самым сенсорным является узел 3220, а самым жестким – 7110.

Таблица 1 — Результаты метода сальдо-проводимостей.

Номер узла								
3220	4220	2220	6220	5220	10110	1110	8110	7110
← сенсорные					жесткие →			

3. Проведение расчетов для трех траекторий утяжеления: увеличение нагрузки в узле Н1, в узле Н2 и в узлах Н1 и Н2.

Для каждой траектории изменяются способы задания СХН в утяжеляемом и неутяжеляемом узлах, что позволит получить 9 подтраекторий. Нагрузка увеличивается ступенчато по 5 МВт и 5 Мвар с контролем напряжений в узлах. Критериями прекращения расчетов служили: снижение напряжения ниже 0,7 от номинального, превышение допустимых токов в ВЛ или нарушение статической устойчивости.

Для графического отображения зависимостей напряжений в узлах от вида утяжеления и способа задания нагрузки будут использованы коэффициенты чувствительности, которые определяются как отношение изменения параметра к возмущению $K_{ij}^P = \partial U_i / \partial P_j$, $K_{ij}^Q = \partial U_i / \partial Q_j$.

Траекториям утяжеления присваиваются следующие порядковые номера для удобства графического представления результатов:

В Н1 и Н2 нагрузка задана постоянным отбором мощности, 2. В Н1 – мощностью, в Н2 – постоянным током, 3. В Н1 – мощностью, в Н2 – шунтом на землю, 4. В Н1 – током, в Н2 – мощностью, 5. В Н1 и Н2 – токами, 6. В Н1 – током, в Н2 – шунтом, 7. В Н1 – шунтом, в Н2 – мощностью, 8. В Н1 – шунтом, в Н2 – током, 9. В Н1 и Н2 — шунтами.

4. Анализ результатов расчетов.

Для одного из видов утяжелений результаты представлены на рисунке 2, остальные имеют аналогичные по структуре графики.

Из рисунка 2 видно, что увеличение мощности в узле нагрузки Н1 влечет за собой просадку напряжения в этом узле, но вызывает обратный эффект в начале ВЛ, соединяющей нагрузку Н1 с ЭЭС, за счет того, что зарядная мощность двух ВЛ проявляет поддерживающий эффект напряжения. Интересно, что при утяжелении напряжение в узле

Н2 имеет тенденцию к увеличению.

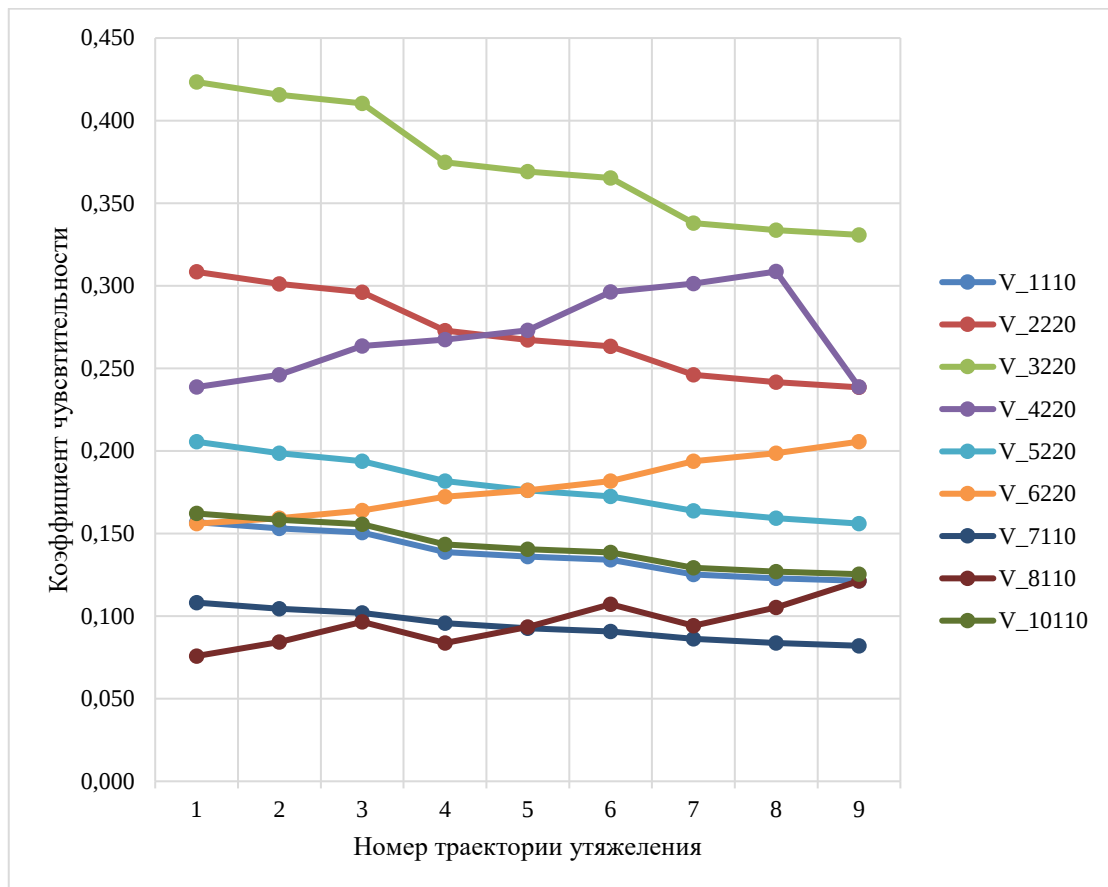


Рисунок 2 — Изменение коэффициентов чувствительности для модулей напряжения в узлах при утяжелении узла Н1.

Выводы. Предложенный метод сальдо-проводимостей предоставляет инструмент для предварительной оценки чувствительности узлов без выполнения полномасштабных расчетов, что особенно актуально для проектирования и эксплуатации сложных электроэнергетических систем. Его применение позволяет оптимизировать управление режимами, снижать потери мощности и повышать качество электроэнергии, что позволяет осуществлять энергосбережение в ЭЭС.

Перечень ссылок

1. Баранов И. Л., Чемборисова Н. Ш. Определение чувствительных узлов электроэнергетических систем на основной частоте и высших гармониках // Электричество. — 2013. — № 8. — С. 15–20.
2. Баранов И.Л., Чемборисова Н.Ш. Применение методик оценки сенсорности узлов ЭЭС на основании разложения матрицы Якоби // Международный журнал экспериментального образования. 2012. № 6. С. 95—96.
3. Буслов В. В., Чемборисова Н. Ш. Влияние статических характеристик современных видов нагрузки на режимы работы электрических сетей // Вестник МЭИ. — 2021. — № 2. — С. 20–28. — DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-20-28.
4. Гамм А.З., Голуб И.И., Бершанский Р.В. Эффективный метод определения слабых связей в электроэнергетической системе // Электричество. 2010. № 9. С. 31—37.

УДК 620.97

**РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СО СТАТИЗМОМ ПО ЧАСТОТЕ ДЛЯ
РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИЗОЛИРОВАННОЙ
ЭНЕРГОСИСТЕМЕ**

В.А. Пронина, М.В. Бурмейстер, И.И. Бердышев, Л.А. Веренцов
ФГБОУ ВО «НИУ "МЭИ"» г. Донецк, Россия

Для подключения ВИЭ используются инверторы, которые должны участвовать в регулировании частоты. Для этого необходимо модифицировать их САУ. В статье разработана САУ на основе статизма по частоте. Для её проверки была разработана имитационная модель в Matlab Simulink. Результаты проведенных опытов показали снижение отклонения частоты при применении разработанной САУ.

To connect RES, inverters are used, which must participate in frequency regulation. To do this, it is necessary to modify their ACS. The article develops an ACS based on droop control. To test it, a simulation model was developed in Matlab Simulink. The results of the experiments showed a decrease in frequency deviation when using the developed ACS.

Ключевые слова: регулирование частоты, САУ инвертора, статизм по частоте.

Keywords: *frequency control, inverter control system, droop control.*

Для поддержания частоты в системе необходимо соблюдать баланс активной мощности, в настоящее время активно развиваются возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнечные электростанции (СЭС) и ветроэлектрические станции (ВЭС). Они имеют стохастический характер выработки, поэтому поддержание баланса активной мощности в энергосистеме со значительным содержанием ВЭС и СЭС усложняется. Для подключения ВИЭ к сети используются инверторы, к которым, в свою очередь, предъявляется ряд требований. Поэтому необходимо реализовывать новые подходы к управлению данными источниками, в частности ГОСТ 58092.3.2-2023 предъявляет требования к участию силовых преобразователей, с помощью которых ВИЭ подключаются к энергосистеме, в первичном регулировании частоты [1]. Чтобы удовлетворить предъявляемым требованиям необходимо изменить структуру системы автоматического управления (САУ). Возможным подходом является применение САУ для преобразователя по отклонению активной мощности преобразователя от заданной уставки и по отклонению частоты в сети от номинального значения [2].

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

Цель работы – разработка имитационной модели силового преобразователя с управлением на основе отклонений по частоте и активной мощности преобразователя в Matlab Simulink.

На основе работы [2] была разработана САУ, представленная на рисунке 1.

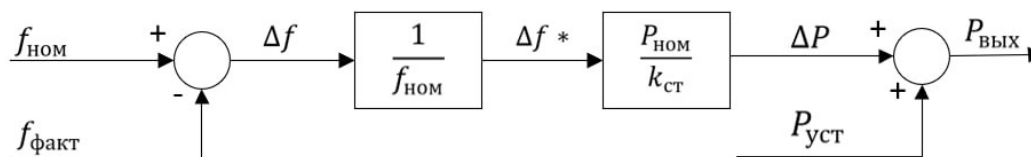


Рисунок 1 – Структурная схема САУ преобразователя со статизмом по частоте

Входными сигналами для данной системы управления преобразователя являются уставка по частоте $f_{\text{НОМ}}$ и фактическая частота сети $f_{\text{ФАКТ}}$. Выходным является выходная мощность $P_{\text{ВЫХ}}$ со стороны переменного тока преобразователя, которая передаётся в контур управления тока преобразователя. Фактическое значение частоты входит в сумматор со знаком «-», а значение уставки по частоте со знаком «+». На выходе из сумматора получаем значение отклонения частоты от номинального значения Δf в именованных единицах. Далее полученный сигнал делится на номинальное значение, для перевода отклонения частоты из именованных в относительные единицы. После выходной сигнал $\Delta f *$ умножается на номинальное значение мощности солнечной панели $P_{\text{НОМ}}$ (установленное диспетчером электростанции или алгоритмом отслеживания точки максимальной мощности) и делится на коэффициент статизма $k_{\text{СТ}}$, и получается значение мощности, выдаваемое системой накопления электроэнергии (СНЭЭ) ΔP . Далее полученное значение суммируется с номинальной мощностью солнечной панели $P_{\text{НОМ}}$ и на выходе получается значение мощности, выдаваемое солнечной станцией для компенсации отклонения частоты $P_{\text{ВЫХ}}$.

Для моделирования разработанной САУ был выбран Matlab Simulink, так как в данный программный комплекс позволяет создавать произвольные САУ и имеет все необходимые блоки для моделирования. На рисунке 2 представлена имитационная модель САУ инвертора смоделированная в Matlab Simulink, на основе модели, представленной на рисунке 1.

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.



Рисунок 2 – Разработанная САУ преобразователя со статизмом по частоте, представленная в Matlab Simulink

Для проверки работоспособности модели была использованная тестовая модель, представленная на рисунке 3 и состоящая из фотоэлектрического модуля (ФЭМ), накопителя электроэнергии (НЭЭ), инвертора, фильтра, повышающего трансформатора, воздушной линии 10 кВ, дизель-генераторной установки (ДГУ) и двух нагрузок, представленных шунтами [3, 4].

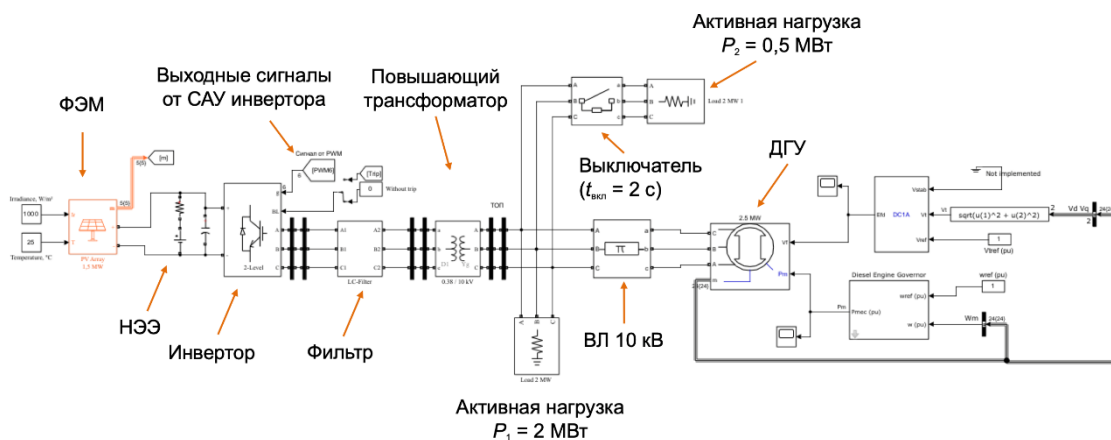


Рисунок 3 – Тестовая модель для проверки работоспособности САУ преобразователя

Для проверки работы САУ были проведены опыты по подключению нагрузки №2 мощностью 0,5 МВт в момент времени, равный 2 секундам от начала симуляции. Исследовалось поведение частоты при переходном процессе в зависимости от применения разработанной САУ, а также от различных коэффициентов статизма преобразователя.

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

Для турбин ТЭС и АЭС коэффициент статизма равняется 4–5%, для турбин ГЭС 4,5–6% [5]. Таким образом для проведения опыта были выбраны значения коэффициента статизма равные 4, 5 и 6 %, а также 2 %, так как инвертор имеет отличные от турбин технические ограничения и можно выбрать меньший коэффициент статизма для быстрого отклика на переходный процесс. Результаты опыта приведены на рисунке 4. Анализ результатов, полученных в опыте, представлены в таблице 1, где f_{min} – минимальная частота в сети за время переходного процесса, t_{min} – момент времени, в который достигается этот минимум, Δf_{max} – максимальное отклонение частоты от номинального значения.

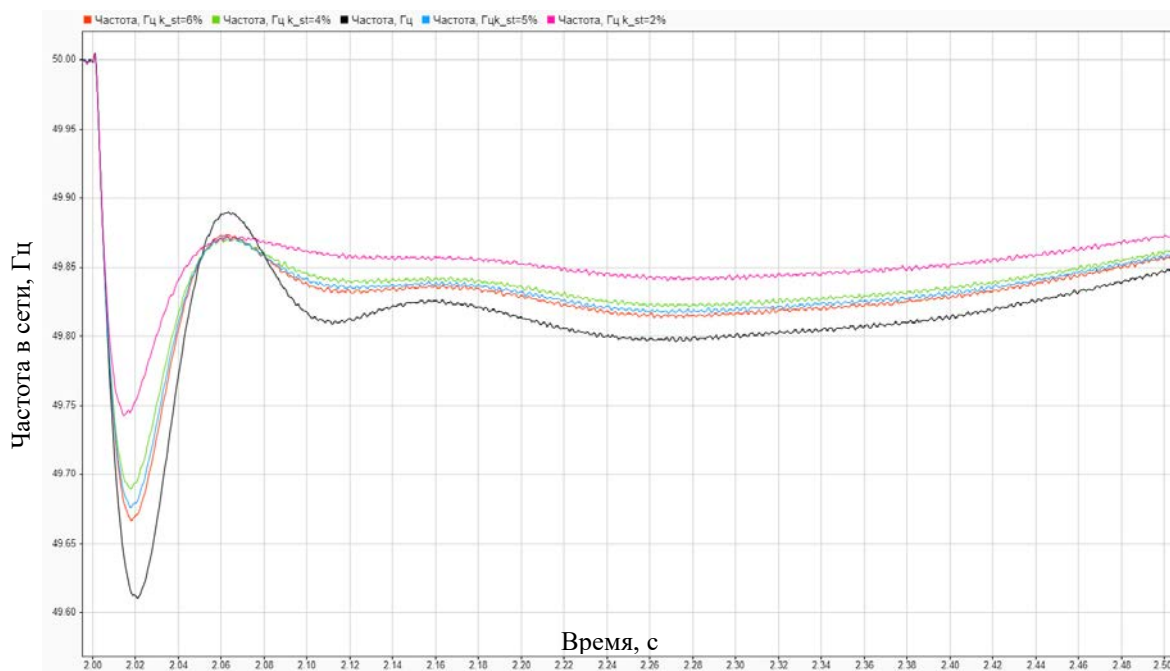


Рисунок 4 – Зависимость частоты от времени при применении разработанной САУ

Таблица 1 – Результаты опыта

$k_{ст}$, %	2	4	5	6	Без статизма
f_{min} , Гц	49,740	49,689	49,674	49,666	49,610
Δf_{max} , %	0,520	0,622	0,652	0,668	0,780
t_{min} , с	2,0148	2,0174	2,0177	2,0181	2,0214

Анализируя данные, представленные в таблице 1, можно сделать вывод, что чем меньше коэффициент статизма САУ преобразователя, тем меньше отклонение частоты от номинального значения. Таким образом, применение разработанной САУ преобразователя позволило

снизить отклонение частоты от номинального значения на 66,7% при проведении данного опыта.

В результате выполненной работы была разработана имитационная модель преобразователя с системой управления на основе отклонений по частоте и по активной мощности преобразователя [2]. Модель преобразователя состоит из модулей IGBT-транзисторов, блока широтно-импульсной модуляции, системы управления: сумматоры и блоки усиления. Входными сигналами для системы управления являются данные по активной мощности (уставка и текущее значение), коэффициент статизма, уставка по частоте и частота в системе; выходными – управляющие воздействия для открытия и закрытия IGBT. Разработанная модель будет использована в дальнейшем авторским коллективом для исследования электромагнитных и электрохимических переходных процессов в изолированной энергосистеме с ВЭС и СЭС.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка испытательного стенда для тестирования цифровых систем управления силовыми преобразователями с алгоритмами виртуальной инерции» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024-2026 гг.

Перечень ссылок

1. ГОСТ Р 58092.3.2 – 2023. Системы накопления электрической энергии. Проектирование и оценка рабочих параметров. Применения с преимущественным использованием мощности и интеграция с возобновляемыми источниками энергии.
2. D'Arco S., Suul J.A. Equivalence of Virtual Synchronous Machines and Frequency-Droops for Converter-Based MicroGrids // IEEE Trans. Smart Grid 2014, 5, pp. 394–395.
3. Бурмейстер М.В. Применение систем виртуальной инерции для регулирования частоты в изолированных энергосистемах. Автореферат на соискание учёной степени кандидата наук. – Москва, 2023. – 20 с.
4. Burmeyster M.V., Berdyshev I.I., Bulatov R.V., Nasyrov R.R. and Bakasova A.B. Investigation of the Influence of the Virtual Inertia System on the Stability of a PV Plant // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-7.
5. СТО 59012820.27.100.003-2012. Регулирование частоты и перетоков активной мощности в ЕЭС России.

УДК 004.056.5:004.421.1:658.26

**КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ В ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ НА ОСНОВЕ
ДАННЫХ IOT И АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОЙ
ОПТИМИЗАЦИИ**

Е.О. Ефимов

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический
университет» г. Казань, Российская Федерация

В работе предложена децентрализованная система управления энергопотреблением в жилых зданиях на базе IoT-датчиков и адаптивных алгоритмов. Использование доступных компонентов (Raspberry Pi) позволяет снизить затраты на 15–20% за счет автоматизации контроля устройств. Концепция ориентирована на массовое внедрение без модернизации инфраструктуры.

The paper proposes a decentralized energy management system for residential buildings based on IoT sensors and adaptive algorithms. Using available components (Raspberry Pi) allows reducing costs by 15–20% due to automation of device control. The concept is aimed at mass implementation without infrastructure modernization.

Ключевые слова: IoT, энергосбережение, адаптивные алгоритмы, умные здания, децентрализованные системы, оптимизация энергопотребления.

Keywords: IoT, energy saving, adaptive algorithms, smart buildings, decentralized systems, energy consumption optimization.

Рост энергопотребления в жилом секторе, обусловленный увеличением числа электроприборов и климатическими изменениями, требует доступных решений для оптимизации ресурсов. Традиционные подходы, такие как модернизация инфраструктуры, остаются дорогостоящими и сложными для массового внедрения. В качестве альтернативы предлагается децентрализованная система управления на базе IoT-датчиков и адаптивных алгоритмов. Её ключевое преимущество — использование недорогих компонентов (например, Raspberry Pi и открытого ПО) для автоматизации контроля устройств: отключение света при отсутствии людей, регулировка температуры в пустующих помещениях. Цель работы — показать, что даже без профессионального оборудования можно достичь снижения энергопотребления на 15–20% за счет динамической адаптации к условиям среды. Теоретической основой исследования выступает анализ открытых данных о потерях энергии в жилых зданиях, что делает концепцию реализуемой для широкого круга пользователей. [1]

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

Основу концепции составляет трехуровневая архитектура, обеспечивающая автономное управление энергопотреблением без зависимости от централизованных систем. На первом уровне располагаются сенсорные устройства, интегрируемые в жилое пространство: датчики освещенности, температуры, влажности и присутствия. Эти компоненты, доступные на рынке по низкой стоимости, непрерывно собирают данные о состоянии помещений, формируя цифровой «слепок» среды. Второй уровень представлен локальным контроллером — например, одноплатным компьютером Raspberry Pi, который выступает в роли «мозга» системы. Он обрабатывает входящие данные, используя открытое программное обеспечение, и принимает решения в режиме реального времени. Ключевой особенностью является отсутствие необходимости в облачных вычислениях: вся логика работы реализуется на месте, что снижает риски утечек данных и повышает отказоустойчивость. [2]

Третий уровень — алгоритмический — определяет правила адаптации системы к изменяющимся условиям. Вместо сложных моделей машинного обучения здесь применяются пороговые алгоритмы, основанные на простых эвристиках. Например, если датчик присутствия не фиксирует активность в комнате более 15 минут, контроллер отправляет сигнал на отключение освещения и переход отопления в экономичный режим. При этом система учитывает пересечение параметров: так, снижение температуры зимой при открытом окне блокируется для предотвращения перегрузки нагревательных устройств. Важным элементом архитектуры является модульность: пользователь может гибко настраивать сценарии (например, приоритет работы кондиционера над обогревателем) или добавлять новые датчики без перестройки всей сети.

Оценка потенциала предложенной системы базируется на анализе двух ключевых аспектов: снижения общего энергопотребления и минимизации пиковых нагрузок на сеть. Для этого используются открытые данные, такие как статистика среднесуточного потребления электроэнергии в многоквартирных домах, а также параметры работы типовых электроприборов (обогреватели, кондиционеры, системы освещения). Например, усредненные показатели по Донбасскому региону указывают, что до 25% энергии в жилом секторе тратится на устройства, работающие в фоновом режиме — эта цифра становится отправной точкой для моделирования. [3]

Основой методологии выступает сценарный подход. Рассматриваются типовые ситуации: отсутствие жильцов в течение дня, ночной период с низкой активностью, пиковые часы использования

приборов. Для каждого сценария формируются правила адаптации алгоритмов. Так, в период с 8:00 до 18:00 система может автоматически снижать температуру отопления на 2–3°C при отсутствии движения в помещении, а освещение — переводить в режим 30% мощности при достаточном естественном свете. Эффективность измеряется через коэффициент экономии, рассчитываемый как отношение времени работы устройств в оптимизированном режиме к базовому (неуправляемому) сценарию.

Важным элементом является учет ограничений. Например, алгоритм должен гарантировать, что температура в помещении не опустится ниже санитарной нормы, даже если это приведет к временному росту потребления. Для упрощения расчетов применяется линейная аппроксимация: если датчик присутствия активен менее 10% времени за час, система считает помещение свободным и активирует экономичный режим. Теоретический потенциал экономии оценивается в 15–20% для отопления и 25–30% для освещения, что согласуется с результатами пилотных проектов в ЕС, где аналогичные системы внедрялись в маломасштабных условиях (GrowSmarter в городах Барселона, Кёльн и Стокгольм). [4]

Предложенная система управления энергопотреблением демонстрирует ряд значимых преимуществ, которые делают её перспективной для массового внедрения. Главным из них является экономическая доступность: использование недорогих IoT-датчиков и одноплатных компьютеров снижает стартовые затраты в 3–5 раз по сравнению с коммерческими аналогами, такими как системы умного дома на базе решений от Xiaomi или Philips Hue. Кроме того, открытое программное обеспечение и отсутствие подписок устраняют долгосрочные расходы пользователя. Важным аспектом становится гибкость архитектуры — возможность адаптации под различные типы жилья, от малогабаритных квартир до частных домов. Например, в зданиях с панорамными окнами система может акцентироваться на управлении освещением, а в регионах с холодным климатом — на оптимизации отопления. [5]

Модульность системы также позволяет постепенно наращивать её функционал: пользователь начинает с базовых элементов (датчики присутствия и освещенности), а затем добавляет специализированные компоненты, такие как умные розетки или регуляторы мощности. Это выгодно отличает концепцию от монолитных решений, требующих единовременных инвестиций. Ещё одним преимуществом является автономность работы — данные обрабатываются локально, без передачи

в облако, что не только снижает риски кибератак, но и обеспечивает стабильность при отсутствии интернет-соединения.

Однако концепция не лишена ограничений. Качество работы системы напрямую зависит от точности сенсоров: например, дешёвые датчики движения могут давать ложные срабатывания, приводя к неоправданному отключению приборов. Кроме того, алгоритмы, основанные на простых правилах, требуют ручной настройки под конкретные условия. Так, житель северного региона вынужден самостоятельно корректировать пороговые температуры для отопления, чтобы избежать дискомфорта, а в южных широтах — регулировать допустимую нагрузку на кондиционеры. Ещё одним вызовом остается совместимость устройств: хотя протоколы вроде Zigbee или MQTT стандартизированы, интеграция датчиков от разных производителей может потребовать дополнительных усилий.

Важно отметить, что большинство ограничений носят технический, а не концептуальный характер. Например, переход на более надежные сенсоры или внедрение базовых элементов машинного обучения (например, для фильтрации шумов в данных) способны значительно повысить устойчивость системы. Уже сейчас существуют open-source библиотеки, позволяющие автоматизировать часть настроек, что снижает нагрузку на пользователя.

Реализация концепции начинается с пилотных проектов в сотрудничестве с управляющими компаниями жилых комплексов. Установка системы в тестовых квартирах позволит оценить её эффективность и адаптировать алгоритмы под реальные условия. В долгосрочной перспективе децентрализованные системы могут стать частью «умного города», прогнозируя нагрузки на сеть и оптимизируя тарифы. Для этого необходимы открытые стандарты совместимости устройств и интеграция с государственными программами энергосбережения.

Ключевая рекомендация — развитие open-source сообществ, которые упростят настройку системы через шаблонные сценарии (например, «эко-режим»). Одновременно стоит создавать симуляторы, позволяющие пользователям оценить экономию без покупки оборудования. Несмотря на технические вызовы, концепция сохраняет потенциал за счет баланса инноваций и доступности. Дальнейшие исследования могут связать её с возобновляемой энергетикой, превратив дома в активных участников энергорынка.

Перечень ссылок

1. Южаков Е.С. Гибридные технологии автономного энергоснабжения в системе энергоэффективности социальной сферы // Известия высших учебных заведений. Уральский регион. – 2017. – № 3. – С. 46-50.
2. Скуковская А.А., Струк Т.С. Система «умный дом» // Проблемы и перспективы современной науки. Минский инновационный университет. – 2020. – С. 26-29.
3. Левшов А.В., Пеньков О.В. Современное состояние энергетики Донецкой области // Россия, Европа, Азия: цифровизация глобального пространства: Сборник научных трудов III Международного научно-практического форума. – 2020 – С. 458-461.
4. GrowSmarter: transforming cities for a smart, sustainable Europe // GrowSmarter. — URL: <https://grow-smarter.eu/home> (дата обращения: 15.04.2025).
5. Водянова С.А., Пупенцова С.В., Пупенцова В.В. Механизмы развития и внедрения технологии "умный дом" // Инновации. – 2018. – №7 (237). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mehanizmy-razvitiya-i-vnedreniya-tehnologii-umnyy-dom> (дата обращения: 15.04.2025).

УДК 625.734:537.226.86

**ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ
ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ: КОНЦЕПЦИЯ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
В ПЕШЕХОДНЫХ ЗОНАХ**

Е.О. Ефимов

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический
университет» г. Казань, Российская Федерация

***Аннотация.** Статья исследует концепцию энергогенерирующих покрытий для городов, преобразующих шаги пешеходов в электричество. Модульные пьезоэлектрические системы снижают нагрузку на сети, экономят ресурсы и вовлекают жителей в устойчивое развитие через визуализацию личного вклада.*

***Abstract.** The article explores the concept of energy-generating pavements for cities that convert pedestrian steps into electricity. Modular piezoelectric systems reduce grid load, save resources, and engage residents in sustainable development through the visualization of personal contribution.*

***Ключевые слова:** пьезоэлектрические материалы, энергогенерация, городская инфраструктура, кинетическая энергия, умные города, устойчивое развитие.*

***Keywords:** piezoelectric materials, energy generation, urban infrastructure, kinetic energy, smart cities, sustainable development.*

Современные города, потребляющие до 70% мировой энергии, сталкиваются с двойным вызовом: необходимостью сокращения углеродного следа и растущим спросом на электроэнергию из-за урбанизации и цифровизации инфраструктуры. Традиционные ВИЭ, такие как солнечные панели или ветрогенераторы, часто требуют значительных площадей и капиталовложений, что ограничивает их применение в плотной застройке. В этом контексте внимание исследователей смещается к «невидимым» источникам энергии, интегрируемым в повседневную среду. Одним из таких ресурсов становится кинетическая энергия пешеходов — ежедневно миллионы людей перемещаются по тротуарам, переходам и площадям, однако их движение практически не используется для генерации. Технологии пьезоэлектричества, преобразующие механические колебания в электричество, предлагают принципиально новый подход к «сбору» этой

энергии без нарушения городской эстетики. Установка специализированных покрытий в зонах с высокой проходимостью (вокзалы, торговые центры, стадионы) могла бы создать децентрализованную систему питания для маломощных устройств: уличного освещения, информационных табло или станций зарядки гаджетов. Это не только снизит нагрузку на централизованные сети, но и повысит осознанность горожан в вопросах устойчивого развития через визуализацию процесса генерации в реальном времени.

Основу предлагаемой системы составляют пьезоэлектрические плитки, встроенные в покрытие пешеходных зон. Каждый такой модуль содержит керамические или полимерные пьезоэлементы, которые генерируют электрический заряд при механическом воздействии — например, от шагов человека или вибраций транспорта. Энергия от отдельных плиток поступает в компактные накопители, размещенные непосредственно под покрытием или вблизи зоны установки. Для этой цели могут использоваться литий-ионные аккумуляторы малой мощности либо суперконденсаторы, обеспечивающие быстрый заряд и разряд. Накопленное электричество направляется на питание локальных устройств, таких как светодиодные фонари, интерактивные информационные панели или USB-порты для зарядки мобильных устройств. Ключевое преимущество системы — её модульность: плитки могут комбинироваться в кластеры любой конфигурации, адаптируясь под архитектурные особенности площадей, переходов или лестниц. Это позволяет внедрять технологию точно, фокусируясь на зонах с максимальным пешеходным трафиком, данные о котором доступны через открытые городские сервисы мониторинга. Например, анализ графиков посещаемости парков или вокзалов помогает определить оптимальные участки для установки, повышая общую эффективность системы без сложных расчетов. [1]

Интеграция энергогенерирующих покрытий в городскую среду требует минимального вмешательства в существующую инфраструктуру, что делает технологию привлекательной для муниципалитетов. Плитки с пьезоэлементами монтируются поверх стандартного асфальта или бетона, а их толщина (не более 5–7 см) позволяет сохранить уровень поверхности, избегая создания ступеней или перепадов. Для обеспечения безопасности пешеходов внешний слой плиток выполняется из износостойкого

противоскользящего материала, устойчивого к дождю, снегу и механическим повреждениям. Электропроводка и накопители размещаются в защищенных корпусах, что исключает риск короткого замыкания даже при длительной эксплуатации. Важно, что система не требует выделенных зон отчуждения — её можно внедрять постепенно, заменяя участки тротуаров в ходе планового ремонта. Например, в районах с высокой проходимостью достаточно установить кластеры из 20–30 плиток вдоль маршрутов пешеходных потоков, чтобы обеспечить энергией ближайшие фонари или рекламные щиты. Эксплуатация также упрощается за счет модульной конструкции: поврежденные элементы легко заменяются без остановки всей системы. Для городов с исторической застройкой, где масштабные реконструкции невозможны, такие решения становятся компромиссом между сохранением архитектурного наследия и переходом к «зеленой» энергетике. [2]

Оценка потенциала энергогенерирующих покрытий основывается на сочетании данных о пешеходной активности и технических характеристик пьезоэлектрических материалов. Например, в зоне с ежедневным трафиком 10 000 шагов каждая плитка, использующая керамические пьезоэлементы с КПД 5–10%, способна генерировать до 20–40 Вт·ч в сутки. Для полимерных аналогов, обладающих меньшей эффективностью (2–5%), но повышенной долговечностью, показатель составит около 10–20 Вт·ч. Кластер из 50 таких плиток, установленный на оживленной площади, может накапливать до 1000–2000 Вт·ч ежедневно — этого достаточно для питания ряда светодиодных фонарей мощностью 20 Вт в течение 5–10 часов. Важно, что эффективность системы напрямую зависит от локации: на вокзалах с круглосуточным потоком людей выработка будет стабильнее, чем в парках, где активность снижается ночью. Для предварительной оценки можно использовать открытые данные городских датчиков подсчета пешеходов или даже статистику мобильных операторов. Внедрение в районе с умеренной проходимостью (5 000 шагов/день) позволит сократить расходы на уличное освещение на 15–20%, а в перспективе — компенсировать часть энергии, затрачиваемой на цифровые информационные табло. Однако сезонные факторы, такие как снижение пешеходной активности зимой или износ материалов от перепадов температур, требуют включения буферных накопителей и регулярного мониторинга. [3]

Внедрение энергогенерирующих покрытий открывает путь к созданию устойчивой городской инфраструктуры, где даже повседневная активность жителей становится частью энергосистемы. Несмотря на очевидные преимущества, ключевым барьером остаются затраты: производство пьезоэлектрических плиток пока дороже традиционных асфальтовых покрытий в 3–4 раза, а их срок службы в агрессивных условиях мегаполисов требует дополнительных испытаний. Однако эти ограничения компенсируются долгосрочными эффектами. Например, в районах с высокой проходимостью окупаемость системы может составить 5–7 лет за счет экономии на электроэнергии и снижения нагрузки на сети. Кроме того, развитие технологий гибридных материалов, сочетающих пьезоэффект с солнечной генерацией, способно увеличить КПД установок, а массовое производство — снизить стоимость компонентов. Важным социальным аспектом становится экопросвещение: визуализация данных о собранной энергии через интерактивные дисплеи или мобильные приложения формирует у горожан понимание их личного вклада в энергопереход. Уже сегодня пилотные проекты в городах Европы и Азии демонстрируют, что «умные тротуары» могут стать не только инструментом генерации, но и элементом «зеленого» брендинга города, привлекающего туристов и инвесторов. Таким образом, сочетание инновационных материалов, модульного подхода и открытых данных превращает пешеходные зоны из пассивных элементов инфраструктуры в активных участников энергетического баланса.

Перечень ссылок

1. Нор Е.В., Попов А.Э. Перспективы применения пьезоэлектрического покрытия на железнодорожном транспорте // Цифровая наука. – 2020. – №2-3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-piezoelektricheskogo-pokrytiya-na-zheleznodorozhnom-transporte> (дата обращения: 27.04.2025).
2. Ракусевич Д.В., Алфёрова О.А. Пьезоэлектричество как альтернативный источник энергии // От инноваций к эффективному результату: Материалы X открытой научно-практической конференции. – 2020. – С. 33-37.
3. Mohsen Safaei, Henry A Sodano, Steven R Anton A review of energy harvesting using piezoelectric materials: state-of-the-art a decade later (2008–2018) // Smart Materials and Structures. – 2019. – №28.

УДК 697.911: 658.26

**ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ СИСТЕМ
ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
ВРЕМЕННЫХ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ**

Е.О. Ефимов

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический
университет» г. Казань, Российская Федерация

В работе предлагается методика снижения энергопотребления систем вентиляции жилых зданий через анализ временных графиков нагрузки. На основе открытых данных и простых инструментов моделирования показано, как адаптация режимов работы к реальным условиям позволяет сократить затраты на 12% без дорогостоящей модернизации.

The paper proposes a method for reducing energy consumption of ventilation systems in residential buildings through the analysis of time load schedules. Based on open data and simple modeling tools, it is shown how adapting operating modes to real conditions allows for a 12% reduction in costs without expensive upgrades.

Ключевые слова: энергосбережение, системы вентиляции, жилые здания, оптимизация энергопотребления, временные графики нагрузки, математическое моделирование, энергоэффективность.

Keywords: energy saving, ventilation systems, residential buildings, energy consumption optimization, load time schedules, mathematical modeling, energy efficiency.

Современные жилые здания, особенно многоквартирные дома, являются значительными потребителями энергоресурсов, где до 30% затрат приходится на системы вентиляции и климат-контроля. Однако их эксплуатация зачастую не учитывает динамику реальной нагрузки: оборудование работает в постоянном режиме вне зависимости от присутствия людей, времени суток или сезонных изменений. Это приводит к избыточному энергопотреблению, росту затрат для жильцов и увеличению углеродного следа. Проблема усугубляется тем, что большинство существующих решений по оптимизации требуют установки дорогостоящих датчиков, сложных алгоритмов управления или модернизации инфраструктуры, что экономически недоступно для многих управляющих компаний.

Вместе с тем, даже базовый анализ временных графиков нагрузки систем вентиляции позволяет выявить периоды нерационального использования энергии. Например, пиковые нагрузки утром и вечером могут быть скорректированы за счет снижения производительности ночью, а сезонные колебания — через адаптацию к температуре

наружного воздуха. Ключевым ограничением остается отсутствие простых и универсальных методик, которые могли бы быть реализованы без специализированного ПО или глубоких технических знаний.

Предлагаемый подход фокусируется на использовании открытых данных (нормативы СНиП, статистика потребления) и математическом моделировании, доступном в табличных редакторах. Это позволяет рассчитать оптимальные режимы работы вентиляции для типовых зданий, минимизируя энергозатраты за счет адаптации к реальным условиям. Актуальность работы обусловлена необходимостью массового внедрения энергосберегающих практик в ЖКХ, особенно в условиях роста тарифов и ужесточения экологических требований.

Основу предлагаемой методики составляет синтез нормативных требований к системам вентиляции и реальных данных об энергопотреблении. На первом этапе формируется базовый профиль нагрузки, учитывающий типовые параметры здания: количество жильцов, общую площадь, климатическую зону и сезонные колебания температуры. Например, нормативы СНиП 41-01-2008 задают минимальные требования к воздухообмену, которые можно адаптировать под динамику проживания. Так, в дневное время, когда активность жильцов максимальна, система работает на полную мощность, а в ночные часы её производительность снижается пропорционально уменьшению количества людей в помещениях. [1]

Ключевым инструментом оптимизации становится математическая модель, построенная в табличном редакторе. Она связывает временные интервалы (час, день, месяц) с коэффициентами использования оборудования, рассчитывая интегральное энергопотребление. Для этого вводятся переменные:

1. *Фактор присутствия* (доля времени, когда помещения заняты, на основе усреднённых данных по многоквартирным домам);
2. *Климатический коэффициент* (зависимость мощности вентиляции от температуры наружного воздуха, рассчитанная по историческим метеоданным);
3. *Пиковые периоды* (часы максимальной нагрузки, подлежащие сглаживанию).

Модель позволяет оценить, как корректировка режимов работы (например, снижение скорости вентиляторов на 20% в ночное время) влияет на общее энергопотребление. При этом не требуется специализированное ПО — достаточно базовых функций Excel для обработки линейных уравнений и построения графиков. Важным условием является универсальность подхода: расчёты могут быть

повторены для любого здания при наличии минимального набора исходных данных.

Для демонстрации эффективности методики проведены расчеты на примере типового пятиэтажного жилого дома серии 1-447С-38, рассчитанного на 100 жильцов, с общей площадью 2500 м², расположенного в умеренно-континентальном климате Донбасса. Базовый сценарий предполагал круглосуточную работу системы вентиляции с постоянной производительностью 5000 м³/ч, соответствующей нормам СНиП 41-01-2008. Годовое энергопотребление оборудования в таком режиме составило 48 000 кВт·ч, что эквивалентно затратам в 240 000 рублей (при тарифе 5 руб./кВт·ч). [2]

Применение оптимизированного графика нагрузки позволило сократить энергозатраты за счет двух ключевых мер:

1. *Снижение производительности в ночное время* (с 23:00 до 6:00) на 30%, учитывая минимальное присутствие жильцов.
2. *Сезонная адаптация* — увеличение воздухообмена на 15% в летний период и снижение на 10% зимой, исходя из температурных условий.

Интеграция этих корректировок в модель показала, что годовое энергопотребление уменьшается до 42 240 кВт·ч, что на 12% меньше базового сценария. Экономия для управляющей компании составила бы 28 800 рублей в год без учета затрат на модернизацию. Дополнительный эффект достигается за счет сглаживания пиковых нагрузок: снижение максимальной мощности системы на 18% уменьшает износ оборудования и риски перегрузок электросети. [3]

Важно отметить, что все расчеты выполнены в табличном редакторе с использованием линейных уравнений. Например, зависимость энергопотребления от времени суток описывалась упрощенной функцией (1):

$$\Delta W = \delta \cdot (1 - K_k) \cdot \tau, \quad (1)$$

где ΔW — энергозатраты (кВт·ч); δ — базовая мощность; K_k — коэффициент коррекции; τ — часы работы.

Такой подход исключает необходимость применения специализированного ПО и делает методику доступной для сотрудников ЖКХ без технической подготовки.

Предложенная методика оптимизации энергопотребления систем вентиляции демонстрирует, что даже минимальная адаптация режимов работы к реальным условиям эксплуатации позволяет достичь значительной экономии ресурсов. На примере типового жилого дома показано, что корректировка графика нагрузки и учет сезонных факторов сокращают энергозатраты на 12%, а сглаживание пиков — повышает

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

надежность оборудования. Эти результаты подтверждают, что энергосбережение в ЖКХ возможно без дорогостоящей модернизации: достаточно системного анализа данных и простых инструментов моделирования.

Однако метод имеет ряд ограничений. Во-первых, он опирается на усредненные показатели присутствия жильцов и не учитывает индивидуальные сценарии использования помещений. Во-вторых, точность расчетов зависит от качества исходных данных, таких как климатические условия или соблюдение нормативов воздухообмена. В-третьих, модель не предусматривает интеграцию с системами IoT, которые могли бы повысить гибкость управления в реальном времени.

Перспективы развития работы связаны с устранением этих ограничений. Например, использование данных умных счетчиков позволит уточнить графики нагрузки, а подключение датчиков присутствия — автоматизировать регулировку производительности. Кроме того, метод может быть расширен для анализа других энергозатратных систем зданий (отопление, освещение) в рамках единой модели. Важным направлением остается популяризация подобных решений среди управляющих компаний, поскольку массовое внедрение даже простых оптимизаций способно существенно снизить нагрузку на городские сети и сократить выбросы CO₂.

Таким образом, исследование подтверждает, что рациональное управление энергопотреблением в ЖКХ начинается не с капитальных вложений, а с анализа доступной информации и адаптации существующих процессов. В условиях роста тарифов и климатических вызовов такой подход становится не просто экономически выгодным, но и социально ответственным.

Перечень ссылок

1. СНиП 41-01-2008, Отопление, вентиляция и кондиционирование // Строительные нормы и правила Российской Федерации. Официальное издание. М.: ФГУП ЦПП, 2008.
2. Типовой проект 1-447с-38 пятиэтажный жилой дом на 100 квартир со стенами из кирпича // ГИПРОГОР. 1963г.
3. Смирнова О.Н., Стахов А.Е. Улучшение микроклимата и энергоэффективности зданий за счет систем вентиляции // Прорывные научные исследования как двигатель науки. – 2018. – С.140-142.

УДК 621.3

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УЛИЧНОГО
ОСВЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ
ЕСТЕСТВЕННОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ**

Е.О. Ефимов

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический
университет» г. Казань, Российская Федерация

В работе предложена методика снижения энергопотребления уличного освещения в городах ДНР за счет адаптивных алгоритмов, учитывающих сезонные изменения светового дня и погодные аномалии. На примере г. Шахтёрск показано, что корректировка времени работы светильников сокращает затраты на 17% в год. Метод актуален для регионов с дефицитом ресурсов.

The paper proposes a method for reducing energy consumption of street lighting in the cities of the DPR using adaptive algorithms that take into account seasonal changes in daylight hours and weather anomalies. Using the example of Shakhtyorsk, it is shown that adjusting the operating time of lamps reduces costs by 17% per year. The method is relevant for regions with a shortage of resources.

Ключевые слова: энергоэффективность, уличное освещение, сезонная динамика, адаптивное управление, IoT-датчики, муниципальные энергозатраты.

Keywords: energy efficiency, street lighting, seasonal dynamics, adaptive control, IoT sensors, municipal energy costs.

Рост энергопотребления в городской инфраструктуре, особенно в системах уличного освещения, остается актуальной проблемой для муниципалитетов Донецкой Народной Республики (ДНР). В условиях ограниченных ресурсов и повышенной нагрузки на энергосети рациональное использование электроэнергии становится критически важным. Например, в городах ДНР, таких как Донецк или Горловка, до 25–30% энергозатрат бюджета приходится на освещение улиц, что сопоставимо с показателями многих регионов России. Основная причина неэффективности — использование устаревших алгоритмов управления с фиксированным временем включения светильников, которые не учитывают естественные изменения продолжительности светового дня и погодные условия. Данная работа предлагает методику оптимизации, основанную на анализе открытых метеорологических данных, которая

позволяет снизить энергопотребление на 15–20% без необходимости замены оборудования или значительных финансовых вложений. [1]

Основу методики составляют два ключевых параметра: продолжительность светового дня и статистика погодных аномалий. Для примера рассмотрим г. Шахтёрск (население ~48 тыс. человек), где сезонные колебания естественной освещенности особенно выражены. Летом продолжительность светового дня достигает 17 часов, а зимой сокращается до 7 часов, что создает значительный дисбаланс в работе систем освещения. Используя данные Гисметео за 2023–2024 гг., была выявлена закономерность: в летние месяцы (июнь-август) уличные светильники могут отключаться на 1–1.5 часа раньше стандартного графика, так как естественная освещенность сохраняется даже после заката. Это подтверждается измерениями люксметров, проведенными в рамках пилотных проектов в соседних регионах. Зимой, напротив, туманы и снегопады требуют введения коэффициента запаса — увеличения времени работы светильников на 15%. Такой подход компенсирует снижение видимости без перерасхода энергии в ясные дни. [2, 3]

Реализация методики в условной модели г. Шахтёрск показала, что летнее сокращение времени работы светильников снижает энергопотребление на 21–23%, тогда как зимние корректировки увеличивают затраты на 4–6%. Несмотря на сезонные колебания, суммарный годовой эффект составил 17% экономии. При мощности системы уличного освещения 280 кВт, характерной для города такого размера, и среднем тарифе 4.00 руб./кВт·ч по ДНР, годовая экономия бюджета достигает 780 тыс. рублей. Эти расчеты учитывают работу 2,8 тыс. современных светодиодных светильников мощностью 100 Вт каждый, которые в среднем функционируют 4100 часов в год. Важно подчеркнуть, что переход на динамическое управление не требует замены инфраструктуры — достаточно перенастройки программируемых контроллеров, таких как Овен ТРМ-221, уже установленных в большинстве муниципальных систем. [4, 5]

Перспективы работы связаны с интеграцией IoT-датчиков освещенности, которые могут автоматически корректировать режимы работы светильников в реальном времени. Такие устройства, как датчики движения и фотодиоды, уже активно применяются в «умных городах»

России, но их внедрение в ДНР пока ограничено. Тем не менее, даже текущие результаты демонстрируют, что адаптация режимов освещения к естественным циклам — это быстрое и экономичное решение для снижения нагрузки на бюджет. Дополнительным преимуществом является повышение безопасности дорожного движения, так как учет погодных аномалий минимизирует риски аварий в условиях плохой видимости.

Таким образом, предложенная методика не только сокращает расходы, но и способствует устойчивому развитию городской инфраструктуры. Её внедрение может стать первым шагом к созданию интегрированных энергосберегающих систем, актуальных для регионов с ограниченными ресурсами.

Перечень ссылок

1. Латушкин Ю.М., Летавин И.Д., Кичигина Е.М., Водовозов А.М. Система уличного освещения // Актуальные проблемы современной науки в 21 веке: материалы XII Международной научно-практической конференции, Махачкала, 25 декабря 2016 года. – 2016. – С. 27-29.
2. Архив погоды в Шахтёрске // Гисметео. — URL: <https://www.gismeteo.ru/weather-shakhtersk-11853/archive/> (дата обращения: 01.05.2025).
3. Гавриленко В.Ю. Разработка и применение рационального уличного освещения // Таврический научный обозреватель. – 2016. – №5-1 (10). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-primeneniye-ratsionalnogo-ulichnogo-osvescheniya> (дата обращения: 01.05.2025).
4. Бобков В.Д. Интеллектуальная система контроля уличного освещения // World science: problems and innovations: сборник статей XVII Международной научно-практической конференции: в 3 частях, Пенза, 30 января 2018 года. Том Часть 1. – 2018. – С. 60-62.
5. Sędziwy, A. (2015). A New Approach to Street Lighting Design. LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society, Volume 12, Issue 3, Pages 151-162.

УДК 333.333

**WEB-ПРИЛОЖЕНИЕ «РАСЧЕТ МОЛНИЕЗАЩИТЫ
МНОГОКРАТНЫМИ СТЕРЖНЕВЫМИ
МОЛНИЕПРИЁМНИКАМИ»**

Е.А. Изотов, И.А. Бершадский, В.В. Якимишина
ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ», г. Донецк, ДНР

Web-приложение "Расчёт молниезащиты ОРУ стержневыми молниеотводами" предназначено для расчёта зон молниезащиты в электроэнергетике. Оно объединяет простые сервисные функции и профессиональные инструменты, что упрощает организацию защиты. Автоматизированные расчёты и проверки повышают производительность, что делает приложение востребованным среди специалистов в области молниезащиты.

The web application "Calculation of lightning protection of Outdoor switchgear with rod lightning rods" is designed to calculate lightning protection zones in the electric power industry. It combines simple service functions and professional tools, which simplifies the organization of protection. Automated calculations and checks increase productivity, which makes the application in demand among lightning protection specialists.

Ключевые слова: Web-приложение, Расчёт, Молниезащита, ОРУ, Стержневые молниеотводы, Автоматизированные расчёты, Специалисты.

Keywords: Web application, Calculation, Lightning protection, Outdoor switchgear, Rod lightning rods, Automated calculations, Specialists.

Web-приложение “Расчёт молниезащиты ОРУ стержневыми молниеотводами” разработано по методике СО 153-34.21.122-2003 для расчёта и построения зон молниезащиты с использованием многократных стержневых молниеприёмников в электроэнергетике. Оно предлагает функционал, который объединяет возможности простых сервисов и профессиональных программ, позволяя пользователям оптимизировать организацию молниезащиты.

Предлагаемый инструмент, способен оперативно осуществить расчёт молниезащиты, с минимальным, но достаточным функционалом, и способный решить следующие задачи:

- расчет зоны защиты многократными молниеприёмниками;
- автопроверка защищённости объекта;
- произвольное расположение молниеприёмников на плане;

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

- деление объекта на зоны для расчёта защиты;
- автоматическое вычисление минимизированной высоты молниеприёмника.

Web-приложение выполнено на HTML5 и JavaScript. Для графических построений применяется элемент `<canvas>`.

Основными этапами работы программы являются: ввод исходных данных, расчёт параметров зоны защиты, проверка объекта на защищённость, построение зоны защиты на основе полученных параметров.

К исходным данным требуемых к вводу относятся:

- выбор требуемого уровня надёжности от прямого удара молнии (ПУМ);
- количество молниеприёмников;
- координаты молниеприёмников;
- предварительная высота молниеотвода;
- координаты защищаемого объекта;
- высота защищаемого объекта.

Расположение молниеотводов устанавливается в соответствии с нормативными требованиями для оптимальной защиты. Сравнивается стоимость молниезащиты, установленных на подстанциях, с возможным ущербом от молний. Предпочтительно устанавливать молниеотводы на конструкциях подстанции. Выбор высоты молниеотвода помогает минимизировать затраты на металл, обеспечивая при этом необходимую зону защиты. Расчёт высоты проводится итерационно для достижения минимально необходимой высоты.

Геометрия защищаемого объекта определяется введенными координатами, на их основе выполняется построение защищаемого объекта. Для защиты ОРУ ГПП, зоны располагаем следующим образом (рис. 1).

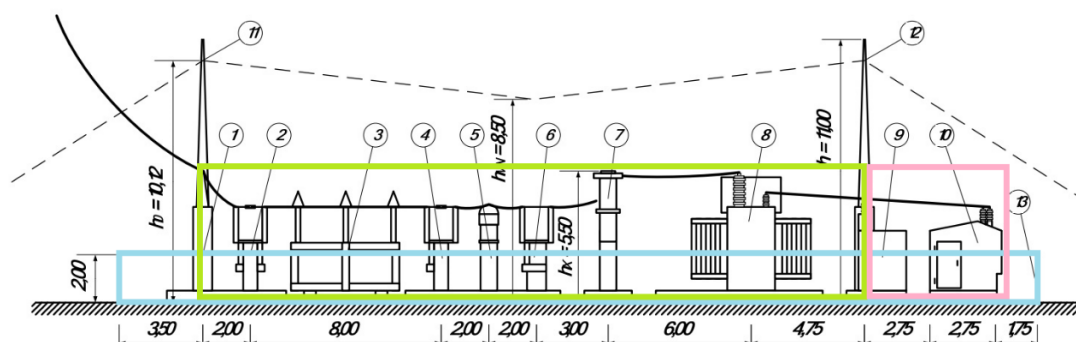


Рисунок 1 – Разделение плана ОРУ ГПП на зоны и предварительное размещение молниеприёмников

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

Приложение позволяет разделить объект на три размерные зоны, как особо характерных для открытого распределительного устройства, что даёт возможность визуально обозначить отдельные части защищаемого объекта.

Блок «Расчёт параметров зоны защиты» необходим для вычисления данных для построения зоны защиты. Расчёты выполняются по формулам в соответствии с «Инструкцией по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций» СО 153—34.21.122-2003 [1].

Блок «Проверка зоны защиты объекта» направлен осуществить проверку защищённости зоны осуществляется на программном уровне в автоматическом режиме.

На данный момент в Web-приложении реализован следующий отличительный функционал, в работа которого была показана выше, а именно:

- выбор уровня надёжности;
- произвольный выбор количества молниеотводов;
- размещение молниеотвода на по заданным координатам;
- возможность добавления нескольких объектов различных геометрических размеров;
- возможность разделить объект на зоны различной высоты;
- расчёт параметров для построения зоны защиты в автоматическом режиме;
- визуализация зон защиты отдельно выбранных молниеотводов на заданных высотах;
- построение защиты на уровне защищаемого объекта для каждой зоны;
- проверка на защищённость объекта, делением зоны на участки;
- автоматическое получение минимизированной высоты молниеотвода путём её наращивания в итерационном процессе;
- построение зон защиты образованной многократными стержневыми молниеприёмниками;
- отказ от использования трёхмерной модели.

Web-приложения “Расчет зон молниезащиты многократными стержневыми молниеотводами” позволяет рассчитывать молниезащиту и более сложных ОРУ, конфигурация которых нестандартна, защиту которых возможно осуществить более чем

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

четырьмя молниеприёмниками. К примеру, для защиты ОРУ-110/35 кВ, зоны предлагается расположить следующим образом. Расчёт следует произвести для зоны защиты образованной 4-мя и 6-ю молниеприёмниками. Полученные результаты минимизированной высоты молниеприёмника для различных уровней надёжности приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчёта выполненные для разной степени надёжности Web-приложением для ОРУ-110/35 кВ

Высота молниеотвода	Программа расчёта по методу СО	Надёжность	Оценка защищенности
$h=17.75$ м	Разработанное Web-приложение	0,9	Объект защищен
$h=20.75$ м		0,99	Объект защищен
$h=25.00$ м		0,999	Объект защищен
$h=17.75$ м	Программа «ЗУМ»	0,9	Объект защищен
$h=20.75$ м		0,99	Объект защищен
$h=25.00$ м		0,999	Объект защищен
$h=17.75$ м	Программа ОАО «ЭНИН»	0.9934	Объект защищен
$h=20.75$ м		0.99922	Объект защищен
$h=25.00$ м		0.999918	Объект защищен

Алгоритм программы позволяет, в дальнейшем расширить функционал программы, и расширить построение зон защиты для 8-ми, 10-ти и большего количества молниеприёмников.

Существующие инструменты для проектирования зон молниезащиты имеют ограниченный функционал или требуют коммерческих решений. Чтобы упростить расчёт молниезащиты, разработано Web-приложение, позволяющее оптимизировать организацию молниезащиты для многократных молниеотводов. С его помощью выполнен расчёт для открытого распределительного устройства главной понизительной подстанции 110/10 кВ с четырьмя молниеотводами высотой 11.31 м, обеспечивающими защиту с надёжностью 0.9 от удара молнии. Расчёт проведён по инструкции СО 153—34.21.122-2003, а корректность приложения проверена сравнением с другими программами. Также были проверены более высокие уровни надёжности (0.99 и 0.999) с высотами молниеотводов 14.27 м и 18.55 м соответственно. Результаты представлены в таблице .

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

Таблица 2 – Результаты расчётом молниезащиты объекта ОРУ
ГПП 110/10 кВ от ПУМ различными программами.

Высота молниевывода	Программа расчёта по методу СО	Надёжность	Оценка защищённости
$h=11.31$ м $h=14.27$ м $h=18.55$ м	Ручной расчёт	0,9 0,99 0,999	Объект защищён Объект защищён Объект защищён
$h=11.31$ м $h=14.27$ м $h=18.55$ м	Web-приложение	0,9 0,99 0,999	Объект защищён Объект защищён Объект защищён
$h=11.31$ м $h=14.27$ м $h=18.55$ м	Программа «ЗУМ»	0,9 0,99 0,999	Объект защищён Объект защищён Объект защищён
$h=11.31$ м $h=14.27$ м $h=18.55$ м	Программа ОАО «ЭНИН»	0.987 0.9986 0.99986	Объект защищён Объект защищён Объект защищён

Выводы

Web-приложение "Расчёт молниезащиты ОРУ стержневыми молниевыводами" предназначено для упрощения расчёта зон молниезащиты в электроэнергетике. Приложение подразделяет объект на три размерные зоны для визуализации защищаемых частей. Результаты сравнимы с другими программами, но наше приложение имеет преимущества: не требует 3D-модели, позволяет добавлять объекты разных размеров, проверяет защищённость делением зоны на участки и автоматически минимизирует высоту молниевывода.

Web-приложение сочетает простые и профессиональные инструменты, автоматизируя процессы и повышая производительность, что привлекает специалистов. Эти функции делают его особенно актуальным для профессионалов.

Перечень ссылок

1. СО 153-34.21.122-2003 Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций.
2. ТКП 336-2011 (02230) Молниезащита зданий, сооружений и инженерных коммуникаций Минэнерго, 2011.
3. ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010 Защита от атмосферного электричества. Часть 2. Управление риском.

УДК 622.311

**МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКОГО
СРАБОТАННОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОАГРЕГАТОВ
НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С УЧЕТОМ ИНДЕКСА
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

А.Н. Назарычев, Д.Д. Манукян
ФГБОУ ВО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМПЕРАТРИЦЫ ЕКАТЕРИНЫ II» г. Санкт-Петербург

В статье рассмотрен метод оценки фактического сработанного ресурса (ФСР) электроагрегатов (ЭА) автономных электростанций собственных нужд (АЭСН) нефтегазовых предприятий. Метод основан на индексе технического состояния (ИТС) с экспоненциальным законом изменения. Приведены математические зависимости и примеры расчетов.

The article presents a method for assessing the Actual Service Life (ASL) of Power Units (PU) in autonomous Captive Power Plants (CPP) of oil and gas enterprises. The method is based on the Technical Condition Index (TCI), which is assumed to follow an exponential law of change. Mathematical expressions and calculation examples are provided.

Ключевые слова: автономные электростанции собственных нужд, индекс технического состояния, технический ресурс, показатели долговечности.

Keywords: autonomous captive power plants, technical condition index, service life, durability indicators.

Электроагрегаты АЭСН нефтегазовых предприятий играют ключевую роль в обеспечении бесперебойного электроснабжения электротехнологического оборудования, используемого при добыче, транспортировке, хранении и переработке углеводородов. Надежность данного оборудования напрямую определяет уровень промышленной безопасности и экономической эффективности нефтегазовых предприятий [1].

АЭСН представляет собой электроустановку, предназначенную для энергообеспечения технологического объекта, которая функционирует независимо от централизованной энергосистемы и обеспечивает технологический объект электрической и тепловой энергией.

Схема АЭСН представлена ниже (рисунок 1).

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

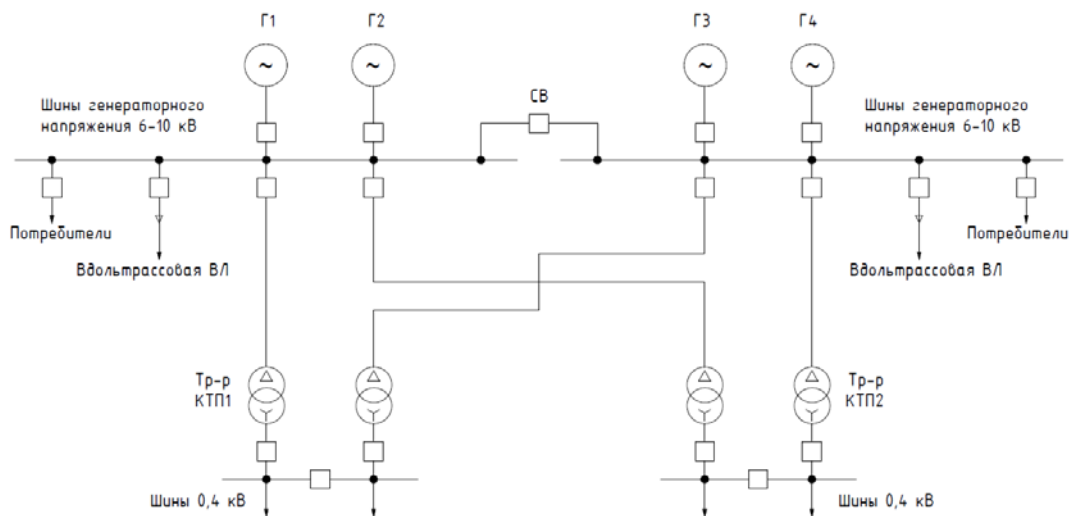


Рисунок 1 — Схема АЭСН [составлено авторами]

В соответствии с нормативно-технической документацией на электроэнергетических объектах требуется определять комплексные технико-экономические показатели. К таким показателям относится надежность работы электрооборудования (ЭО). Свойство надежности наиболее полно отражает показатель долговечности — технический ресурс. Долговечность и технический ресурс пропорционально зависят от динамики изменения технического состояния (ТС) ЭО [2]. Оценка ТС ЭО осуществляется согласно методике, описанной в [3]. В свою очередь, определение параметров, характеризующих техническое состояние, основано на расчете ИТС [2,4,5].

Под ИТС понимается показатель, характеризующий последовательное изменение во времени ТС ЭО под действием различных эксплуатационных факторов. ИТС принимает значения в диапазоне от 0 (наихудшее значение) до 100 (наилучшее значение).

В общем случае функция изменения ИТС ЭО имеет вид [2]:

$$s(r) = f(r\{X_i(r)\}),$$

где r — наработка электроагрегата, год; $X_i(r)$ — множество параметров, от которых зависит ИТС.

Под ФСР понимается момент полной сработки ресурса ЭО, при достижении которого оно переходит в предельное состояние.

ФСР на интервале наработки $[r_1; r_2]$ в общем случае имеет вид [2]:

$$R_{12} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1 - s(r)}{1 - s_0(r)} dr,$$

где $s(r)$, $s_0(r)$ — функции изменения ИТС в фактических и нормативных условиях эксплуатации соответственно.

В [2] функция изменения ИТС ЭО была линейной. Однако условия эксплуатации влияют на ее форму. Учитывая сложность сбора статистических данных о ТС ЭА, допустимо предположить экспоненциальный характер изменения ИТС. Такой закон широко применяется в технике, поэтому в исследовании принимается гипотеза экспоненциального изменения ИТС ЭА.

Функция изменения ИТС при экспоненциальном законе:

$$s(r) = Ae^{\gamma r},$$

где A и γ — коэффициенты, характеризующие скорость изменения ИТС; γ выражается в 1/год.

ФСР на интервале наработки $[r_1; r_2]$ при экспоненциальном законе изменения ИТС:

$$R_{12} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1 - Ae^{\gamma r}}{1 - A_0 e^{\gamma_0 r}} dr,$$

где A , A_0 и γ , γ_0 — коэффициенты, характеризующие скорость изменения ИТС в фактических и нормативных условиях эксплуатации соответственно; γ , γ_0 выражаются в 1/год.

При оценке R_{12} для экспоненциального закона изменения функции ИТС принимаются следующие допущения согласно [2]:

- в начальный момент времени ИТС равен 1;
- нормативный срок службы ЭА принимается равным 25 годам;
- при наработке в 25 лет ЭА переходит в критическое состояние, и ИТС становится равным 0,25;
- при облегченных и утяжеленных условиях эксплуатации γ равна $0,9\gamma_0$ и $1,1\gamma_0$ соответственно.

Так как в начальный момент времени ИТС равен 1, коэффициент A также становится равным 1. При экспоненциальном законе изменения и принятых допущения согласно формуле **Ошибка! Источник ссылки не найден.** γ будет определяться по следующему выражению:

$$0,25 = e^{25\gamma}.$$

В результате решения данного уравнения получим:

$$\gamma = -55 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.}$$

Далее рассматриваются облегченные условия эксплуатации. Аналогичные рассуждения можно провести для оставшихся условий.

Функция изменения ИТС при облегченных условиях эксплуатации будет иметь следующий вид:

$$s_1(r) = e^{-0,955 \cdot 10^{-2} r}.$$

ФСР при $\gamma = 0,9$:

$$R_{12}(\gamma=0,9) = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1 - e^{-0,9 \cdot 55 \cdot 10^{-3} r}}{1 - e^{-55 \cdot 10^{-3} r}} dr = \int_0^{25} \frac{1 - e^{-49,5 \cdot 10^{-3} r}}{1 - e^{-55 \cdot 10^{-3} r}} dr.$$

Функциональные зависимости ИТС от наработки электроагрегата $s(r)$ при различных условиях эксплуатации представлены на рисунке 2. Функциональные зависимости ФСР от наработки ЭА $R(r)$ при различных условиях эксплуатации представлены на рисунке 3. Значения функции $R(r)$ в точках $r = 0, 1, \dots, 25$ получены методом численного интегрирования подынтегральной функции на единичных интервалах $[r; r + 1]$.

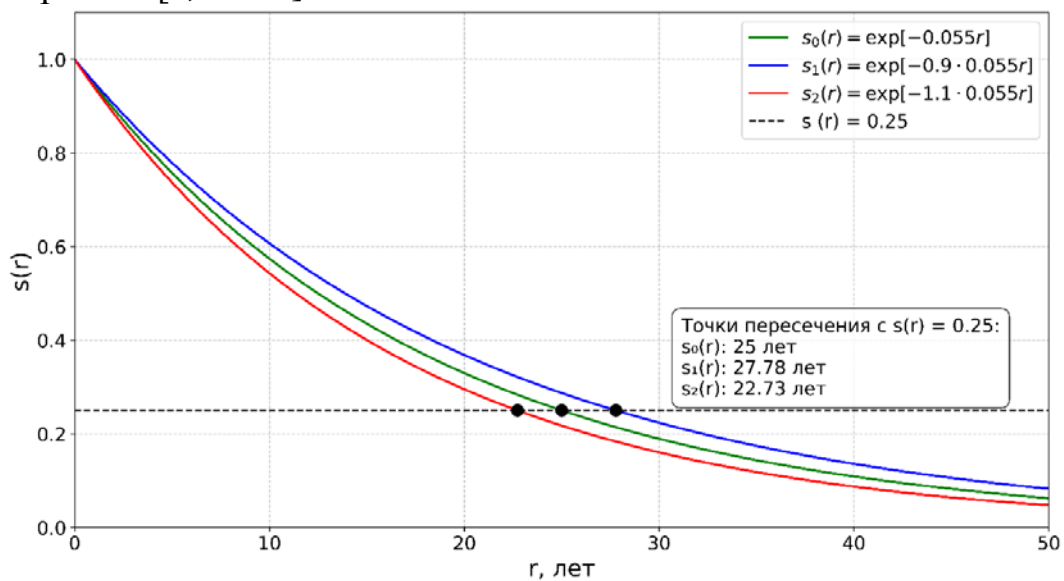
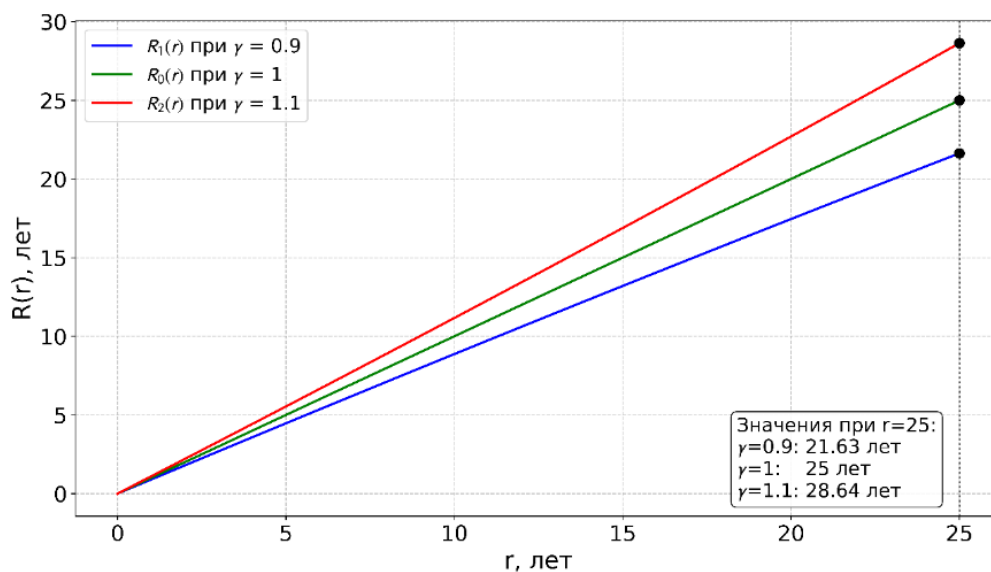


Рисунок 2 — Функциональные зависимости ИТС от наработки электроагрегата $s(r)$ при различных условиях эксплуатации [составлено авторами]



Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

Рисунок 3 — Функциональные зависимости ФСР от наработки электроагрегата $R(r)$ при различных условиях эксплуатации [составлено авторами]

Выводы

Модель оценки ФСР ЭА АЭСН с экспоненциальным ИТС чувствительна к условиям эксплуатации: изменение ИТС на $\pm 10\%$ приводит к отклонению ФСР от 21,63 до 28,64 лет. Цель будущих исследований — эмпирическое определение зависимости изменения ИТС от наработки для последующего расчета ФСР.

Перечень ссылок

1. Токарев, И. С. Формирование отраслевой методики расчета параметров системы накопления электроэнергии для объектов газовой промышленности / И. С. Токарев // Записки Горного института. – 2025. – Т. 272. – С. 171-180. – EDN UIZSOQ.

2. Назарычев, А. Н. Надёжность и оценка технического состояния оборудования систем электроснабжения / А. Н. Назарычев, Д. С. Крупнев; Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН; Петербургский энергетический институт повышения квалификации Минэнерго России; Иркутский национальный исследовательский технический университет. – Новосибирск: Новосибирское отделение издательства 'Наука', 2020. – 224 с. – ISBN 978-5-02-038810-9. – EDN BFEJBE.

3. Приказ Минэнерго России от 17 марта 2020 г. № 192 «О внесении изменений в методику оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей, утверждённую приказом Минэнерго России от 26 июля 2017 г. № 676».

4. Житомирский, Б. Л. Повышение энергоэффективности транспорта природного газа в современных условиях / Б. Л. Житомирский, Д. М. Ляпичев, Е. А. Жукова // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2023. – № 3(312). – С. 98-108. – DOI 10.33285/2073-9028-2023-3(312)-98-108. – EDN POROKF.

5. Левин, В. М. Риск-ориентированный подход к выбору стратегии управления производственными активами энергетической компании / В. М. Левин, Н. П. Гужов, Д. А. Боярова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 6. – С. 29-42. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-29-42. – EDN DTMORL.

Назарычев А.Н. – профессор кафедры электроэнергетики и электрохимии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», д-р. техн. наук;

Манукян Д.Д. – аспирант кафедры электроэнергетики и электрохимии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

УДК 621.333

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

О.К. Маренич, А.А. Тараненко

ГБУ «ДОНГИПРОШАХТ»
г. Донецк, ДНР

Аннотация. В статье рассмотрены проблемные вопросы, относящиеся к эксплуатации технических средств максимальной токовой защиты низковольтных электрических сетей и обоснованы пути повышения эффективности защитной функции.

Annotation. The article considers problematic issues related to the operation of technical means of maximum current protection of low-voltage electric networks and substantiates ways to increase the effectiveness of the protective function.

Ключевые слова: электрическая сеть, короткое замыкание, максимальная токовая защита, анализ, перспективные технические решения

Key words: electrical network, short circuit, maximum current protection, analysis, promising technical solutions

Короткое замыкание (к.з.) в низковольтной электрической сети промышленного предприятия, либо объекта бытового назначения является аварийным процессом, сопровождающимся наиболее опасными последствиями. Будучи ограниченными сопротивлениями питающего трансформатора и кабеля, измеряемыми долями Ом, ток к.з. в таких электрических сетях достигает величин в несколько тысяч Ампер, что представляет угрозу воспламенения электрооборудования и пожара, а также взрыва (при наличии взрывоопасной среды, либо объектов).

Максимальная токовая защита (МТЗ) промышленных электрических сетей, содержащих трёхфазные электропотребители (асинхронные двигатели) предполагает обязательность применения трёхполюсных исполнительных устройств защитного отключения, роль которых, обычно выполняют автоматические выключатели (АВ), оборудованные электромагнитными расцепителями максимального тока. В ряде случаев, при необходимости регулирования уставки срабатывания дополнительно применяют соответствующие устройства

максимальной токовой защиты, воздействующие на независимые, либо нулевые электромагнитные расцепители АВ.

Однако, сам факт применения электромагнитных реагирующих, либо исполнительных органов предопределяет инерционность выполнения защитной функции. Так, собственное время срабатывания АВ типажного ряда АЗ700 находится в пределах 0,08 - 0,1 с., а при использовании дополнительных МТЗ с регулировкой уставки срабатывания продолжительность защитного отключения электрической сети будет ещё увеличена на время срабатывания данной МТЗ. Поэтому, в частности, для шахтных участковых электрических сетей предусмотрена проверка кабелей на термическую устойчивость к току к.з. [1]:

$$S_m \geq \frac{I_{к.з.}^{(3)} \sqrt{t_n}}{K_{\beta t} C}, \quad (1)$$

где S_m - сечение силовой жилы кабеля (мм^2); $I_{к.з.}^{(3)}$ - ток трехфазного короткого замыкания в начале кабеля; t_n - приведенное время отключения (с); $K_{\beta t}$ - коэффициент, учитывающий предварительную нагрузку кабеля и температуру окружающей среды; C - коэффициент, учитывающий конечную температуру нагрева жил при коротком замыкании и напряжение кабеля.

Предполагается, что изоляция кабеля должна выдержать тепловую нагрузку обусловленную возникшим внутри кабеля к.з в течение приведенного времени отключения сети. Однако однофазные сети напряжения 220 В, оборудованные проводами малых сечений ($S_m \leq 6 \text{ мм}^2$) с поливинилхлоридной изоляцией в принципе не в состоянии выдержать подобную тепловую нагрузку в течение столь длительного интервала ($t_n \approx 0,1$ с) отключения. Тем не менее, они также оборудуются однополюсными АВ с электромагнитными расцепителями максимального тока. Статистика пожаров на объектах, обусловленных к.з. в однофазных сетях напряжений 220 В свидетельствует о полной бесполезности применения однополюсных АВ в качестве технических средств максимальной токовой защиты.

Данный вывод подтверждается результатом эксперимента (рис.1), где в трёхфазной сети на выходе АВ типа АЗ792 была создана цепь трёхфазного к.з. (выполняющая функцию плавкого предохранителя). Дополнительно процесс контролировался микропроцессорным блоком МТЗ типа БЗУ-ТП с собственным временем срабатывания 0,04 с, воздействующим на электромагнитные расцепители АВ [2]. Как видно из рисунка, продолжительность процесса к.з. при амплитуде тока 4292

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

А составляет 0,0059с. Процесс сопровождается вспышкой в месте перегорания цепи к.з. при этом реакции АВ и МТЗ не происходит (рукоятка АВ остаётся во включенном положении, световая индикация срабатывания МТЗ отсутствует). В то же время, разрыв цепи к.з. (имитация срабатывания плавкого предохранителя) начинается уже в момент t_1 , (спустя 0.0013 с. От момента t_0 начала процесса к.з.). Это доказывает целесообразность отказа от применения АВ для защиты однофазных электрических сетей напряжения 220 В от к.з. и эффективность использования в этих целях плавких предохранителей.

Следует отметить, что отключение автоматическими

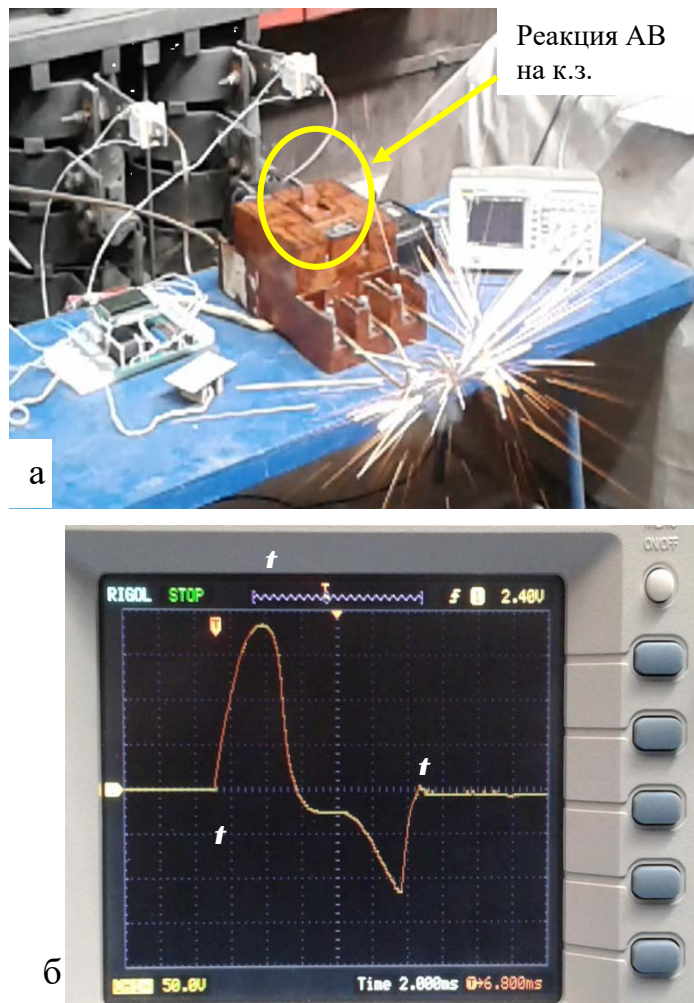


Рисунок 1 – Фиксация момента перегорания плавких элементов в цепи трёхфазного к.з. на выходе АВ за время, меньшее продолжительности реагирования на к.з. блока защиты БЗУ-ТП и расцепителей АВ (а) и осциллограмма тока (б) в цепи к.з. (уставка БЗУ-ТП – 501 А; $U_n = 25,5$ В; $S_{np} = 3 \times 0,52$ мм², амплитуда тока 4292 А; срабатывание предохранителя без отключения АВ, продолжительность процесса 0,0059с)

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

выключателями силовых цепей с высокими токовыми перегрузками сопровождается коммутационными дуго-плазмообразованиями, последствиями которых становятся наплавления металла на контактных площадках силовых контактов (рис.2), существенное уменьшение площади их рабочих поверхностей и, как следствие - перегрев контактов даже рабочими токами и снижение ресурса АВ.



а

б

Рисунок 2 – Состояния поверхности силовых контактов автоматического выключателя АЗ792: а – подвергшихся электродуговому воздействию в процессе отключения высоких токов; б – нормальное состояние контактов

Относительно функционирования МТЗ следует отметить, что в применяемом способе выявления к.з. на основе сравнения тока сети с током уставки изначально заложена инерционность выполнения защитной функции. Применение в этих целях микропроцессорной схемотехники не повышает быстродействие защиты, т.к. предполагает задержку времени на измерение тока, кодировку параметра, его сопоставление с заданным параметром и формирование команды управления отключением. Так, только собственное время срабатывания микропроцессорного блока МТЗ типа БЗУ-ТП (не считая времени срабатывания АВ) несопоставимо (в 6 - 7 раз) больше времени срабатывания плавкого предохранителя.

В связи с этим, концепция выявления к.з. внешним устройством МТЗ должна предполагать реакцию на скорость роста тока защищаемой электрической сети. Пример технической реализации этого принципа применительно к трёхфазной электрической сети иллюстрируется диаграммой (рис.3) [3], где осуществляется реакция на смещение (влево) точки равенства мгновенных значений токов двух смежных фаз в процессе роста тока сети (амплитуды импульсов U_1 , соответствующие интервалам времени ΔT сравниваются с опорным напряжением U_{on}).

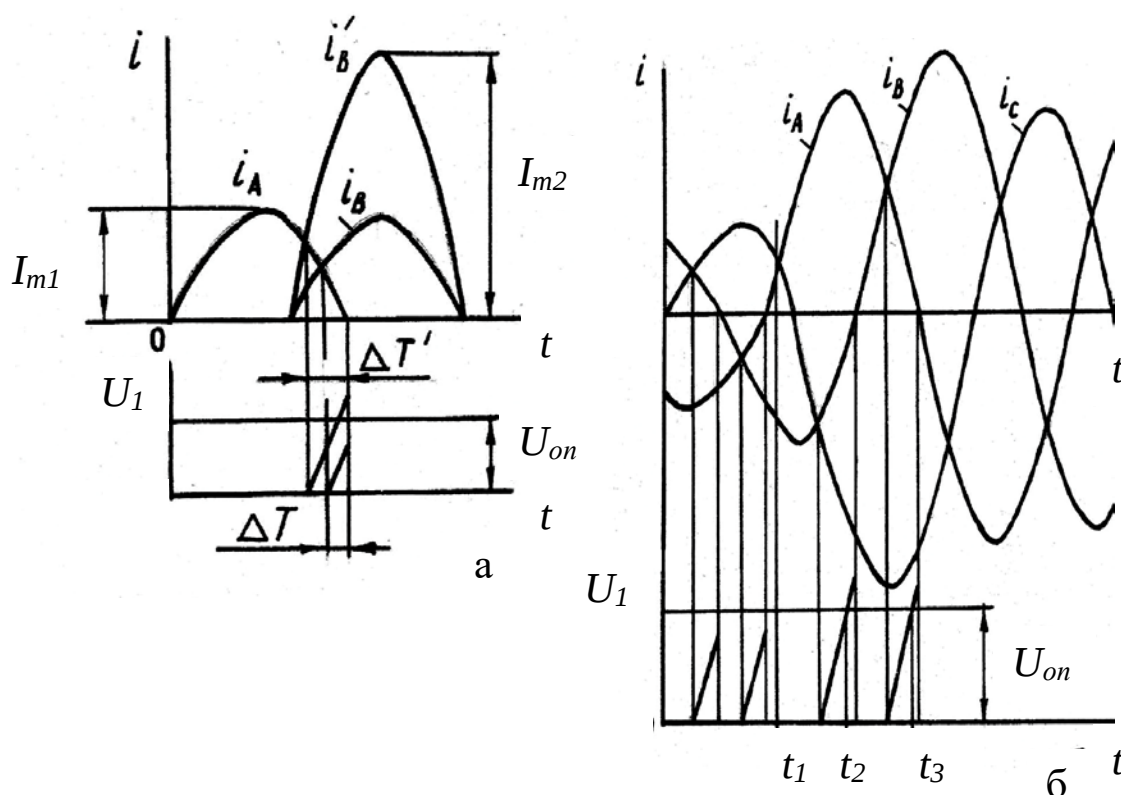


Рисунок 3 – Диаграммы электрических параметров устройства выявления смещения момента совпадения мгновенных значений токов смежных фаз трёхфазной электросети: а – токовая перегрузка сети; б – трёхфазное к. з. (трёхфазная система токов со стороны питающей трансформаторной подстанции)

Таким образом, эффективность защиты низковольтных электрических сетей от коротких замыканий может быть повышена применением в однофазных сетях напряжения 220 В плавких предохранителей вместо автоматических выключателей и применением в качестве дополнительных средств МТЗ устройств, реагирующих не на величину тока сети, а на скорость его нарастания.

Перечень ссылок

1. Сидоренко И.Т. Проектирование электроснабжения горных предприятий: учебное пособие / И.Т. Сидоренко и др. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия. 2021. – 160 с.
2. Маренич, О.К. Управляемая коммутация трансформатора подстанции как фактор эффективности эксплуатации электротехнического комплекса участка шахты: монография /О.К. Маренич, И.В. Ковалёва. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 120 с.
3. А. с. 1377946 СССР, МПК4 H02H3/08. Устройство для защиты трехфазной электроустановки от аварийных режимов / И.Т. Сидоренко, К.Н. Маренич, Б.Д. Борисов (СССР). – № 3989837/24-07; заявл. 17.12.85; опубл. 29.02.88. Бюл. № 8.

УДК 621.311

СОЗДАНИЕ АВТОНОМНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А.В. Сенецкий, В.В. Понуровская, Д.О. Сенецкая

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

г. Москва, Российская Федерация

ОАО «Всероссийский теплотехнический институт»,

г. Москва, Российская Федерация

Решается задача создания автономной климатической системы на основе использования в качестве первичной энергии возобновляемых энергетических ресурсов. В результате разработана и предложена тепловая схема установки, которая позволяет получать низкопотенциальную теплоту (+15°C) для комфортных условий проживания и работы человека.

The problem of creating an autonomous climate system based on the use of renewable energy resources as primary energy is solved. As a result, a thermal scheme of the installation has been developed and proposed, which allows obtaining low-potential heat (+15°C) for comfortable living and working conditions for a person.

Ключевые слова: климатическая система, низкокипящее рабочее тело, тепловая схема, когенерация, термодинамический цикл, холодопроизводительность, возобновляемые источники энергии.

Keywords: climate system, low-boiling working fluid, thermal scheme, cogeneration, thermodynamic cycle, cooling capacity, renewable energy resources.

В связи с повышением средней температуры земной атмосферы возникает вопрос создания комфортных условий жизнедеятельности человека. Особенно это касается районов с жарким климатом, в которых существует проблема пикового потребления электроэнергии для нужд кондиционирования в дневное время суток. Данная проблема характерна для многих стран, расположенных вдоль экваториальной зоны (Индия, Африка и другие). Для таких стран температура в дневное время может достигать 50°C и, соответственно, без кондиционеров обойтись очень сложно. В качестве примера на рисунке 1 представлено здание, на котором расположено множество кондиционеров, которые естественно являются потребителями произведенной на электрических станциях электрической энергии [1]. В связи с этим охлаждение считают одним из главных факторов, влияющих на увеличение спроса на электроэнергию в течение следующих трех десятилетий.

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

По данным Международного Энергетического Агентства, на кондиционирование ежегодно затрачивается ~2000 ТВт·ч электрической энергии, но уже к 2050 году, по предварительным прогнозам, эта величина возрастет до 6200 ТВт·ч [2]. Например, в Саудовской Аравии на кондиционирование приходится около 70% годового спроса на электроэнергию.



Рисунок 1 – Здание в Индии с многочисленным количеством кондиционеров

Распределение потребления мощности климатическими системами кондиционирования помещений по странам показано на рисунке 2.

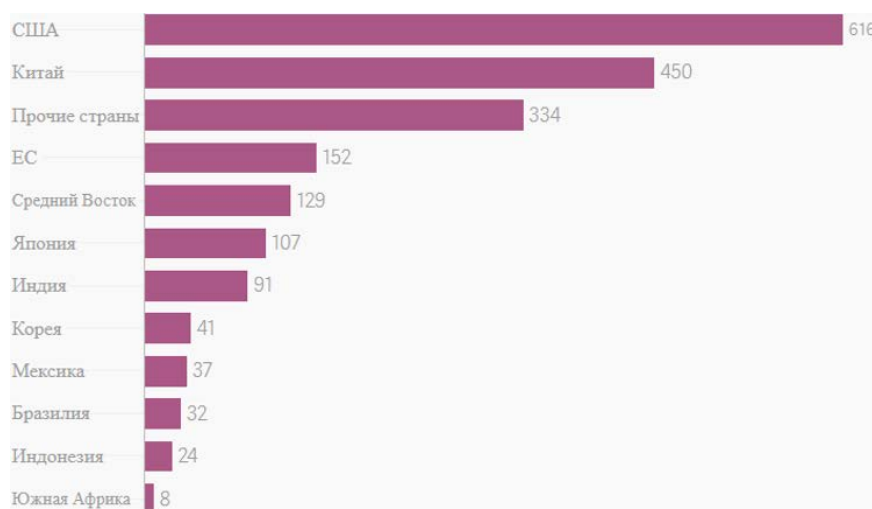


Рисунок 2 – Потребление электроэнергии для охлаждения по странам (тераватт·час)

В связи с этим, создание энергоэффективных децентрализованных систем энергоснабжения [3] и кондиционирования даст возможность снизить нагрузку на электрогенерирующие мощности и электросети, включать климатические системы по мере необходимости и т.д., а также вырабатывать собственную электрическую энергию на децентрализованных когенерационных установках для создания резерва дополнительным системам кондиционирования, потребляющим электроэнергию из сети. Одним из источников первичной энергии может быть солнечное излучение, максимальная мощность которого приходится на пик потребления энергии системами кондиционирования.

Целью исследования является создание двухконтурного термодинамического цикла, который одновременно способен обеспечивать кондиционирование помещений и выработку

электроэнергии на нужды контура охлаждения. В тепловую схему должно входить минимально необходимое количество оборудования.

Поставленная цель достигается путем разработки и предложения автономной двухконтурной (бинарной) установки. В качестве источника теплоты может применяться энергия солнечного излучения, которая позволяет получить необходимые параметры рабочего тела в энергогенерирующей части термодинамического цикла. Установка состоит из одного силового и одного холодильного контура [4, 5].

Практически вся избыточная энергия, полученная в холодильном цикле, передается силовому контуру. Для технической реализуемости такого подхода необходимо использовать рабочие тела с разными термодинамическими свойствами. Что касается кривых насыщения, то

критическая точка
рабочего тела
холодильного контура
должна быть ниже
критической точки
рабочего тела силового
контура и превышать
температуру
окружающей среды.
Такое решение позволит
достичь согласования
мощности прямого и
обратного контуров.
Сжатие хладагента
должно осуществляться
до уровня,
превышающего его
критическое давление.
Рабочие тела: R21
(прямой цикл) и R13B1
(обратный цикл).
Тепловая схема
термодинамического
цикла изображена на
рисунке 3.

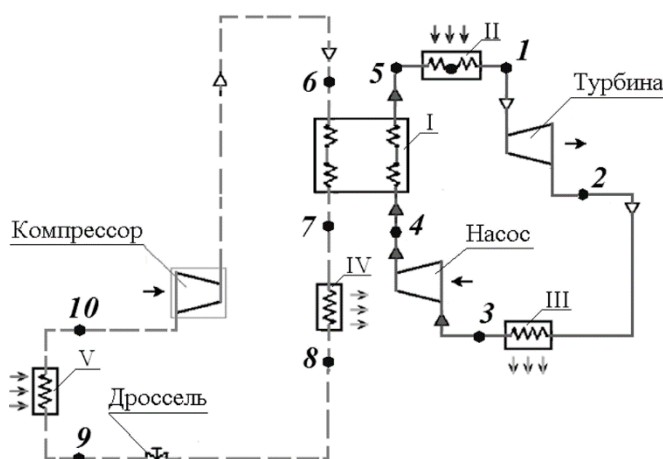


Рисунок 3 – Принципиальная тепловая
схема комбинированной
когенерационной установки: I –
регенеративный теплообменник; II, III –
испаритель и конденсатор силового
цикла, соответственно; IV –
холодильник;
V – испаритель холодильного цикла;
— — — прямой цикл (R21); - - - обратный
цикл (R13B1)

На рисунке 4 изображены реальный прямой 1–2–3–4–5–1 и обратный 6–7–8–9–10–6 циклы бинарной установки в p, h диаграмме с соответствующими рабочими телами.

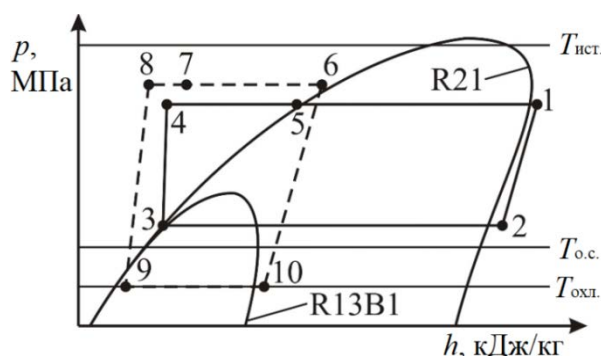


Рисунок 4 – Силовой (R21) и холодильный (R13B1) циклы комбинированной когенерационной установки в p, h диаграмме:
 $T_{ист.}$ – температура источника теплоты, которая активирует охладитель;
 $T_{о.с.}$ – температура окружающей среды; $T_{охл.}$ – температура реализуемой холодопроизводительности; — — — прямой цикл (R21);
 - - - обратный цикл (R13B1)

Необратимость реального теплообмена между внутренними потоками системы и источниками теплоты приводит к потерям энергии. Техническая реализуемость с точки зрения передачи тепловой энергии обеспечивается следующими величинами температурного напора: 50°C – для испарения рабочего тела силового цикла и 10°C – для конденсации рабочего тела и испарения хладагента. Достаточный температурный напор между хладагентом и рабочим телом обеспечивается выбором температуры на выходе из компрессора на 10°C выше температуры испарения рабочего тела.

В качестве исходных данных для проведения расчетных исследований определены следующие характеристики: температура кипения R13B1 – $+10^{\circ}\text{C}$, температура окружающей среды – $+30^{\circ}\text{C}$, холодоснабжение осуществляется воздухом с температурой $+15^{\circ}\text{C}$, расход R13B1 равен $1,0 \text{ кг/с}$, КПД турбины и компрессора приняты равными – 80% (насоса – 70%). Повышение уровня холодопроизводительности в термодинамическом цикле осуществляется за счет применения дополнительного воздушного охладителя (IV).

В таблице 1 показаны полученные значения температуры и давления в выделенных точках тепловой схемы для режима автономной работы системы кондиционирования. Последовательность нумерации точек взята из рисунка 3.

Таблица 1 – Температура и давление в контрольных точках цикла

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Рабочее тело	R21					R13B1				
Давление, МПа	2,1	0,3	0,3	2,1	2,1	8,7	8,7	8,7	1,1	1,1
Температура, $^{\circ}\text{C}$	130	40	40	42	120	138,5	58,4	35	10	10

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем.

Выработка мощности турбиной соответствует мощности, потребляемой компрессором и насосом с учетом их эффективности. Мощность турбины 32,7 кВт, мощность, потребляемая компрессором и насосом равны 31 кВт и 1,7 кВт. При заданных условиях холодопроизводительность составляет 70 кВт с температурой +15°C (с учетом недогрева в поверхностном теплообменнике V). КПД автономной климатической системы составляет 46%.

Выводы

При проведении исследования выполнен выбор рациональной пары рабочих тел для силового и холодильного контуров. Источником исходной тепловой энергии для предложенной автономной климатической системы могут выступать возобновляемые и вторичные энергетические ресурсы. В результате расчетов получено, что механическая мощность силовой части обеспечивает собственные нужды в полном объеме (мощности агрегатов: турбины – 32,7 кВт, компрессора – 31 кВт, насоса – 1,7 кВт.). В результате холодопроизводительность составила 70 кВт с температурой +15°C. Также необходимо отметить, что вариантом создания когенерационной установки может быть увеличение доли производства электрической энергии для собственных нужд объекта (дополнительное подключения климатических систем, бытовые нужды и т.д.).

Перечень ссылок

1. Lundgren-Kownacki K., Dalholm Hornyanszky E., Anh Chu T., Alkan Olsson J., Becker P. Challenges of using air conditioning in an increasingly hot climate // International Journal of Biometeorology, 2018, V. 62. P. 401-412. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1493-z>.
2. Naber H., Junchaya Th., Gibson J. Climate-smart air conditioning has the potential to keep Saudi Arabia cool without heating the planet. Access mode: <https://blogs.worldbank.org/climatechange/climate-smart-air-conditioning-has-potential-keep-saudi-arabia-cool-without-heating>. June 11, 2019. Last access: 20.04.2025.
3. Румянцев М.Ю., Бериллов А.В., Быков А.В. Высокоскоростные синхронные турбогенераторы для автономных мини ТЭЦ, работающих на местном топливе // Материалы 10-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса», г. Донецк, 28-30 мая 2024 г. – Донецк: ДонНТУ, 2024. Т. 1. С. 21-25.
4. Горпинко Ю.И., Сенецкий А.В., Сарапин В.П., Шубенко А.Л., Маляренко В.А. Двухконтурный термодинамический цикл с однонаправленным теплообменом между холодильным и энергетическим циклами // PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE, 2019. № 3 (44). С. 51-64. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3562197>.
5. Шубенко О.Л., Бабак М.Ю., Голощапов В.М., Сенецкий О.В. Дослідження термодинамічних характеристик теплової схеми термотрансформатора охолодження // Тези доповідей XIX Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування», м. Харків, 21-22 грудня 2023 р. – Харків: НТУ «ХПІ», 2023. С. 60-61.

УДК 621.3

**СНИЖЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В
СИСТЕМАХ ЧРП ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ
СУПЕРКОНДЕНСАТОРНЫХ СИСТЕМ**

И.В. Скворцов, Ю.Е. Скворцова, Я.Э. Шклярский
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы
Екатерины II»,
г. Санкт-Петербург

Аннотация.

В процессе работы энергооборудования газоперерабатывающих предприятий регулярно фиксируются нарушения установленных норм качества электроэнергии, приводящие к нарушению непрерывного технологического процесса. Цель исследования – снижение воздействия провалов напряжения на частотно-регулируемые электропривода за счет применения накопителей энергии.

Annotation.

During the operation of power equipment at gas processing plants, deviations from established power quality standards are regularly observed, leading to disruptions in continuous technological processes. The aim of this study is to mitigate the impact of voltage sags on variable frequency drives through the implementation of energy storage systems.

Ключевые слова: Электротехнический комплекс, суперконденсатор, провал напряжения, частотно-регулируемый электропривод.

Keywords: Electrotechnical complex, supercapacitor, voltage sag, variable-frequency drive.

Тренд на повышение эффективности функционирования промышленного оборудования, являющегося частью непрерывного технологического цикла, например, в газовой отрасли, связан с требованием по обеспечению его бесперебойной работы [1]. Больше половины случаев остановов производственных линий вызваны нарушениями показателей качества электроэнергии. В этой связи возникают существенные экономические издержки на перезапуск техпроцесса и недовыпуск продукции. Также стоит отметить, что на современных предприятиях основными потребителями электрической энергии являются электроприводы с частотным регулированием, доля которых может достигать до 70% [2]. Отключение таких электроприводов от сети центрального электроснабжения при провалах и прерываниях напряжения вызвано срабатыванием защиты минимального напряжения, которая уводит привод в режим выбега при

снижении среднеквадратичного значения питающего напряжения до определенной уставки (0,7 от $U_{ном}$).

Технический прогресс в области систем накопления электрической энергии (СНЭЭ) позволяет рассматривать данные технологии, регламентированные новыми стандартами (ГОСТ Р 58092.3.1-2020 и ГОСТ Р 58092.3.3-2023), как одно из перспективных направлений решения данной проблемы. Включение таких систем, реализуемых, например, на суперконденсаторах или литий-ионных аккумуляторах, может осуществляться как непосредственно в звено постоянного тока (ЗПТ) электропривода, так и в ключевые узлы питающей сети [3].

Экономическая эффективность предлагаемого решения находится между потенциальными издержками, вызванными простоем производства и вложениями на разработку и внедрение таких систем накопления электрической энергии. Вследствие этого исследование возможности применения накопителей для обеспечения бесперебойной работы частотно-регулируемого электропривода при возникновении провалов напряжения в питающей сети электроснабжения представляет особый научный и практический интерес.

Выбор системы накопления электрической энергии на основе суперконденсаторов обусловлен тем, что данный тип накопителей энергии способен за доли секунды заряжаться и разряжаться [4]. Таким образом, возникновение провала или прерывания напряжения в питающей электропривод сети нивелируется энергией, отдаваемой системой накопления в привод. Частота возникновения данных нарушений в сети и их длительность соотносится с характеристиками суперконденсаторов, что обеспечивает нормальную работу электроприемнику [5].

Для корректной совместной работы защищаемого электротехнического комплекса и системы накопления электрической энергии на основе суперконденсаторов необходимо определить такие характеристики этих накопителей, которые бы удовлетворяли как технической, так и экономической эффективности применения системы. Для этого была сформирована модель алгоритма выбора номинальных параметров единичных ионисторов, которая учитывает их общие характеристики в составе системы накопления и удовлетворяет заданным требованиям эффективности, указанным ранее. Данный алгоритм можно поделить на две смысловые части. Первая отвечает за ввод необходимых начальных данных, использующихся в расчетах (номинальная мощность электропривода, номинальное напряжение питающей сети, средняя длительность

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем.

провалов и прерываний напряжения, возникающих на рассматриваемом объекте, коэффициент запаса и величина остаточного напряжения, ниже которого производится срабатывание защиты минимального напряжения и отключение электропривода от сети), осуществление необходимых вычислений для получения необходимых параметров, сбор единичных суперконденсаторов с помощью последовательного и параллельного соединения в системы накопления электрической энергии, параметры которой отвечали бы заданным параметрам защищаемого объекта. Первая часть алгоритма выбора параметров завершается тогда, когда в базе данных единичных суперконденсаторов будут использованы все позиции. Вторая часть предлагаемого алгоритма начинается с построения зависимостей количества использованных единичных суперконденсаторов в системе накопления от емкости для разных величин номинального напряжения ионистора. По этим кривым определяется набор тех суперконденсаторов, номинальные параметры которых отвечают технической эффективности функционирования. Для достижения экономической эффективности в данном случае, необходимо из указанного набора выбрать тот, стоимость построения системы накопления из которого минимальна. Таким образом, результатом работы алгоритма становится суперконденсатор из базы данных с определенными номинальными параметрами.

Для анализа совместной работы системы накопления электрической энергии и частотно-регулируемого электропривода при возникновении провалов и прерываний напряжения в питающей сети, была собрана имитационная модель в программе *Matlab Simulink* (рис. 1).

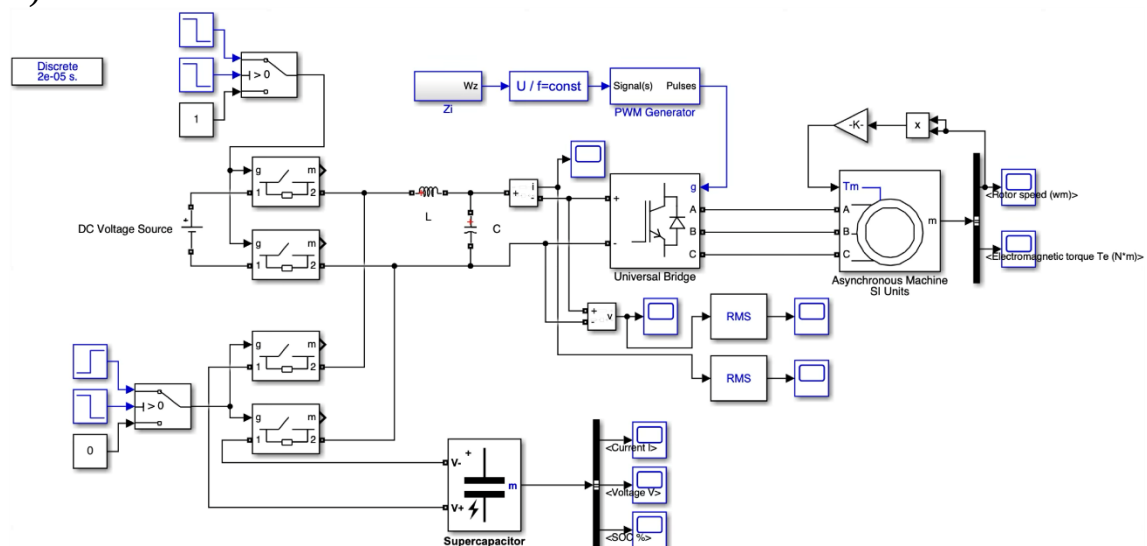


Рис. 1. Имитационная схема ЗПТ ЧРП и СНЭЭ

На рассматриваемой схеме осуществляется подключение СНЭЭ с суперконденсаторами в звено постоянного тока частотно-регулируемого электропривода в момент прерывания напряжения в питающей сети. Таким образом, в процессе моделирования, с 1,5 с. до 4,5 с., т. е. 4 полных секунды, асинхронный электропривод с вентиляторной нагрузкой и скалярным законом управления получает электроэнергию от СНЭЭ. На рисунке 2 (а, б, в) показаны изменяющиеся во времени параметры системы накопления (напряжение, ток и величина остаточного заряда).

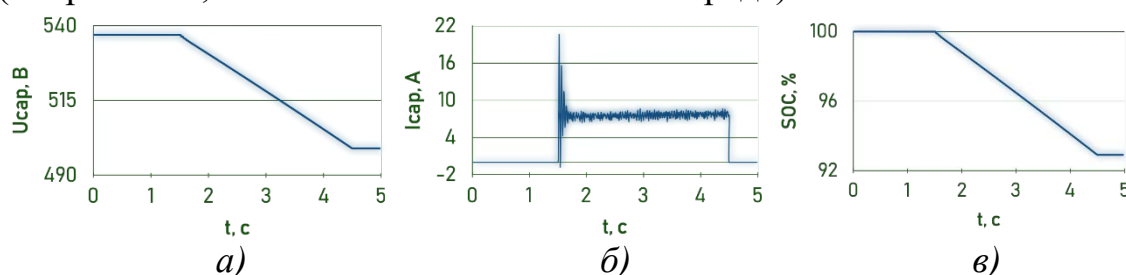


Рис. 2. Графики зависимостей параметров СНЭЭ от времени: а) напряжения; б) тока; в) величины остаточного заряда

Видно, что в течение времени работы СНЭЭ на нагрузку ее разряд составляет не более 8%, импульсы тока в переходном процессе в момент подключения к ЗПТ не превышают максимально допустимых значений, а величина напряжения снижается с 537 В до 495 В.

На рисунке 3 (а, б, в, г) проиллюстрированы изменения основных параметров асинхронного электропривода от времени (скорость вращения, электромагнитный момент, напряжение в ЗПТ, ток в ЗПТ).

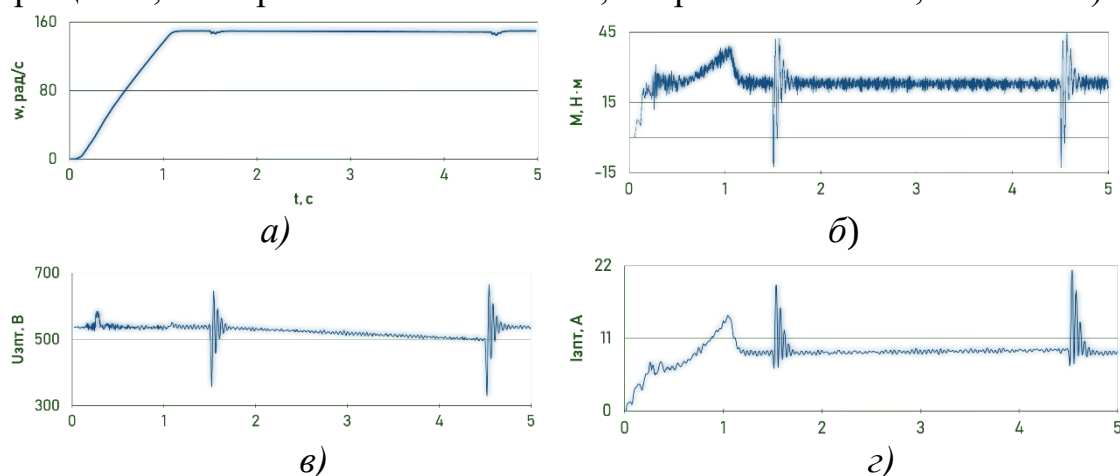


Рис. 3. Графики зависимостей основных параметров ЧРП от времени: а) скорость вращения; б) электромагнитный момент; в) напряжение в ЗПТ; г) ток в ЗПТ

Согласно рисункам 2 и 3, имитационная модель совместной работы СНЭЭ и ЧРП во время возникновения прерывания питающего напряжения работает корректно, электромагнитный момент

асинхронного двигателя принимает номинальное значение как при питании от сети, так и во время работы от системы накопления электроэнергии.

Алгоритм выбора параметров суперконденсаторов для систем накопления электрической энергии, использующихся для работы в качестве резервного питания ответственных ЧРП в моменты возникновения провалов напряжения характеризуется универсальным применением и адаптивностью для различных электротехнических комплексов. Другими словами, область его применения ограничивается лишь сферой применения непосредственно самих суперконденсаторных накопителей.

Перечень ссылок

1. The optimization technique for a hybrid renewable energy system based on solar-hydrogen generation / Ya. Shklyarskiy, I. Skvortsov, T. Sutikno, M. Manap // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2024. – Vol. 15, No. 1. – P. 639. – DOI 10.11591/ijpeds.v15.i1.pp639-650. – EDN GWTZPF.
2. Влияние показателей качества электроэнергии на надежность асинхронных электродвигателей / А. Н. Назарычев, А. Н. Скамьин, А. В. Коптева [и др.] // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : Материалы 94-го заседания Международного научного семинара, Алушта, 19–23 сентября 2022 года / Отв. редактор В.А. Стенников. Том Выпуск 73. – Иркутск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. – С. 61-70. – EDN GALIQH.
3. Evaluating supercapacitor energy storage for voltage sag minimization in a real distribution feeder / M. Khamies, M. Abdel-Salam, A. Kassem [et al.] // Journal of Energy Storage. – 2024. – Vol. 101. – P. 113742. – DOI 10.1016/j.est.2024.113742. – EDN CKKVUM.
4. Dissanayake, K. A review of supercapacitors: Materials, technology, challenges, and renewable energy applications / K. Dissanayake, D. Kularatna-Abeywardana // Journal of Energy Storage. – 2024. – Vol. 96. – P. 112563. – DOI 10.1016/j.est.2024.112563. – EDN TZIAKC.
5. Voltage sag sensitive load type identification based on power quality monitoring data / Zh. Yi, Zh. Liangyu, L. Bijie [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2024. – Vol. 158. – P. 109936. – DOI 10.1016/j.ijepes.2024.109936. – EDN PDFGWP.