

Издаётся Санкт-Петербургским
горным университетом

С 1907 ГОДА

E-ISSN 2541-9404
ISSN 2411-3336

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



ТОМ 261

№ 3 • 2023

ИНДЕКСИРУЕТСЯ
SCOPUS (Q1)
WEB OF SCIENCE (ESCI)

WWW.PMI.SPMI.RU



Научный журнал «Записки Горного института» с 1907 года издается Санкт-Петербургским горным университетом – первым высшим техническим учебным заведением России, основанным в 1773 году Указом Екатерины II как воплощение идей Петра I и М.В.Ломоносова о подготовке инженеров для развития горнозаводского дела.

На базе Санкт-Петербургского горного университета работает Международный центр компетенций в горнотехническом образовании под эгидой ЮНЕСКО, способствующий активному взаимодействию журнала с международным научным сообществом.

Цель журнала – создание информационного пространства, в котором отечественные и зарубежные ученые смогут представить результаты теоретических и эмпирических исследований, посвященных проблемам минерально-сырьевого комплекса. Журнал привлекает ведущих специалистов к публикации научных статей и содействует их продвижению в международное научное пространство.

Публикуемые статьи освещают вопросы геологии, геотехнологии и инженерной геологии, горного и нефтегазового дела, обогащения, энергетики, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности, экономики сырьевых отраслей.

Журнал индексируется Scopus (Q1), Web of Science Core Collection (ESCI), DOAJ Seal, RSCI, GeoRef, Google Scholar, РИНЦ, входит в белый список Министерства образования и науки РФ, приравнен к журналам из перечня ВАК категории К1.

Журнал выходит 6 раз в год. Средний срок до первого решения – 1 месяц.

Статьи публикуются на безвозмездной основе. Перевод предоставляется автором.

На обложке экспонат Горного музея – вольфрамит – сросток досчатых черных кристаллов со штриховкой, включающий призматические прозрачные скрипетровидные кристаллы кварца (Караобинское месторождение, Карагандинская обл., Казахстан). Поступил в Горный музей в 1981 г. Вольфрамит – руда вольфрама, используется при производстве сталей, для получения термостойких материалов, изготовлении быстрорежущих инструментов, специальных коронок для бурения скважин. Применяется в черной металлургии, электротехнике, химической промышленности и других отраслях.

Горный музей – третья в мире по величине естественно-научная экспозиция, имеет более 230 тысяч экспонатов, среди которых драгоценные металлы и камни, уникальные коллекции минералов, руд, горных пород, палеонтологических остатков, метеоритов, собрание моделей и макетов горной и горнозаводской техники, изделия камнерезного и ювелирного искусства.

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА



РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2411-3336
e-ISSN 2541-9404

Том 261

Издается с 1907 года

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • 2023

Учредитель Санкт-Петербургский горный университет

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

В.С.Литвиненко, д-р техн. наук, профессор, академик Международной академии наук высшей школы, РАЕН, РАГН, МАНЭБ, ректор (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

С.Г.Скублов, д-р геол.-минерал. наук, доцент, член Российского минералогического общества, эксперт Российского научного фонда и РАН (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

С.В.Синявина, канд. техн. наук, директор издательского дома «Записки Горного института» (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

О.Е.Аксютин, д-р техн. наук, чл.-кор. РАН, член правления, начальник департамента (ПАО «Газпром», Москва, Россия)

А.А.Баряж, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, директор (Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь, Россия)

В.Н.Бричкин, д-р техн. наук, проректор по подготовке научных кадров (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

С.Г.Гендлер, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, зав. кафедрой безопасности производства (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

О.М.Ермилов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, РАГН, зам. главного инженера по науке (ООО «Газпром добыча Надым» ПАО «Газпром», Надым, Россия)

В.П.Зубов, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

Г.Б.Клейнер, д-р экон. наук, профессор, чл.-кор. РАН, заместитель директора (Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия)

А.В.Козлов, д-р геол.-минерал. наук, член Российского минералогического общества, зав. кафедрой геологии и разведки месторождений полезных ископаемых (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

Ю.Б.Марин, д-р геол.-минерал. наук, профессор, чл.-кор. РАН, президент (Российское минералогическое общество, Санкт-Петербург, Россия)

В.А.Моренов, канд. техн. наук, доцент (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

М.А.Пашкевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой геоэкологии (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

Т.В.Пономаренко, д-р экон. наук, профессор, доцент (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

О.М.Прищепа, д-р геол.-минерал. наук, академик РАЕН, зав. кафедрой геологии нефти и газа (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

А.Г.Протосеня, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительства горных предприятий и подземных сооружений (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

В.Е.Сомов, д-р экон. наук, канд. техн. наук, академик РАЕН, директор (ООО «Кинеф», Кириши, Россия)

А.А.Тронин, д-р геол.-минерал. наук, директор (Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, Россия)

В.Л.Трушко, д-р техн. наук, профессор, академик Международной академии наук высшей школы, РАЕН, РАГН, МАНЭБ, зав. кафедрой механики (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

П.С.Цветков, канд. экон. наук, начальник управления по публикационной деятельности (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

А.Е.Череповицын, д-р экон. наук, профессор, зав. кафедрой экономики, организации и управления (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

Я.Э.Шклярский, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой общей электротехники (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

В.А.Шпенст, д-р техн. наук, профессор, декан энергетического факультета (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

Олег Анцуткин, профессор (Технологический университет, Лулео, Швеция)

Габриэль Вейсс, д-р наук, профессор, проректор по научной и исследовательской деятельности (Технический университет, Кошице, Словакия)

Хал Гургенчи, профессор (Школа горного машиностроения Квинслендского университета, Брисбен, Австралия)

Эдвин Кроке, д-р наук, профессор (Институт неорганической химии Фрайбергской горной академии, Фрайберг, Германия)

Чжоу Фубао, д-р наук, профессор, вице-президент (Китайский горно-технологический университет, Пекин, Китай)

Чжао Юэмин, д-р наук, профессор, директор научного комитета (Китайский горно-технологический университет, Пекин, Китай)

Ответственные научные редакторы тома: д-р техн. наук Я.Э.Шклярский, канд. техн. наук. А.Н.Скамын (Санкт-Петербургский горный университет),
д-р техн. наук М.Хименес Карриоза (Мадридский политехнический университет)

Разделы

•Геология •Геотехнология и инженерная геология •Экономика сырьевых отраслей •Энергетика

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-70453 от 20.07.2017

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.02

Редакция: начальник РИЦ В.Л.Лебедев, редакторы Е.С.Дрибинская, М.Г.Хачирова, В.Е.Филиппова, Л.В.Набиева, М.В.Скворцова

Компьютерная верстка Н.Н.Седых, В.И.Каширина

© Санкт-Петербургский горный университет, 2023

Подписано к печати 19.07.2023. Формат 60 × 84/8. Уч.-изд.л. 40.

Тираж 300 экз. Заказ 554. Отпечатано в РИЦ СПГУ.

Цена свободная.

Адрес учредителя и редакции: 21-я линия, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106

Тел. +7 (812) 328-8416; факс +7 (812) 327-7359;

E-mail: pmi@spmi.ru

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Шклярский Я.Э., Скамын А.Н., Хименес Карризоса М. Слово редактора. Энергоэффективность в минерально-сырьевом комплексе	323
---	-----

Энергоэффективность электропривода в МСК

Ганзуленко О.Ю., Петкова А.П. Энергоэффективность линейного реечного привода штанговых глубинных насосов.....	325
--	-----

Ериков М.С., Комков А.Н., Феоктистов Е.А. Комплексная модель регулируемого электропривода ротора буровой установки.....	339
--	-----

Шишилянников Д.И., Зверев В.Ю., Звонарева А.Г., Фролов С.А., Иванченко А.А. Оценка энергоэффективности функционирования и увеличение наработки гидравлических приводов установок штанговых скважинных насосов в осложненных условиях эксплуатации	349
--	-----

Назарычев А.Н., Дяченок Г.В., Сычев Ю.А. Исследование надежности тягового электропривода карьерных самосвалов на основе анализа отказов его функциональных узлов	363
---	-----

Рахутин М.Г., Занг Куок Кхань, Кривенко А.Е., Чан Ван Хиен. Оценка влияния температуры рабочей жидкости на потери мощности карьерного гидравлического экскаватора	374
--	-----

Энергоэффективность промышленных установок и предприятий в МСК

Бажин В.Ю., Устинова Я.В., Федоров С.Н., Шалаби М.Э.Х. Повышение энергетической эффективности руднотермических печей при плавке алюмокремниевого сырья	384
---	-----

Клюев Р.В., Моргоева А.Д., Гаврина О.А., Босиков И.И., Моргоев И.Д. Прогнозирование планового потребления электроэнергии для объединенной энергосистемы с помощью машинного обучения	392
---	-----

Николаев А.В., Фёт Ш., Кычкин А.В. Использование кибернетического подхода к ценозависимому управлению спросом на потребляемую подземным горно-добывающим предприятием электроэнергию.....	403
--	-----

Юшкова Е.А., Лебедев В.А. Повышение энергоэффективности вакуумной установки перегонки мазута с помощью пинч-анализа.....	415
---	-----

Качество электроэнергии и возобновляемые источники в МСК

Завьялов В.М., Семыкина И.Ю., Дубков Е.А., Велиляев А.С. Система беспроводного заряда аккумуляторов для рудничного электровоза.....	428
--	-----

Скамын А.Н., Добуши В.С., Жопри М.Х. Определение сопротивления электрической сети при расчете режимов с искажениями в напряжении.....	443
--	-----

Непиша Ф.С., Варнавский К.А., Воронин В.А., Заславский И.С., Ливен А.С. Перспективы применения генерации на возобновляемых источниках энергии на угледобывающих предприятиях	455
---	-----

Автономные системы энергоснабжения в МСК

Червонченко С.С., Фролов В.Я. Повышение энергоэффективности автономной системы электроснабжения буровой установки при провалах напряжения	470
--	-----

Шпенст В.А., Бельский А.А., Орел Е.А. Повышение энергоэффективности автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии на основании адаптивной регулировки режимов работы	479
---	-----



Слово редактора

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ

Энергоэффективность и энергосбережение во все времена и особенно на современном этапе развития промышленности и экономики играли чрезвычайно важную роль. Независимо от того, какие страны и по каким критериям строят планы развития энергетики, энергоэффективность и энергосбережение всегда находятся в приоритете. В полной мере это относится и к минерально-сырьевому комплексу, в котором потребление энергии в целом составляет большую долю от общего потребления. Добываемые в минерально-сырьевом комплексе ресурсы сами являются источником энергии. Энергетика развивается разнопланово. Множество научных работ, результаты которых отражены в публикациях, подтверждают актуальность исследований в области энергоэффективности. Но подход к отдельным решениям в минерально-сырьевой отрасли носит специфический характер и достоин отдельного рассмотрения. В последнее время большое внимание уделяется «зеленой энергетике» и возобновляемым источникам энергии. Однако энергоэффективность в области традиционной генерации и потребления остается проблемой актуальной и решение ее находится в постоянном развитии. Одним из основных направлений повышения энергоэффективности является разработка автономных систем электро- и теплоэнергетики. Все эти проблемы отражены в специальном томе Записок Горного института, статьи разделены на четыре раздела: энергоэффективность электропривода в МСК; энергоэффективность промышленных установок и предприятий в МСК; качество электроэнергии и возобновляемые источники в МСК; автономные системы электроснабжения в МСК. Представленные статьи содержат ценный материал с точки зрения науки и практики и могут лежать в основу дальнейших исследований в области энергоэффективности.

Решению вопросов по энергоэффективности электропривода посвящен ряд статей. В статье *О.Ю.Ганзуленко и А.П.Петковой* ([EDN HIGAOE](#)) приведены результаты применения линейного реечного привода в составе привода штанговых глубинных насосов разработанной авторами конструкции, что позволяет уменьшить энергозатраты при добыче нефти в виде существенного увеличения КПД до 10 %. Статья *М.С.Еришова, А.Н.Комкова и Е.А.Феоктистова* ([EDN YEEWZJ](#)) посвящена созданию оригинальной математической модели системы асинхронный электропривод – колонка бурильных труб – долото – горная порода. Ценность исследований заключается в создании корректной модели, которая позволяет рассчитать энергоэффективность различных режимов бурения при существующем составе электротехнического комплекса. Статья *Д.И.Шишилянникова, А.Г.Звонаревой* и др. ([EDN XLRCWN](#)) посвящена необходимости совершенствования привода штанговых скважинных насосов, эксплуатирующихся в условиях малодебитных и осложненных скважин в нефтедобыче. Предложены решения по повышению энергоэффективности гидравлических приводов штанговых скважинных насосов. Одним из важнейших факторов эффективной работы горно-обогатительного комбината является надежная работа карьерных самосвалов. В статье *А.Н.Назарычева, Г.В.Дяченок и Ю.А.Сычева* ([EDN HCLPJB](#)) определены основные механические внешние воздействия, определяющие степень возможных дефектов в электроприводе самосвала. Авторами предложены практические рекомендации по увеличению надежности работы отдельных узлов электропривода, что связано с энергоэффективностью в системе затрат на добычу и транспортировку полезного ископаемого. В статье *М.Г.Рахутина* и др. ([EDN OKWKUF](#)) исследуется влияние температуры рабочей жидкости на потери карьерного гидравлического экскаватора на примере экскаватора Komatsu PC750-7. На основе применения критерия оценки потерь мощности предлагается обоснованно выбирать тип рабочей жидкости и режимы работы гидросистемы.

Тема энергоэффективности установок и предприятий представлена несколькими статьями. Статья *В.Ю.Бажина* и др. ([EDN RTQXSE](#)) посвящена результатам теоретического и экспериментального исследований процесса плавки алюмосиликатного сырья. Исследования направлены на создание алгоритма управления технологическим процессом. Статья *Р.В.Клюева* и др. ([EDN FJGZTV](#))

рассматривает прогнозирование планового потребления электроэнергии на любом этапе электроснабжения. В статье представлен новый подход к теме прогнозирования нагрузки, в частности на предприятиях МСК, предложено применение ансамблевых методов обучения, а также модели рекуррентной нейронной сети. В статье *А.В.Николаева, Ш.Фёта и А.В.Кычкина* ([EDN CJGQKP](#)) приведена кибернетическая модель управления спросом на электроэнергию на примере главной вентиляторной установки. Модель реализуется на платформе Интернета вещей и позволяет заблаговременно определять затраты на электроэнергию, вызванные работой главной вентиляторной установки. Статья *Е.А.Юшковой и В.А.Лебедева* ([EDN LXDVDP](#)) представляет оригинальное решение проблемы энергоэффективности вакуумной установки перегонки мазута с помощью пинч-анализа. В работе определена оптимальная потоковая теплоемкость установки, при которой обеспечивается увеличение ее КПД.

В разделе, посвященном улучшению качества электроэнергии и развитию применения возобновляемых источников и аккумулирующих устройств, статья *В.М.Завьялова и др.* ([EDN JSNTAQ](#)) представляет оригинальное решение вопроса заряда аккумуляторных установок рудничного электровоза и имеет практический интерес. Статья *А.Н.Скамына и др.* ([EDN LPAYJO](#)) посвящена нерешенной проблеме определения питающей сети не расчетным, а опытным путем, материал статьи является большим шагом к достижению поставленной цели. В статье *Ф.С.Непии и др.* ([EDN LNSCEY](#)) предложен оригинальный подход к решению проблемы применения возобновляемых источников энергии в горно-добывающей промышленности.

Особо следует выделить раздел, посвященный автономным системам энергоснабжения, при внедрении которых возникают нерешенные задачи. Статья *С.С.Червонченко и В.Я.Фролова* ([EDN MGAPVA](#)) посвящена решению актуальной задачи по обеспечению надежности электропитания удаленных потребителей. При аварийных режимах предлагается применение аккумуляторных батарей. В статье *В.А.Шпенста и др.* ([EDN SNUKNA](#)) предложен алгоритм работы автономного электротехнического комплекса с адаптивным регулированием с учетом режима потребления электроэнергии и аварийных ситуаций.

*Ответственные научные редакторы тома: д-р техн. наук Я.Э.Шклярский,
канд. техн. наук А.Н.Скамын, д-р техн. наук М.Хименес Карризоса*



Научная статья

Энергоэффективность линейного речного привода штанговых глубинных насосов

О.Ю.ГАНЗУЛЕНКО✉, А.П.ПЕТКОВА

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Ганзуленко О.Ю., Петкова А.П. Энергоэффективность линейного речного привода штанговых глубинных насосов // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 325-338. EDN HIGAOE

Аннотация. В настоящее время для повышения объемов нефтедобычи и снижения экономических издержек при разработке низкодебитных месторождений актуальна разработка кустовым способом с использованием компактных мобильных приводов штанговых глубинных насосов (ШГН). Целью работы является анализ путей повышения энергоэффективности ШГН за счет снижения потерь механической и электрической энергии, выбор наиболее энергоэффективного компактного привода для разработки низкодебитных месторождений кустовым способом, кинематические и прочностные расчеты привода выбранного типоразмера, разработка адаптивной системы управления группой приводов при кустовой разработке скважин. По результатам выполненных расчетов наибольшим КПД механизма привода обладает линейный речный привод. Приведены кинематические и прочностные расчеты линейного речного привода с длиной хода 1120 мм и нагрузкой до 8 т. Показано, что применение систем прямого управления моментом и накопления кинетической энергии элементов привода ШГН и колонны штоков является эффективным средством снижения энергозатрат при добыче нефти из низкодебитных месторождений. Применение разработанной системы запаса и перераспределения потенциальной энергии штоков между ШГН, осуществляющими подъем нефти, позволило устраниить колебания потребляемой мощности, снизить ее пиковое значение в три раза, пиковое значение потребляемого из сети тока в два раза, уменьшить потери во входном преобразователе и кабелях в три раза.

Ключевые слова: энергоэффективность; низкодебитные месторождения; балансирный станок-качалка; цепной вертикальный привод; гидравлический привод; линейный речный привод; КПД

Поступила: 15.03.2023

Принята: 20.06.2023

Онлайн: 19.07.2023

Опубликована: 19.07.2023

Введение. На протяжении долгого времени нефтегазовая отрасль оставалась одним из приоритетнейших направлений в экономическом и промышленном секторе России [1-3]. Для поддержания стабильного роста добычи углеводородных ресурсов необходимо как освоение новых месторождений, так и создание новых и совершенствование уже существующих технологий извлечения нефти. Однако с каждым годом поддерживать такой рост труднее, старые месторождения истощаются и требуют все более сложное и дорогостоящее оборудование для поддержания процесса добычи, а открытие новых месторождений с легкоизвлекаемыми запасами сокращается [4-6]. Поэтому большое внимание привлекают месторождения с трудноизвлекаемыми запасами (ТРИЗ). Согласно актуальным данным доля ТРИЗ в общем запасе нефти на май 2022 г. превысила 66 % [7], что говорит об их высокой значимости в энергетическом балансе страны. ТРИЗ можно разделить на следующие группы: высоковязкие нефти [8-10]; малопроницаемые и низкопористые коллектора [4, 11, 12]; истощенные месторождения [5, 13, 14]; отдаленно расположенные месторождения [3, 15, 16]; низкопродуктивные пласти [17-19]. Последние пользуются большой популярностью в России в связи с наличием больших запасов нефти и более удобным географическим расположением [20].

Для повышения объемов нефтедобычи и снижения экономических издержек разработка месторождений осуществляется кустовым способом [21-23]. Кустовая разработка не является решением проблемы вследствие применения штанговых глубинных насосов (ШГН), в которых

в качестве приводов используют балансирные и безбалансирные станки-качалки (С-К), малопригодные в разработке низкодебитных месторождений [24]. Рассмотрим и проанализируем методы повышения энергоэффективности разработок низкодебитных месторождений.

Применяемые в настоящее время в нефтедобыче механические приводы ШГН подразделяются на балансирные и безбалансирные. В балансирных приводах (С-К) возвратно-поступательное перемещение точки подвеса штанг осуществляется качающегося рычага – балансира, соединенного кривошипно-шатунным механизмом (КШМ) с валом трансмиссии [25]. В безбалансирных приводах возвратно-поступательное перемещение точки подвеса штанг осуществляется механизмами с использованием гибких элементов (цепей или канатов) [26]. Также известны гидравлические и линейные безредукторные приводы ШГН, приводы на основе линейных двигателей, линейные приводы на основе систем зубчатое колесо – рейка и ходовой винт – гайка [27, 28]. Очевидно, что КПД механизма зависит от уровня потерь в элементах конструкции привода и его кинематической схемы [26, 29, 30].

Штанговый глубинный насос получает механическую энергию от колонны штанг, совершающей возвратно-поступательное движение, которое сообщает ей привод насосной установки. Он преобразует электрическую энергию, подводимую к электродвигателю привода, в механическую. Таким образом, энергоэффективность работы ШГН напрямую зависит от величины потерь электрической и механической энергии в различных элементах конструкции привода. К основным следует отнести потери в механизме привода ШГН и электрические потери в двигателе привода и пуско-регулирующем оборудовании.

Потребляемая приводом электроэнергия существенно зависит от колебаний мощности в цикле работы электродвигателя привода. Так, при работе С-К возникают существенные колебания потребляемой мощности, меняющейся в семь раз за один цикл работы насоса. Для используемых в качестве приводного двигателя асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором скачки мощности приводят не только к значительным перепадам напряжения в энергосистеме, но и к температурным и механическим перегрузкам двигателя.

Применение реверсивных реечного линейного и цепного приводов приводит к дополнительным потерям в двигателе и в пускорегулирующем оборудовании при его пуске. Для снижения этих потерь в системе управления электродвигателем привода необходимо использовать преобразователи частоты и энергоэффективные алгоритмы управления. Кроме частотного управления двигателем, при совместной работе нескольких приводов насосов при кустовой разработке скважин можно использовать кинетическую энергию движущегося вниз штока при подъеме нефти [27]. Таким образом, энергоэффективность привода ШГН определяется потерями механической и электрической энергии в процессе эксплуатации.

Целью работы является анализ путей повышения энергоэффективности штанговых глубинных насосов за счет снижения потерь механической и электрической энергии, выбор наиболее энергоэффективного компактного привода для разработки низкодебитных месторождений кустовым способом, кинематические и прочностные расчеты привода выбранного типоразмера, разработка адаптивной системы управления группой приводов при кустовой разработке скважин.

Методы и материалы. Методология работы включает следующие этапы:

- выбор компактного привода для низкодебитных месторождений с наибольшим КПД механизма привода;
- кинематические расчеты привода выбранного типоразмера, позволяющие определить параметры зубчатой передачи и предельно допустимые нагрузки и ограничения в скорости перемещения рейки (числе двойных ходов) для выбранного мотор-редуктора;
- прочностные расчеты на изгиб зубьев вал-шестерни, позволяющие выбрать материал и способ термической обработки вал-шестерни и зубчатой рейки и поверхностного упрочнения зубьев, выдерживающие нагрузку на шток до 80 кН;
- определение последовательности изготовления деталей и сборки привода, позволяющей изготовить разработанный привод с нагрузкой на шток до 80 кН;
- разработка адаптивной системы управления (САУ) группой приводов на кусте скважин с системой рекуперации энергии движущегося вниз штока, позволяющей снизить энергопотребление приводов регулированием числа двойных ходов и хода штока.



Оценка потерь механической энергии в приводах различной конструкции выполняется при помощи расчета их КПД.

Расчет КПД механизма приводов ШГН. Выполнено сравнение приводов ШГН: на основе балансирного станка-качалки, цепного вертикального привода конструкции РНТЦ ВНИИнефть [25], разработанного в рамках настоящей работы линейного привода на основе системы рейка – зубчатое колесо, привода на основе системы винт – гайка, а также гидравлического привода.

Для сопоставительного анализа КПД механической части приводов используем известные данные. Для расчета КПД механизма привода в качестве входной мощности будем рассматривать механическую мощность приводного двигателя, а в качестве выходной – механическую мощность, передаваемую полированному штоку. КПД привода равен произведению КПД его составляющих.

Кинематическая схема станка-качалки приведена на рис.1, а [30]. В его состав входят: головка балансира (1); балансир, расположенный на паре подшипников скольжения (2); шатун-кривошип (3); опора шатуна-кривошипа (4); клиноременная передача (5, 6); трехступенчатый редуктор (7), состоящий из трех пар цилиндрических зубчатых колес на подшипниках качения (8, 10, 11); кривошипно-шатунный механизм (9), состоящий из пар скольжения шатун-балансир.

КПД станка-качалки оценим по формуле

$$\eta_{CK} = \eta_{MM} \eta_{KRP} (\eta_{PK} \eta_{DZP})^k \eta_{KSH} \eta_{PS},$$

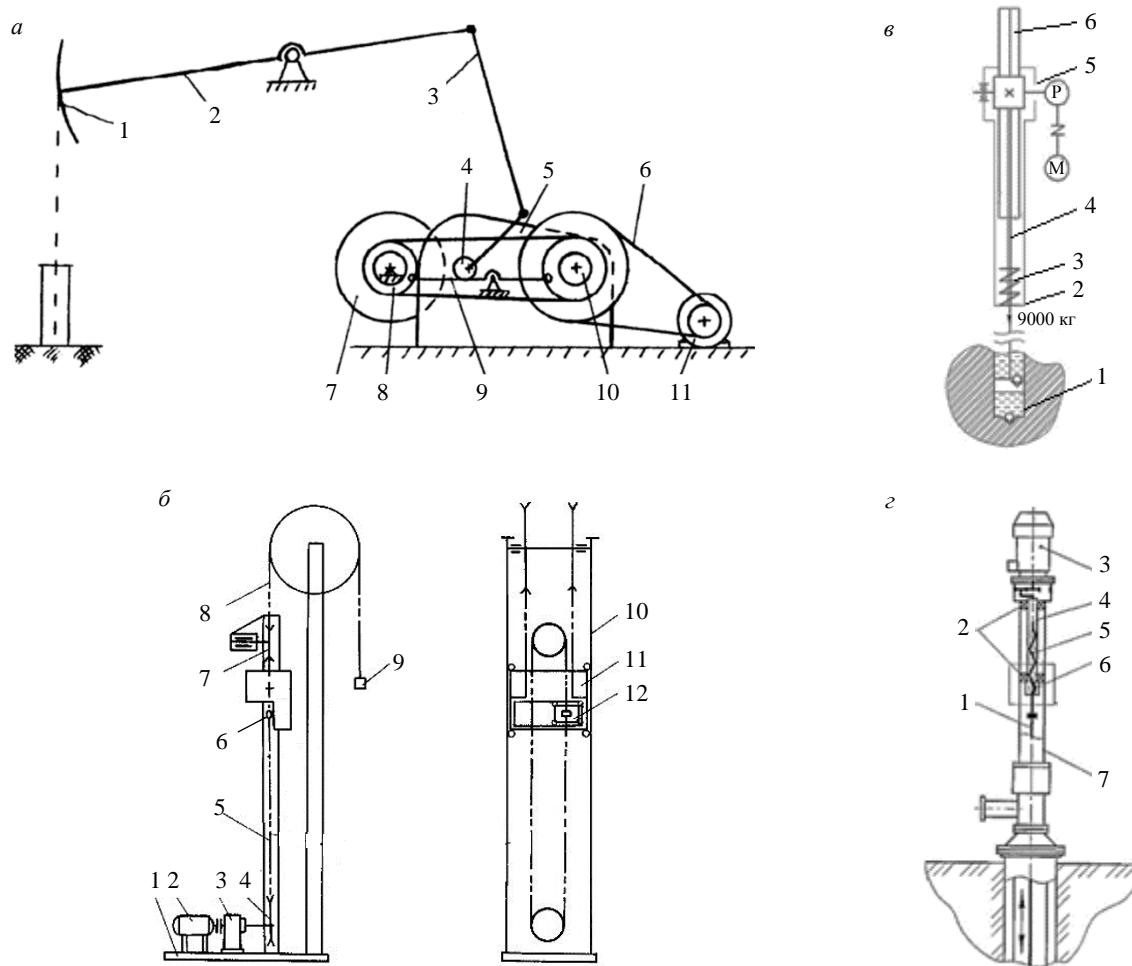


Рис.1. Кинематическая схема балансирного станка-качалки (а), привода с подвижной кареткой (б), разработанного линейного реечного привода ШГН (в), привода с ходовым винтом без реверсирования приводного двигателя (г)



где $\eta_{\text{ММ}}$ – КПД механической муфты, $\eta_{\text{ММ}} = 0,98$; $\eta_{\text{КРП}}$ – КПД клиноременной передачи, $\eta_{\text{КРП}} = 0,96$; $\eta_{\text{ПК}}$ – КПД подшипников качения, $\eta_{\text{ПК}} = 0,992$; $\eta_{\text{ЦЗП}}$ – КПД цилиндрической зубчатой передачи, $\eta_{\text{ЦЗП}} = 0,97$; k – число ступеней редуктора, $k = 3$; $\eta_{\text{КШМ}}$ – КПД кривошипно-шатунного механизма, $\eta_{\text{КШМ}} = 0,98$; $\eta_{\text{ПС}}$ – КПД подшипников скольжения, $\eta_{\text{ПС}} = 0,985^*$. После подстановки приведенных средних значений получим:

$$\eta_{\text{СК}} = 0,98 \cdot 0,96 \cdot (0,992 \cdot 0,97)^3 \cdot 0,98 \cdot 0,99 = 0,81,$$

что хорошо согласуется с данными 0,80-0,85*.

Кинематическая схема цепного привода ШГН конструкции [25] представлена на рис.1, б: 1 – рама; 2 – электродвигатель; 3 – редуктор; 4 – ведущий шкив; 5 – непрерывное гибкое звено (цепь); 6 – узел крепления; 7 – направляющий элемент; 8 – разомкнутое гибкое звено (цепь или тросы); 9 – колонна штанг; 10 – стойка; 11 – противовес; 12 – каретка. Привод включает в себя механическую муфту, одноступенчатый редуктор, цепную передачу, пару трения направляющий элемент – каретка, два подшипника качения, являющихся опорой ведущего шкива.

Формула для расчета КПД цепного привода имеет вид [25]:

$$\eta_{\text{ЦС}} = \eta_{\text{ММ}} \left(\eta_{\text{ПК}} \eta_{\text{ЦЗП}} \right)^k \eta_{\text{ЦП}} \eta_{\text{ПС}} \eta_{\text{ПК}},$$

где $\eta_{\text{ММ}}$ – КПД механической муфты, $\eta_{\text{ММ}} = 0,98$; $\eta_{\text{ПК}}$ – КПД подшипников качения, $\eta_{\text{ПК}} = 0,992$; $\eta_{\text{ЦЗП}}$ – КПД цилиндрической зубчатой передачи, $\eta_{\text{ЦЗП}} = 0,97$; $\eta_{\text{ЦП}}$ – КПД цепной передачи открытого исполнения, $\eta_{\text{ЦП}} = 0,92$; $\eta_{\text{ПС}}$ – КПД подшипников скольжения, $\eta_{\text{ПС}} = 0,985$.

После подстановки значений получим:

$$\eta_{\text{ЦС}} = 0,98 \cdot (0,97 \cdot 0,992)^1 \cdot 0,92 \cdot 0,985 \cdot 0,992 = 0,848.$$

Кинематическая схема разработанного линейного реечного привода представлена на рис.1, в [31]. Привод содержит конический редуктор КАЗ-97 фирмы SEW EURODRIVE, систему рейка – зубчатое колесо, опирающуюся на подшипник качения, подшипник редуктора (1 – основание-опора; 2 – демпфер; 3 – корпус; 4 – рейка; 5 – механизм с редуктором и электродвигателем; 6 – крышка-направляющая).

Формула для расчета КПД линейного реечного привода имеет вид [30]:

$$\eta_{\text{ЛРП}} = \eta_{\text{КР}} \eta_{\text{ПК}} \eta_{\text{ЦЗП}},$$

где $\eta_{\text{КР}}$ – КПД конического редуктора, $\eta_{\text{КР}} = 0,965$; $\eta_{\text{ПК}}$ – КПД подшипников качения, $\eta_{\text{ПК}} = 0,992$; $\eta_{\text{ЦЗП}}$ – КПД цилиндрической зубчатой передачи, $\eta_{\text{ЦЗП}} = 0,97$ [25].

После подстановки значений получим:

$$\eta_{\text{ЛРП}} = 0,965 \cdot 0,97 \cdot 0,992 = 0,93.$$

Конструкция привода на основе системы ходовой винт – гайка без реверсирования приводного двигателя представлена на рис.1, г [27]: 1 – штанга; 2 – подшипник; 3 – мотор-редуктор; 4 – ведомый вал; 5 – ходовой винт; 6 – гайка; 7 – опора.

Формула для расчета КПД передачи ходовой винт – гайка имеет вид [32]:

$$\eta_{\text{ХВГ}} = \eta_{\text{ПР}} \eta_{\text{ПК}} \eta_{\text{ВГ}},$$

где $\eta_{\text{ПР}}$ – КПД планетарного редуктора, $\eta_{\text{ПР}} = 0,96$; $\eta_{\text{ПК}}$ – КПД подшипников качения, $\eta_{\text{ПК}} = 0,992$; $\eta_{\text{ВГ}}$ – КПД ролико-винтовой передачи, $\eta_{\text{ВГ}} = 0,89$ [33].

После подстановки значений получим:

$$\eta_{\text{ХВГ}} = 0,96 \cdot 0,89 \cdot 0,992 = 0,85.$$

* Детали машин. URL: <http://www.detalmach.ru/lect22.htm?ysclid=ley83k1mnn254975055> (дата обращения 22.05.2023).



КПД гидравлического привода ШГН зависит от применяемой гидравлической схемы и от уровня утечек. Ввиду сложности применяемых методик для сравнительной оценки используем известные значения $\eta_{\text{ГП}} = 0,91\text{--}0,75$ в зависимости от уровня утечек [34].

На основе проведенных расчетов выбираем линейный реечный привод, имеющий наибольший КПД среди аналогов.

Далее для выбранного типоразмера линейного реечного привода с длиной хода 1120 мм и нагрузкой до 80 кН выполнен кинематический расчет, позволяющий определить параметры зубчатой передачи и предельно допустимые нагрузки и ограничения в скорости перемещения рейки (числе двойных ходов) для выбранного мотор-редуктора.

Кинематический расчет привода. Для расчетов используются максимальная длина хода рейки ($L_0 = 1120$ мм), максимальная скорость движения рейки и нагрузки, действующие на шток ($F = 60$ и 80 кН). Кинематический расчет позволяет определить линейную скорость перемещения рейки, число двойных ходов в минуту, выбрать диаметр ведущей шестерни, передаточное отношение передачи зубчатое колесо – рейка, произвести подбор мотор-редуктора.

Окружная скорость вращения шестерни равна линейной скорости перемещения рейки [33]:

$$V_{\text{ш}} = V_0 = \frac{\pi D n}{1000}, \quad (1)$$

где D – диаметр шестерни, мм; n – частота вращения шестерни, мин⁻¹.

Выбираем модуль зуба зубчатого колеса шестерни $m = 8$ мм. С целью уменьшения крутящего момента число зубьев берется минимально возможным $Z = 14$.

Диаметр шестерни рассчитывается по формуле [33]

$$D = mZ = 8 \cdot 14 = 112. \quad (2)$$

Частота вращения шестерни определяется из формулы (1):

$$n = \frac{V_0 \cdot 1000}{\pi D}. \quad (3)$$

Согласно имеющимся для ШГН экспериментальным данным, скорость перемещения штока составляет от 0,25 до 0,5 м/с или от 15 до 30 м/мин.

Линейная скорость перемещения штока (рейки) определяется по формуле [33]

$$V_0 = \frac{2L_0 n_{\text{дх}}}{1000}, \quad (4)$$

где L_0 – длина хода рейки; $n_{\text{дх}}$ – число двойных ходов в минуту,

$$n_{\text{дх}} = \frac{V_0 \cdot 1000}{2L_0}. \quad (5)$$

Для скоростей перемещения рейки в диапазоне 0,25–0,5 м/с определим число двойных ходов в минуту (табл.1).

Таблица 1

Расчетные параметры привода с длиной хода $L_0 = 1120$ мм

V_0 м/с	n , мин ⁻¹	$n_{\text{дх}}$, мин	F , кН	P_1 , кВт
0,25	15	42,7	6,7	15
			80	20
0,3	18	51,2	8	18
			80	24
0,5	30	85,4	13,4	30
			80	40

Определяем мощность двигателя привода по формуле [33]

$$P_1 = \frac{V_0 F}{1000}, \quad (6)$$

где F – действующая на шток сила, Н; V_0 – скорость перемещения штока (рейки), м/с.

Для скоростей перемещения рейки из диапазона 0,25-0,5 м/с и нагрузки на шток $F = 60$ -80 кН необходимая мощность двигателя привода представлена в табл.1. Значения мощности двигателя при $V_0 = 0,3$ м/с и нагрузке $F = 60$ и 80 кН составляют 18 и 24 кВт соответственно.

Определяем крутящий момент мотор-редуктора по формуле [33]

$$M = \frac{DF}{2}. \quad (7)$$

При нагрузке 60 кН определяем крутящий момент $M = 3360$ Н·м.

Частота вращения шестерни n_1 , равная частоте вращения выходного вала n_2 , рассчитывается по формуле [33]

$$n_2 = \frac{n_1}{i}, \quad (8)$$

где n_1 – частота вращения электродвигателя; i – передаточное число редуктора.

Тогда для $V_0 = 0,3$ м/с и $F = 60$ -80 кН при частоте вращения электродвигателя $n_1 = 1480$ мин⁻¹ передаточное число редуктора $i = 28,9$, что должно быть учтено при выборе мотор-редуктора.

Для данного типоразмера привода $L_0 = 1120$ мм, $F = 60$ -80 кН подобран мотор-редуктор SEWEURODRIVE KAZ-97 с $n_1 = 1480$ мин⁻¹, $P_1 = 22$ кВт, $i = 18,96$, $n_2 = 78$ мин⁻¹. Для этого редуктора допускаемая радиальная нагрузка составляет 19,4 кН. Эксплуатационный коэффициент (сервис-фактор) $S_f = 1,35$. Номинальный крутящий момент на выходе $M_{n2} = 3210$ Н·м. Максимальный крутящий момент на выходе $M_{n2\max} = 4300$ Н·м. Размерные характеристики редуктора – полый вал с $d = 70$ мм со шпонкой.

Таким образом, использование двигателя мощностью 22 кВт возможно при ограничениях скорости рейки в пределах 0,25-0,3 м/мин и максимальной допустимой нагрузке 73,3 кН. Скорость 0,5 м/с при заданных нагрузках 60-80 кН возможна при использовании мотор-редуктора мощностью от 30 кВт. При скорости 0,3 м/с и нагрузке 80 кН минимальная мощность составляет 24 кВт, момент равен 4480 Н·м. Указанные параметры мотор-редуктора не позволяют работать при такой нагрузке.

Затем выполняются расчеты на прочность при изгибе зубьев вал-шестерни, по результатам которых выбираются материал и способ термической обработки и поверхностного упрочнения зубьев.

Расчет элементов привода на прочность. Расчет зубьев шестерни на прочность при изгибе производится по формуле

$$\sigma_F = \frac{Pk_F y_F}{b_w m}, \quad (9)$$

где P – окружное усилие, Н; k_F – коэффициент распределения нагрузки; y_F – коэффициент формы зуба, зависящий от числа зубьев, при $Z = 14$ $y_F \approx 3,9$; b_w – ширина зубчатого венца, $b_w = 139,5$ мм; m – модуль зуба зубчатого колеса, $m = 8$ мм.

Коэффициент распределения нагрузки рассчитывается по формуле [33]

$$k_F = k_{F\beta} k_{F\nu}, \quad (10)$$

где $k_{F\beta}$ – коэффициент неравномерности распределения нагрузки по длине зуба, при практически симметричном расположении опор и отношении ширины b_w к диаметру D ($\psi_{bd} = 140/112 = 1,2$) $k_{F\beta} = 1,14$ (табл.2); $k_{F\nu}$ – коэффициент динамической нагрузки, при 7-й степени точности и окружной скорости до 3 м/с $k_{F\nu} = 1,15$ (табл.3); $k_F = 1,14 \cdot 1,15 = 1,31$.



Таблица 2

Значение коэффициента концентрации нагрузки F_B

$\Psi_{bd} = \frac{b_w}{D}$	Расположение колес относительно опор			
	Симметричное	Несимметричное		Консольное
		Вал весьма жесткий	Менее жесткий	
0,2	1,00	1,00	1,05	1,15
0,4	1,00	1,04	1,10	1,22
0,6	1,03	1,08	1,16	1,32
0,8	1,06	1,13	1,22	1,45
1,0	1,10	1,18	1,29	—
1,2	1,14	1,23	1,36	—

Таблица 3

Значение коэффициента k_{Fv} для прямозубых колес

Степень точности	Твердость поверхности зубьев НВ	Окружная скорость v , м/с		
		До 3	3-8	8-12
6	< 350	1,00	1,20	1,30
	> 350	1,00	1,20	1,30
7	< 350	1,15	1,35	1,45
	> 350	1,15	1,25	1,36
8	< 350	1,25	1,45	—
	> 350	1,20	1,35	—
9	< 350	1,35	—	—
	> 350	1,30	—	—

При базовом числе циклов допускаемые значения прочности на изгиб определяются по формуле [33]

$$[\sigma]_F = \frac{\sigma_{F^0limb}}{[n]_{F'} [n]_{F''}}, \quad (11)$$

где σ_{F^0limb} – напряжения, определяемые режимом термообработки, МПа; коэффициент $[n]_{F'} = 1,75$ для сталей после нормализации, улучшения и поверхностной закалки, 1,8 – после объемной закалки и 1,55 – после цементации и закалки; коэффициент $[n]_{F''} = 1$ для штампованных, 1,15 для кованых и 1,3 для литых деталей.

Значения σ_{F^0limb} в зависимости от режима обработки: 1,8 НВ – нормализованные улучшенные колеса; 500-550 МПа – объемная закалка, $HRC_3 = 45-55$; 700 МПа – поверхностная закалка, $HRC_3 = 48-58$; 900 МПа – цементация и закалка, $HRC_3 = 57-60$.

Для штампованного колеса из улучшенной стали 40Х с поверхностной закалкой $\sigma_{F^0limb} = 700$ МПа, для штампованного колеса из стали 20Х после цементации $\sigma_{F^0limb} = 900$ МПа. Коэффициент запаса $[n]_F = 1,75$ для стали после поверхностной закалки и $[n]_F = 1,55$ для стали после цементации.

Рассчитываем допускаемое напряжение по формуле (11):

для стали 40Х с поверхностной закалкой $[\sigma]_F = 700/1,75 = 400$ МПа,

для стали 20Х после цементации $[\sigma]_F = 900/1,55 = 580$ МПа.

Напряжение в зубьях по формуле (9):

$$\text{при } P = F = 60 \text{ кН, } \sigma_F = \frac{60000 \cdot 1,31 \cdot 3,9}{139,5 \cdot 8} = 275 \text{ МПа; } \sigma_F \leq [\sigma]_F;$$

$$\text{при } P = F = 80 \text{ кН, } \sigma_F = \frac{80000 \cdot 1,31 \cdot 3,9}{139,5 \cdot 8} = 367 \text{ МПа; } \sigma_F \leq [\sigma]_F.$$

Таким образом, выбранный модуль из улучшенной стали 40Х с поверхностной закалкой выдерживает нагрузку до 80 кН.



Процесс изготовления деталей линейного реечного привода с длиной хода 1120 мм. Сведения, необходимые для изготовления составных частей элементов линейного реечного привода ШГН, представлены в табл.4.

Таблица 4

Технология изготовления и материал деталей линейного реечного привода

Наименование	Тип изготовления	Заготовка/Материал
Рейка – вал-шестерня (сборка)		
Вал-шестерня	Фрезерная обработка	Сталь 40ХН
Рейка	Фрезерная обработка	Сталь 40Х
Замок малый	Фрезерная обработка	Лист 20/Сталь 3
Замок	Фрезерная обработка	Сталь 45
Втулка	Токарная обработка	Сталь 45
Шайба	Токарная обработка	Сталь 20
Вкладыш	Лазерная резка	Лист 2/Сталь 10
Корпус (сборка)		
Стенка нижняя	Фрезерная обработка	АМг3
Направляющая верхняя	Фрезерная обработка	Сталь45
Направляющая боковая	Фрезерная обработка	Сталь45
Рейка направляющая	Слесарная обработка	ЛС59-1
Пластина направляющая	Слесарная обработка	ЛС59-1
Стенка левая	Фрезерная обработка	АМг3
Стенка правая	Фрезерная обработка	АМг3
Стенка верхняя	Фрезерная обработка	АМг3
Кольцо	Слесарная обработка	Сталь45
Переходник (сварка)		
Стенка передняя	Лазерная резка	Лист 20/Сталь10
Кронштейн	Слесарная обработка	Лист 40/Сталь10
Кронштейн	Слесарная обработка	Труба 80×50×3/Сталь10
Ролик	Токарная обработка	Круг 35/Сталь45
Уголок	Слесарная обработка	Лист 6/Сталь10
Стенка	Лазерная резка и гибка	Лист 6/Сталь10
Ухо	Слесарная обработка	Лист 20/Сталь3
Колонна (сварка)		
Стенка	Лазерная и фрезерная обработка	Лист 25/Сталь10
Пружина сжатия наружная	Готовое изделие	
Пружина сжатия внутренняя	Готовое изделие	
Труба	Сварка	Труба 219×5
Плита (диск)	Лазерная резка	Лист 25/Сталь 3
Штанга	Токарная обработка	Труба 41×3,5
Клапан	Токарная обработка	Круг 45/Сталь 3
Полукрышка левая	Токарная обработка	ЛС59-1
Полукрышка правая	Токарная обработка	ЛС59-1
Стакан (сварка)		
Диск стакана	Токарная обработка	Лист 25/Сталь3
Труба стакана	Токарная обработка	Труба 54×3
Корпус кожуха (сварка)		
Стенка	Лазерная резка и гибка	Лист 2/Сталь3
Ручка	Слесарная обработка	Круг 14/Сталь20
Стенка задняя	Лазерная резка	Лист 2/Сталь3
Фланец (сварка)		
Пластина	Лазерная резка	Лист 4/ Сталь10
Пластина	Лазерная резка	Лист 4/ Сталь10
Пластина	Лазерная резка	Лист 4/ Сталь10

Процесс сборки привода (рис.2). На мотор-редуктор устанавливали нижнюю стенку корпуса (рис.2, а). На вал-шестерню напрессовывался подшипник (рис.2, б), затем она устанавливалась в редуктор, привинчивалась боковая стенка (рис.2, в). Затем в корпус устанавливались направляющие с вкладышами (рис.2, г).

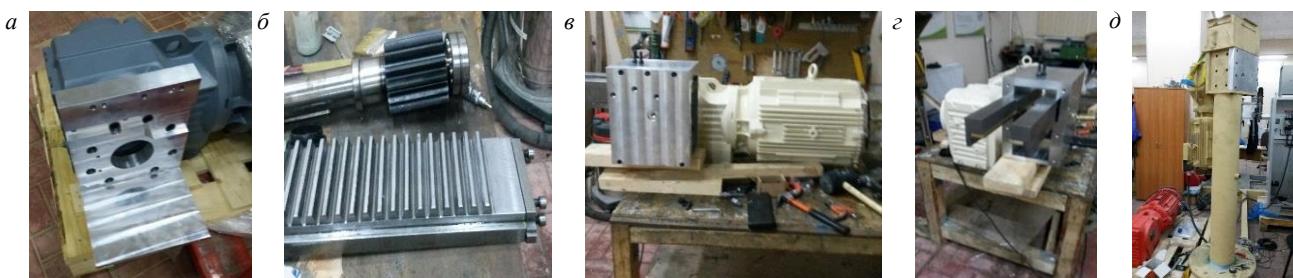


Рис.2. Этапы сборки линейного реечного привода ШГН

После этого осуществлялась сборка колонны (рис.2, *д*). В нее устанавливались пружины и стакан. Затем редуктор с двигателем в сборе устанавливался на монтажную площадку, после чего совмещались отверстия во фланце колонны и корпусе редуктора, на корпус редуктора устанавливался переходник, после чего устанавливалась зубчатая рейка, которую переворачивали зубьями вниз и передвигали по направляющим до упора, проворачивая вал. Кожух устанавливается на переходник в вертикальном положении и используется в комплектации привода для испытаний на скважине при защите механизма от влаги и пыли. При проведении исследовательских испытаний кожух не устанавливался для визуального контроля перемещений рейки.

Для собранного привода была разработана адаптивная система управления группой приводов на кусте скважин с системой рекуперации энергии движущегося вниз штока, позволяющей снизить энергопотребление приводов регулированием числа двойных ходов и хода штока.

Оптимизация алгоритмов нефтедобычи с точки зрения эффективности и энергопотребления выполнена на основе методов математического моделирования в системе имитационного моделирования Simulink Power System Blockset. Для создания модели системы были использованы математические модели гидравлической и механической (система насос – штанговая колонна и привод ШГН), электрической (преобразователь частоты, накопитель энергии и электродвигатель); электронной (регулятор) составных частей [35], штанговой колонны [36]. Методика разработки математической модели колонны представлена в [36].

Разработанная в настоящей работе адаптивная САУ группы приводов формирует команды для преобразователя частоты. Преобразователь частоты формирует напряжение требуемой частоты и амплитуды для питания асинхронного электродвигателя. Асинхронный электродвигатель, соединенный с редуктором через муфту, передает крутящий момент механизму шестерня-рейка, рейка соединена с полированным штоком и сообщает ему возвратно-поступательное движение. Кинетическая энергия движущих вниз штоков запасается в конденсаторной батарее. САУ выполняет распределение накопленной энергии между приводами при подъеме пластовой жидкости, обеспечивает оптимальное управление в соответствии с дебитом скважины, осуществляет управление с оптимальным наполнением насоса, обеспечивает программным способом предотвращение гидроудара, что позволяет повысить срок службы и надежность работы привода. Приводы соединены между собой и конденсаторной батареей с помощью звена постоянного тока.

Схема разработанной адаптивной САУ, управляющей группой приводов с рекуперацией энергии, и ее реализация для двух приводов ШГН представлены на рис.3, *а*. Экспериментальный образец САУ имеет два канала для подключения двух приводов ШГН и представляет собой один общий шкаф управления и питания, в котором размещаются преобразователи частоты (ПЧ), управляющий контроллер и конденсатор звена постоянного тока (рис.3, *б*). Эта система также имеет силовой и информационный каналы. Приводы насоса рассматриваются в составе группы как объекты управления со своими СУ, а их информационные каналы связаны с системой управления высокого уровня через информационный преобразователь. Ввиду того, что для повышения энергоэффективности нефтедобычи используется кинетическая энергия движущегося вниз штока, накапливаемая в конденсаторной батарее, силовые каналы приводов ШГН соединены между собой и накопителем энергии через звено постоянного тока, а одной из задач САУ является распределение накапливаемой энергии между двумя приводами.

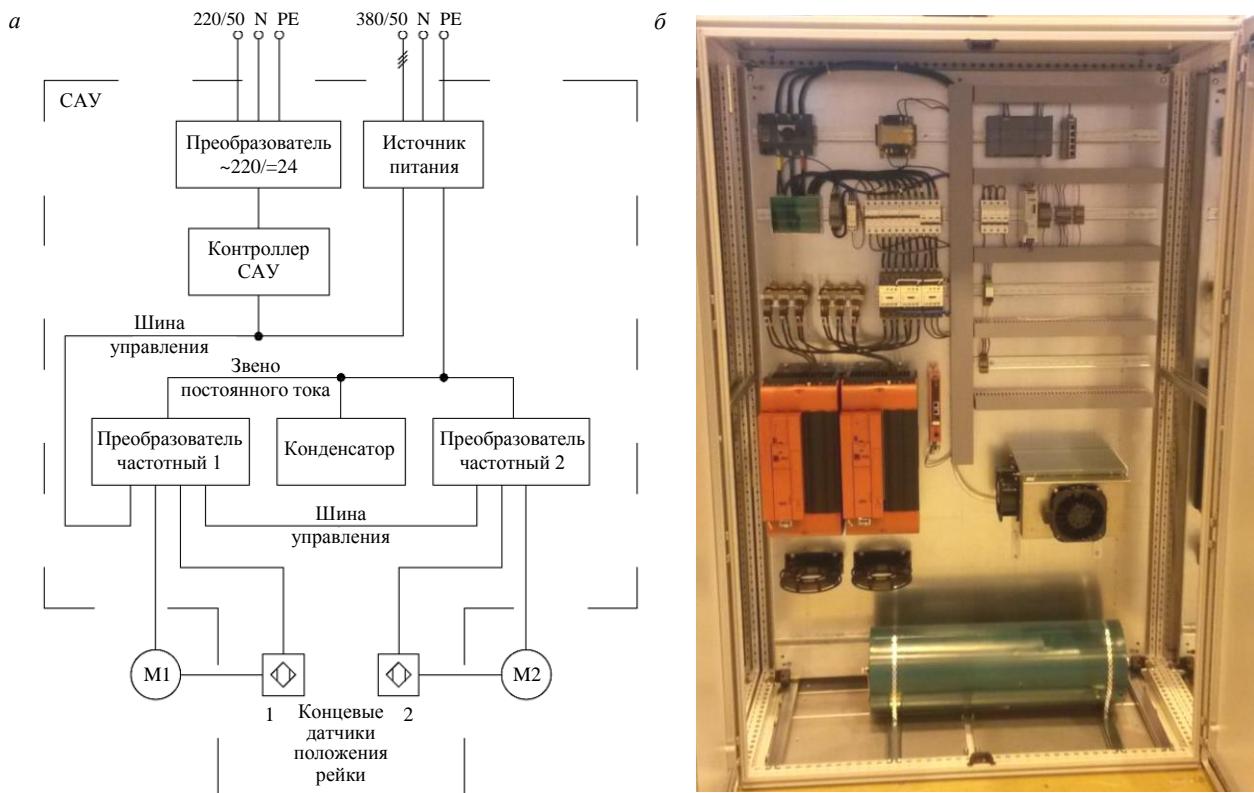


Рис.3. Функциональная электрическая схема экспериментального образца САУ (а) и шкаф питания и управления для группы из двух приводов ШГН (б)

Обсуждение результатов. Анализ расчета КПД приводов показал, что разработанный линейный реечный привод имеет наибольший КПД среди аналогов. Компактность привода и возможность установки его непосредственно на устье скважины позволяют снизить эксплуатационные затраты и срок ввода в эксплуатацию, что также способствует повышению экономической эффективности добычи нефти.

Для типоразмера привода для нагрузок на шток 60-80 кН подобран мотор-редуктор SEWEURODRIVE KAZ-97 с $n_1 = 1480 \text{ мин}^{-1}$, $P_1 = 22 \text{ кВт}$, $i = 19$, $n_2 = 78 \text{ мин}^{-1}$, $S_f = 1,35$, $M_{n2} = 3210 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Использование мотор-редуктора мощностью 22 кВт ограничивает скорости перемещения рейки в пределах 0,25-0,3 м/мин и допустимую нагрузку 73,3 кН. При расчетных нагрузках 60-80 кН скорость перемещения рейки, равная 0,5 м/с, допустима для двигателей мощностью более 30 кВт. На скорости 0,3 м/с и нагрузке 80 кН минимальная мощность равна 24 кВт, а на скорости 0,5 м/с и нагрузке 60 кН – 30 кВт.

Для выбранного мотор-редуктора мощностью 22 кВт при неизменности длины хода рейки ограничения по скорости перемещения штока или нагрузок на шток возможны за счет снижения частоты вращения шестерни и количества двойных ходов, а также скорости перемещения рейки. Это можно обеспечить при уменьшении частоты тока, который подается на электродвигатель, что достигается за счет использования преобразователя частоты в системе управления привода. Применение ПЧ позволяет также осуществлять торможение при остановке и смене направления перемещения и уменьшить инерционные нагрузки при реверсировании направления движения.

При скорости 0,3 м/с, нагрузке 80 кН и скорости 0,5 м/с, нагрузке 60 кН требуется использовать размерные параметры редуктора с большими габаритами, чем SEWEURODRIVE KAZ-97. Подходящим вариантом для этих условий является мотор-редуктор Bonfiglioli A803 24,5 P200 BN200L4 с характеристиками $P_1 = 30 \text{ кВт}$, $n_1 = 1470 \text{ мин}^{-1}$, $n_2 = 60 \text{ мин}^{-1}$, $M_{n2} = 4377 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $S_f = 1,5$, радиальная нагрузка на выходном валу $R_{n2} = 4330 \text{ Н}$.

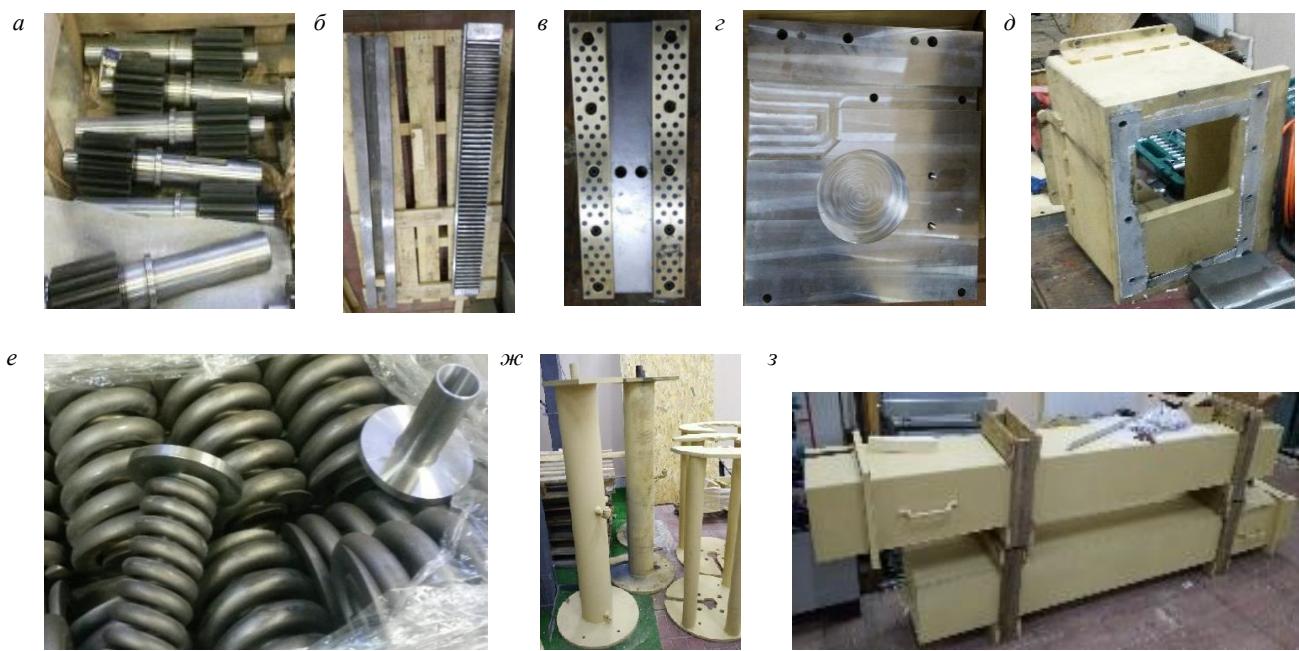


Рис.4. Сборочные единицы линейного реечного привода ШГИ

По результатам расчета на прочность при изгибе зубьев была выбрана вал-шестерня из улучшенной стали 40ХН с поверхностной закалкой зубьев, которая выдерживает нагрузку до 80 кН. Также с учетом проведенных расчетов были выбраны материалы и технологии изготовления остальных составных частей и деталей привода, подобраны технологические режимы термообработки. Фотографии некоторых деталей представлены на рис.4: вал-шестерня (сталь 40ХН, улучшение + закалка токами высокой частоты (ТВЧ) для поверхности зубьев (рис.4, а), зубчатая рейка (сталь 40Х, улучшение, рис.4, б), детали корпуса с вкладышами из латуни ЛС59-1 и стенками из алюминиевого сплава АМг3 (рис.4, в, г). Колонна, кожух, преходник и стакан представляют собой сварные конструкции из углеродистых сталей.

Также произведены механическая (токарная и фрезерная) и термическая обработка (нормализация) деталей для сборки рейки с вал-шестерней (малый замок, замок, втулка, шайба, в соответствии с табл.4) и лазерная резка деталей для деталей вкладыша (рис.4, в). Чистовая механическая обработка деталей корпуса (рис.4, г) осуществлялась в соответствии с табл.4. Для изготовления переходника (табл.4) была выполнена чистовая механическая обработка, лазерная резка и сварка деталей (рис.4, д).

Изготовленные и термообработанные пружины показаны на рис.4, е. Для изготовления колонны и стакана была выполнена лазерная резка, токарная и фрезерная обработка, а затем сварка деталей (табл.4). Колонна в сборе с установленными внутрь стаканом и пружинами показана на рис.4, ж. Для изготовления кожуха выполнены лазерная резка, гибка и сварка деталей (табл.4), готовые кожухи представлены на рис.4, з.

На рис.5 представлен линейный реечный привод в сборе с длиной хода 1200 мм и нагрузкой на шток до 80 кН, закрепленный на испытательном стенде для испытаний на холостом ходу. Асинхронный электродвигатель, передающий реечному механизму крутящий момент, через упругую муфту соединен с редуктором, который передает возвратно-поступательное движение насосной штанге. Зубчатая реечная передача состоит из закрепленной на стойке зубчатой рейки и вала-шестерни, перемещающейся в вертикальном направлении для обеспечения возвратно-поступательного движения насосных штанг. Зубчатый венец вала-шестерни при вращении электродвигателя, находясь в зацеплении с зубчатой рейкой, на прямом ходу перемещает ее вертикально вверх, а при реверсивном вращении двигателя на обратном ходу – вертикально вниз. Стойка зубчатой рейки в верхнем конце жестко соединена со штоком штанговой колонны при помощи зажима, обеспечивающего передачу усилия от привода к колонне штанг. В U-образной стойке зубчатой рейки вдоль

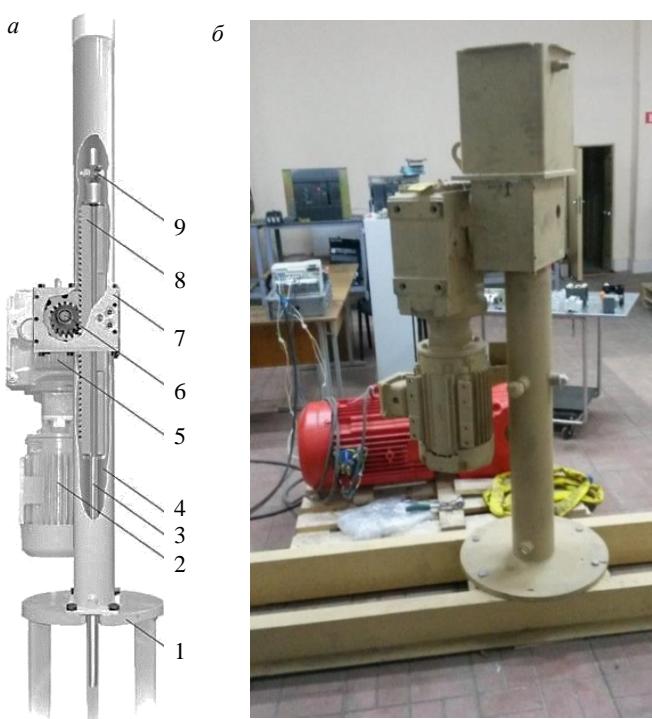


Рис.5. Конструкция (а)
и изготовленный реечный привод в сборе (б)

1 – подставка; 2 – асинхронный электродвигатель; 3 – полированный шток; 4 – масляная ванна; 5 – редуктор; 6 – шестерня и ось; 7 – корпус механизма; 8 – зубчатая рейка; 9 – штангодержатель

а при движении вниз – в режиме торможения (генераторном режиме). Приводы насосов, работающие на кусте скважин, соединяются звеном постоянного тока, к которому подключается конденсаторная батарея большой емкости для накопления и хранения энергии, вырабатываемой в генераторном режиме при обратном ходе штока вниз. Накопленная энергия потребляется электродвигателем на прямом ходу штока вверх во время работы в двигательном (нагруженном) режиме. Микропроцессорная система управления, подбирающая интенсивность откачки для каждого насоса, регулирует расход запасенной энергии на подъем нефти, что позволяет экономичнее расходовать электроэнергию.

Для реализации энергоэффективного управления группой приводов на кусте близкорасположенных скважин с рекуперацией энергии предлагается адаптивная САУ, включающая входной преобразователь, управляемый источник тока, обеспечивающий процессы заряда и разряда конденсатора большой емкости (накопитель энергии штока) и выдающая команды на запуск и останов приводов, входящих в группу, работу в двигательном и генераторном режимах. Предлагаемая адаптивная САУ позволяет реализовать алгоритмы энергоэффективного управления группами приводов ШГН, обеспечивающие снижение колебаний потребляемой мощности и тока путем выбора скорости плунжера, числа качаний ШГН и длительности пауз между ними в соответствии с дебитом скважин.

Наиболее эффективным электрическим способом повышения КПД является применение разработанной системы запасения и перераспределения потенциальной энергии штоков между ШГН, осуществляющими подъем нефти. Это позволило устраниить колебания потребляемой мощности, снизить ее пиковое значение в три раза, пиковое значение потребляемого из сети тока в два раза, уменьшить потери во входном преобразователе и кабелях в три раза.

Применение системы рекуперации энергии позволяет сократить капитальные затраты за счет снижения поперечного сечения сетевых кабелей, использования входного трансформатора или дизель-генераторной установки меньшей мощности в случае автономного питания группы приводов.

оси рабочего хода насоса имеется продольный открытый канал для перемещения в нем штока внутри стойки.

Под нижним краем стойки привода расположен масляный поддон (ванна) для смазки, в который погружается нижняя часть стойки, в результате чего обеспечивается смазка во время каждого рабочего хода. Поддон для смазки представляет собой кольцевую полость, образованную двумя трубами, герметично соединенными внизу, заполненную смазкой, которая закачивается в верхнюю часть полости. Внутренняя трубчатая стенка поддона расположена вокруг устьевого штока и свободно помещается внутри отверстия рейки для обеспечения хода, а внешняя стенка трубчатого поддона расположена вокруг рейки. Привод также содержит пружину, расположенную внутри полости в поддоне под нижним краем стойки для торможения рейки при движении насоса вниз и разгона рейки во время прямого хода насоса вверх.

При движении стойки вверх микропроцессорная система управления линейным реечным приводом обеспечивает работу электродвигателя в двигательном режиме.

При движении стойки вверх микропроцессорная система управления линейным реечным приводом обеспечивает работу электродвигателя в двигательном режиме. Приводы насосов, работающие на кусте скважин, соединяются звеном постоянного тока, к которому подключается конденсаторная батарея большой емкости для накопления и хранения энергии, вырабатываемой в генераторном режиме при обратном ходе штока вниз. Накопленная энергия потребляется электродвигателем на прямом ходу штока вверх во время работы в двигательном (нагруженном) режиме. Микропроцессорная система управления, подбирающая интенсивность откачки для каждого насоса, регулирует расход запасенной энергии на подъем нефти, что позволяет экономичнее расходовать электроэнергию.



Таким образом, применение системы прямого управления моментом и системы накопления кинетической энергии элементов привода ШГН и колонны штока являются эффективным средством для снижения энергозатрат при добыче нефти из низкодебитных месторождений.

Заключение. Выполнен анализ путей повышения энергоэффективности штанговых глубинных насосов механическими способами. Показано, что наиболее эффективным механическим способом повышения КПД является применение линейного реечного привода разработанной конструкции, позволяющего повысить КПД установки на 10 % по сравнению с аналогами. Необходимо учитывать существующие в цикле работы электродвигателя привода колебания потребляемой мощности, приводящие к снижению КПД электродвигателя. Выполнены кинематический и прочностной расчеты линейного реечного привода с длиной хода 1120 мм и нагрузкой до 80 кН, описаны процессы его изготовления, термообработки деталей и сборки. Осуществлена сборка и проведены испытания привода на холостом ходу.

Разрабатываемые групповые энергоэффективные мобильные приводы ШГН и адаптивные САУ предназначены для оснащения «кустов» скважин на нефтяных месторождениях современным отечественным энергосберегающим оборудованием для нефтедобычи взамен устаревшего и изношенного оборудования, а также для импортозамещения техники.

При достаточно больших объемах добычи общая энергоэффективность и снижение капитальных и эксплуатационных затрат может принести значительный экономический эффект, а срок окупаемости групповых САУ может составить не более года за счет возможности оснащения групповыми САУ любых типов приводов ШГН. Повысится энергоэффективность нефтедобычи, снизятся затраты на обустройство скважин, экологическая нагрузка на зоны нефтедобычи, повысится общий уровень автоматизации производства и технологическая культура нефтедобычи в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Korolev N., Kozyaruk A., Morenov V. Efficiency Increase of Energy Systems in Oil and Gas Industry by Evaluation of Electric Drive Lifecycle // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 19. № 6074. DOI: [10.3390/en14196074](https://doi.org/10.3390/en14196074)
2. Zakaev D., Nikolaichuk L., Filatova I. Problems of Oil Refining Industry Development in Russia // International Journal of Engineering Research and Technology. 2020. Vol. 13. № 2. P. 267-270. DOI: [10.37624/IJERT/13.2.2020.267-270](https://doi.org/10.37624/IJERT/13.2.2020.267-270)
3. Samylovskaya E., Makhovikov A., Lutonin A. et al. Digital Technologies in Arctic Oil and Gas Resources Extraction: Global Trends and Russian Experience // Resources. 2022. Vol. 11. Iss. 3. № 29. DOI: [10.3390/resources11030029](https://doi.org/10.3390/resources11030029)
4. Tananykhin D., Palyanitsina A., Rahman A. Analysis of Production Logging and Well Testing Data to Improve the Development System for Reservoirs with Complex Geological Structure // Procedia Environmental Science, Engineering and Management. 2020. Vol. 7. № 4. P. 629-648.
5. Korolev M., Rogachev M., Tananykhin D. Regulation of filtration characteristics of highly watered terrigenous formations using complex chemical compositions based on surfactants // Journal of Applied Engineering Science. 2020. Vol. 18. Iss. 1. P. 147-156. DOI: [10.5937/jaes18-24542](https://doi.org/10.5937/jaes18-24542)
6. Mardashov D., Duryagin V., Islamov S. Technology for Improving the Efficiency of Fractured Reservoir Development Using Gel-Forming Compositions // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 24. № 8254. DOI: [10.3390/en14248254](https://doi.org/10.3390/en14248254)
7. Prischepa O., Nefedov Y., Nikiforova V., Xu Ruiming. Raw material base of Russia's unconventional oil and gas reserves (hydrocarbons shale strata) // Frontiers in Earth Science. 2022. Vol. 10. № 958315. DOI: [10.3389/feart.2022.958315](https://doi.org/10.3389/feart.2022.958315)
8. Jie Yu, Hongping Quan, Shihao Chang, Zhiyu Huang. Research on a fluorine-containing asphaltene dispersant and its application in improving the fluidity of heavy oil // Journal of Molecular Liquids. 2023. Vol. 375. № 121318. DOI: [10.1016/j.molliq.2023.121318](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121318)
9. Lei He, Yong Dai, Jingjie Hou et al. MXene based immobilized microorganism for chemical oxygen demand reduction of oilfield wastewater and heavy oil viscosity reduction to enhance recovery // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023. Vol. 11. Iss. 2. № 109376. DOI: [10.1016/j.jece.2023.109376](https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109376)
10. Anqi He, Junjian Li, Mengchen Jiang et al. Study of cyclic waterflooding for improving oil recovery in Lukeqin heavy oil reservoir // Geoenergy Science and Engineering. 2023. Vol. 223. № 211467. DOI: [10.1016/j.geoen.2023.211467](https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211467)
11. Wan-Li Kang, Bo-Bo Zhou, Issakhov M., Gabdullin M. Advances in enhanced oil recovery technologies for low permeability reservoirs // Petroleum Science. 2022. Vol. 19. Iss. 4. P. 1622-1640. DOI: [10.1016/j.petsci.2022.06.010](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.06.010)
12. Chunxue Cui, Zhijun Zhou, Ziang He. Enhance oil recovery in low permeability reservoirs: Optimization and evaluation of ultra-high molecular weight HPAM/phenolic weak gel system // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 195. № 107908. DOI: [10.1016/j.petrol.2020.107908](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107908)
13. Pothula G.K., Vij R.K., Bera A. An overview of chemical enhanced oil recovery and its status in India // Petroleum Science. 2023. DOI: [10.1016/j.petsci.2023.01.001](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.01.001)
14. Bera A., Vij R. K., Shah S. Impact of newly implemented enhanced oil and gas recovery screening policy on current oil production and future energy supply in India // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 207. № 109196. DOI: [10.1016/j.petrol.2021.109196](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109196)
15. Zhijuan Zhao, Yan Li, Yougang Tang, Xinjie Ji. Conceptual design and numerical analysis of a novel platform for marginal oilfields development // Ocean Engineering. 2019. Vol. 187. № 106145. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2019.106145](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106145)



16. *Dmitrieva D., Romasheva N.* Sustainable Development of Oil and Gas Potential of the Arctic and Its Shelf Zone: The Role of Innovations // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8. Iss. 12. № 1003. DOI: 10.3390/jmse8121003
17. *Peng Fei, Luo Dongkun, Yin Chengfang et al.* Tight Oil Accumulation Characteristics and Resource Potential Evaluation of the Xiagou Formation in Qingxi Depression, Jiuquan Basin // *Energy Procedia*. 2019. Vol. 158. P. 5940-5945. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.528
18. *Jingwei Cui, Rukai Zhu, Sen Li et al.* Development patterns of source rocks in the depression lake basin and its influence on oil accumulation: Case study of the Chang 7 member of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China // *Journal of Natural Gas Geoscience*. 2019. Vol. 4. Iss. 4. P. 191-204. DOI: 10.1016/j.jnggs.2019.08.002
19. *Leusheva E., Brovkina N., Morenov V.* Investigation of Non-Linear Rheological Characteristics of Barite-Free Drilling Fluids // *Fluids*. 2021. Vol. 6. Iss. 9. № 327. DOI: 10.3390/Fluids6090327
20. *Мухаметшин В.Ш., Андреев В.Е., Ахметов Р.Т.* Повышение эффективности использования ресурсной базы месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти // *Нефтегазовое дело*. 2015. Т. 13. № 4. С. 122-125.
21. *Wen-Jun Huang, De-Li Gao.* Analysis of drilling difficulty of extended-reach wells based on drilling limit theory // *Petroleum Science*. 2022. Vol. 19. Iss. 3. P. 1099-1109. DOI: 10.1016/j.petisci.2021.12.030
22. *Abramov A.* Agile methodology of well pad development // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020. Vol. 10. Iss. 8. P. 3483-3496. DOI: 10.1007/s13202-020-00993-3
23. *Abramov A.* Optimization of well pad design and drilling – well clustering // *Petroleum Exploration and Development*. 2019. Vol. 46. Iss. 3. P. 614-620. DOI: 10.1016/S1876-3804(19)60041-8
24. *Уразаков К.Р., Молчанова В.А., Тугунов П.М.* Метод расчета динамических нагрузок и энергопотребления штанговой установки с системой автоматического уравновешивания // *Записки Горного института*. 2020. Т. 246. С. 640-649. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.6
25. Патент № 2150607 РФ. Привод скважинного штангового насоса / В.М.Валовский, Р.М.Ахунов, М.И.Манько, Н.В.Федосеенко. Опубл. 10.06.2000. Бюл. № 16.
26. Патент № 2482332 РФ. Безбалансирный станок-качалка / А.В.Дмитриев, В.Г.Фадеев, А.Ф.Садыков, Р.А.Ермаков, Р.Р.Кашапов, Н.В.Новиков. Опубл. 20.05.2013. Бюл. № 14.
27. Patent № 8152492 U.S. Linear Rod Pump Apparatus and Method / T.L.Beck, R.G.Anderson, R.G.Peterson, M.A.MacDonald. Publ. 10.04.2012.
28. Patent № 20200224651 U.S. Linear rack drive for submersible rod pump for oil production / A.Kurkov. Publ. 16.07.2020.
29. *Sivenkov A.V., Chirkova O.S., Konchus D., Mikhailov A.V.* Development of Flux for Protection of the Surface of Liquid-Metallic Low-Melting-Point Fusible Melt // *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 854. P. 126-132. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.854.126
30. Заявка на изобретение № 94039340 РФ. Станок-качалка / Х.Н. Мухаметшин. Опубл. 20.08.1996.
31. Патент № 167305 РФ. Линейный привод штангового глубинного насоса / П.П.Петков, А.П.Петкова, В.Е.Брунман, А.Н.Волков, О.В.Кочнева, К.В.Балабанов. Опубл. 27.12.2016. Бюл. № 36.
32. *Мехдиев К.К.* Оценка эффективности эксплуатации штанговых глубинных насосов на морских месторождениях в условиях интенсивного песко-водопроявления // *Socar Proceedings*. 2019. № 4. С. 53-60. DOI: 10.5510/OGP20190400411
33. *Артыкаева Э.М.* Энергоресурсосберегающее электрооборудование нефтедобывающих установок с плунжерным погружным насосом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Чебоксары: Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова, 2012. 21 с.
34. *Ивановский В.Н.* Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления // *Инженерная практика*. 2011. № 6. С. 18-26.
35. *Лысенко В.Д., Грайфер В.И.* Разработка малопродуктивных нефтяных месторождений. М.: Недра-Бизнесцентр, 2001. 562 с.
36. *Brunman V.E., Vataev A.S., Volkov A.N. et al.* Optimizing Pump-Drive Operation to Improve the Energy-Efficiency of Oil Extraction // *Russian Engineering Research*. 2017. Vol. 37. № 6. P. 479-484. DOI: 10.3103/S1068798X17060089

Авторы: О.Ю.Ганзуленко, канд. техн. наук, доцент, *Ganzulenka_OY@pers.spmi.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-7415-2996> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.П.Петкова, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-6728-4579> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Комплексная модель регулируемого электропривода ротора буровой установки

М.С.ЕРШОВ , А.Н.КОМКОВ, Е.А.ФЕОКТИСТОВ
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Ершов М.С., Комков А.Н., Феоктистов Е.А. Комплексная модель регулируемого электропривода ротора буровой установки // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 339-348. EDN YEEWZJ. DOI: 10.31897/PMI.2023.20

Аннотация. Рассмотрена и реализована модифицированная математическая модель асинхронный электропривод ротора – колонна бурильных труб – долото – горная порода, развивающая и обобщающая результаты ранее выполненных исследований. Модель включает следующие подсистемы: модель асинхронного привода с векторным управлением; модель формирования момента сопротивления на забое долота, учитывающую особенности взаимодействия долота и породы; модель многомассовой механической части, учитывающую деформацию колонны бурильных труб; подсистему формирования энерготехнологических параметров буровой установки. Комплексная модель позволяет рассчитать и оценить выбранные режимы бурения с учетом их электромеханической, энергетической и технологической эффективности и динамики процессов бурения. Выполненное компьютерное моделирование режимов бурения подтвердило возможность возникновения stick-slip-эффекта, сопровождаемого высокочастотными вибрациями при остановках долота, при которых возможно изменение направления вращения долота, его ускоренный износ и отвинчивание бурового инструмента. Длительные остановки долота приводят к существенному снижению средней скорости вращения долота, чем можно объяснить снижение механической скорости бурения и повышение энергозатрат при бурении в зоне неустойчивого вращения долота. Модель может быть использована как базовая для дальнейшего совершенствования систем управления роторным бурением.

Ключевые слова: асинхронный регулируемый электропривод; ротор буровой установки; режимы бурения; stick-slip-эффект; энергоэффективность

Поступила: 13.10.2022 Принята: 13.12.2022 Онлайн: 10.03.2023 Опубликована: 19.07.2023

Введение. Электропривод ротора буровой установки отличается сложной механической частью (рис.1). Вращение ротора двигателя через передаточное устройство передается на ротор буровой установки и через колонну бурильных труб (КБТ) – на долото. Под действием момента ротора буровой установки, приложенного к верху колонны, и момента сопротивления долота, приложенного к низу колонны, бурильные трубы деформируются и закручиваются на некоторый угол, значение которого зависит от длины, диаметра и упругих свойств колонны и может достигать десятков оборотов. В процессе бурения угол закручивания может оставаться практически неизменным, при этом осуществляется равномерное вращение долота. При изменении в процессе бурения угла закручивания возникает неравномерное неустойчивое вращение долота (stick-slip-эффект) с длительными остановками, погружениями в породу и срывами долота, а также появлением крутильных и продольных автоколебаний бурового инструмента [1]. Особенно часто (более 50 % времени бурения) такой режим возникает при работе с PDC-долотами режуще-истирающего типа. Режимы неустойчивого вращения долота могут превалировать в процессе бурения скважин [2, 3], снижая энергетическую эффективность бурения и ускоряя износ бурового инструмента [4, 5]. Задача данной работы заключается в создании комплексной модели буровой установки асинхронный электропривод ротора – колонна бурильных труб – долото – горная порода, имитирующей основные процессы электроприводного роторного бурения, с набором характеристик для анализа электромеханической, энергетической и технологической эффективностей режимов бурения. Итоги работы развивают результаты ранее выполненных исследований [6-8].

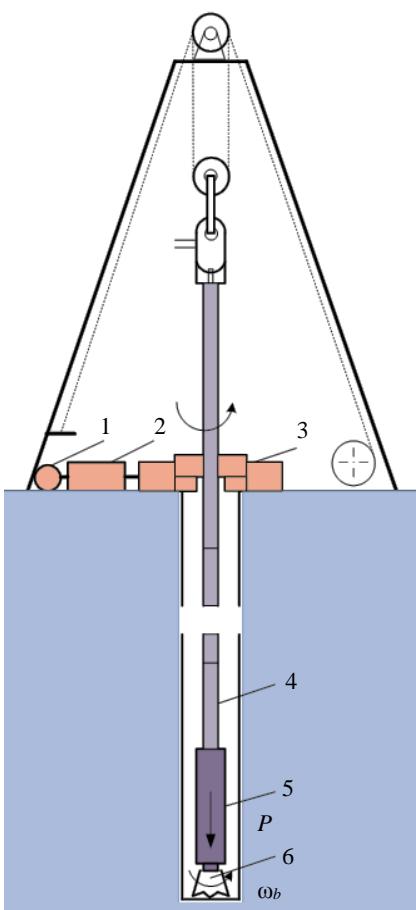


Рис.1. Схема буровой установки

1 – привод ротора; 2 – передаточные устройства; 3 – ротор буровой установки; 4 – колонна бурильных труб; 5 – компоновка низа колонны; 6 – долото

Методология. Моделирование асинхронного электропривода буровой установки осуществлялось в среде Matlab Simulink. Структурная схема базовой модели представлена на рис.2. Модель включает следующие основные подсистемы: IM-Sub-system – модель асинхронного двигателя с векторной системой управления на базе PI регуляторов потокосцепления, скорости и тока; Meh-Subsystem – модель механической части электропривода, включающая ротор двигателя, ротор буровой установки, механизмы передачи и колонну бурильных труб; двухмассовая модель механической части привода ротора БУ представлена на рис.3; T_{b0} -Subsystem, T_{b1} -Subsystem, T_b -Subsystem – подсистемы модели момента сопротивления на долоте; ETP-Subsystem – подсистема формирования энерготехнологических параметров бурения.

Основные номинальные параметры асинхронного двигателя привода ротора серии AFD составляют следующие: мощность 1000 кВт; напряжение 660 В; ток 1075 А; момент 9620 Н·м; частота вращения 993 об/мин.

«Моделирование двигателя осуществлялось в координатах (x, y) , скорость вращения которых равна скорости вращения поля статора ($\omega_k = \omega_1$), с базовым вектором напряжения ($u_{Sx} = U_1$; $u_{Sy} = 0$)» [7]. Математическая модель двигателя представлена следующей системой уравнений в операторном виде:

$$\begin{aligned} U_1 &= r(1+T'_S s)i_{Sx} - \omega_1 L'_S i_{Sy} - (k_R / T_R)\psi_{Rx} - k_R p\omega_m \psi_{Ry}; \\ 0 &= r(1+T'_S s)i_{Sy} + \omega_1 L'_S i_{Sx} - (k_R / T_R)\psi_{Ry} + k_R p\omega_m \psi_{Rx}; \\ 0 &= -k_R R_R i_{Sx} + (1/T_R + s)\psi_{Rx} - (\omega_1 - p\omega_m)\psi_{Ry}; \\ 0 &= -k_R R_R i_{Sy} + (1/T_R + s)\psi_{Ry} + (\omega_1 - p\omega_m)\psi_{Rx}; \\ T_m &= 1,5 p(\psi_{Rx} i_{Sy} - \psi_{Ry} i_{Sx}), \end{aligned} \quad (1)$$

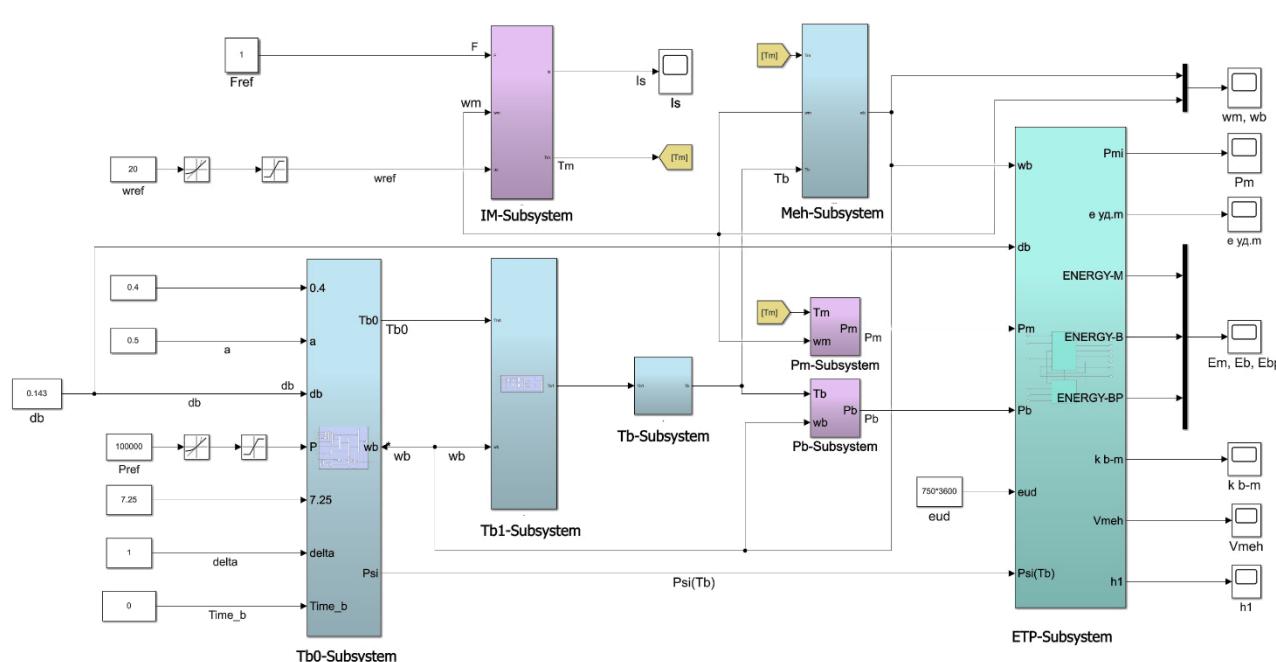


Рис.2. Структурная схема асинхронного привода ротора буровой установки

*Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование маширонных систем на ПК. СПб: Корона-Век, 2020. 368 с.



где $\omega_1 = 104,7 \text{ с}^{-1}$ – синхронная скорость; $p = 3$ – число пар полюсов ; ω_m – скорость вала двигателя; ψ_{Rx}, ψ_{Ry} – потокосцепления ротора по осям x, y ; ψ_{Sx}, ψ_{Sy} – потокосцепления статора по осям x, y ; i_{Rx}, i_{Ry} – токи ротора по осям x, y ; i_{Sx}, i_{Sy} – токи статора по осям x, y ; T_m – момент двигателя; s – оператор; R_R, R_S – активные сопротивления ротора и статора; L_m, L_R, L_S – взаимная и собственные индуктивности ротора и статора; $T_R = L_R/R_R$ – постоянная времени ротора; $T'_S = L'_S / r$ – постоянная времени статора; $r = R_S + k_r^2 R_R$; $k_r = L_m/L_R$; $L'_S = L_S - L_m^2/L_R$.

Параметры, входящие в уравнения системы (1), следующие: $R_R = 0,00267 \text{ Ом}$; $r = 0,939 \text{ Ом}$; $k_r = 0,939$; $L'_S = 0,00034 \text{ Гн}$; $T'_S = 0,068 \text{ с}$; $T_R = 1,064 \text{ с}$.

Определение параметров двигателя – активных сопротивлений, индуктивностей и постоянных времени, а также параметров PI-регуляторов – осуществлялось по следующим методикам [8-10]. При параллельной форме записи выражения передаточной функции параметры PI-регулятора потокосцепления составили $P_\psi = 410, I_\psi = 14$. Параметры PI-регуляторов скорости и тока, настроенные на технический оптимум, составили: $P_\omega = 166, I_\omega = 16,5$ (для регулятора скорости) и $P_I = 3, I_I = 10$ (для регулятора тока).

Механическая часть электропривода реализована в виде многомассовых (от двух до четырех масс) эквивалентных систем в блоке Meh-Subsystems. Исходные данные для моделирования соответствуют буровой установке типа БУ-5000/320. Длина колонны бурильных труб принята равной 3000 м, диаметр труб $d_t = 0,127$ (толщина стенки 0,09 м), компоновка низа КБТ выполнена из труб УБТ 203×80 (90 м), диаметр долота $d_b = 0,295 \text{ м}$ (PDC долото 295,3FD257M-A27). Математическая модель двухмассовой механической системы в операторном виде представлена следующей системой уравнений:

$$s\omega_m J_1 = T_m - \left(\frac{c_{12}}{s} + \beta_{12} \right) (\omega_m - \omega_b) - T_{r1};$$

$$s\omega_b J_2 = \left(\frac{c_{12}}{s} + \beta_{12} \right) (\omega_m - \omega_b) - T_b,$$

где $\omega_b(t)$ – скорость вращения долота, рад/с; T_{r1} – момент сопротивления первой массы, Н·м; T_b – момент сопротивления, приложенный ко второй массе (момент на долоте), Н·м; T_{r1} – момент сопротивления первой массы, определяющийся произведением коэффициента внешнего вязкого трения α на скорость вращения двигателя ω_m .

Расчетные моменты инерции элементов двухмассовой системы: $J_1 = 66,5, J_2 = 12,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; коэффициент жесткости $c_{12} = 22,8 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$; коэффициент вязкого трения $\beta_{12} = 0,06 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$; коэффициент внешнего вязкого трения $\alpha = 0,5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$.

Составление операторных уравнений трех- и четырехмассовой системы также не вызывает трудностей. Расчетные моменты инерции элементов трехмассовой системы: $J_1 = 55, J_2 = 17, J_3 = 7 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; коэффициенты жесткости $c_{12} = 25, c_{23} = 263 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$; коэффициенты вязкого трения: $\beta_{12} = \beta_{23} = 0,03 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$. Расчетные моменты инерции элементов четырехмассовой системы: $J_1 = 55, J_2 = 8,5, J_3 = 8,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; коэффициенты жесткости $c_{12} = 50, c_{23} = 50, c_{34} = 263 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$; коэффициенты вязкого трения $\beta_{12} = \beta_{23} = \beta_{34} = 0,02 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$. Все параметры механической системы приведены к скорости вращения двигателя.

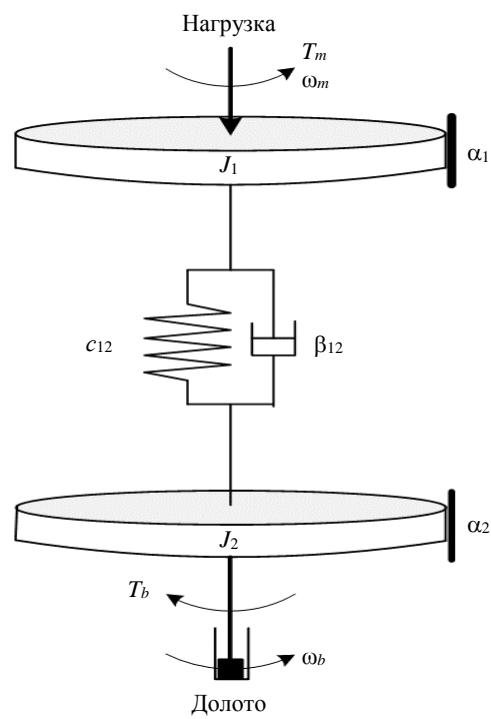


Рис.3. Двухмассовая модель механической части привода ротора

Определение момента T_b реализовано в трех блоках: T_{b0} -Subsystem; T_{b1} -Subsystem и T_b -Subsystem. Моделирование момента сопротивления долота осуществляется в блоке T_{b0} -Subsystem по следующему выражению [1]:

$$T_{b0}(t) = 0,4ad_b^2P\left(1 + \frac{7,25}{\omega_b(t) + \delta_0}\right)\psi(t_b), \quad (2)$$

где a – эмпирический коэффициент; P – осевая нагрузка на долото, Н; $\omega_b(t)$ – скорость вращения долота, рад/с; $\delta_0 = 1$ – поправка, рад/с; $\psi(t_b)$ – функция, учитывающая изменение момента в процессе бурения по мере износа долота за время наработки t_b , ч.

Определение параметров осуществлялось с учетом сопротивления горных пород разрушению при бурении скважин [11, 12].

Согласно источнику [1], функция $\psi(t_b)$ может быть представлена следующей зависимостью:

$$\psi(t_b) = 1 + 0,002t_b + 0,000051t_b^2.$$

Максимальная осевая нагрузка на долото при моделировании может достигать $P = 200$ кН; значение эмпирического коэффициента для мягких пород $a = 1$, для твердых пород $a = 0,5$; максимальная скорость вращения долота $\omega_b = 21$ рад/с (200 об/мин).

Переход от статического момента сопротивления $T_{b0}(t)$ к моменту $T_b(t)$, учитывающему фрикционные изменения момента при переходе через ноль, осуществляется в блоке T_{b1} -Subsystem (согласно модели Штрибека [13, 14]):

$$T_{b1}(t) = \rho T_{b0}(t), \quad (3)$$

где $\rho = 1\text{sign}\omega_b$; $|\omega_b| > 0,001$; $\rho = 1,1\text{sign}\omega_b$, $|\omega_b| \leq 0,001$.

В подсистеме T_b -Subsystem учитывается наличие в колонне бурильных труб не только крутильных, но и продольных колебаний, изменяющих в процессе бурения осевую нагрузку на долото; моделирование таких колебаний осуществлялось по гармоническому закону [15]. Формула для определения результирующего момента сопротивления на долоте имеет вид [8]

$$T_b = T_{b1}(1 + h\sin vt) + \xi(t),$$

где h – коэффициент, принимающий значение от 0 до 1; v – угловая частота продольных колебаний, соответствующих значениям от 0,5 до 3 Гц; $\xi(t)$ – функция белого шума для учета продольных случайных колебаний с амплитудным значением 3 кН·м.

Вычисление мгновенной (в момент времени t) мощности на валу двигателя $P_m(t)$ и мощности на долоте $P_b(t)$ осуществляется, исходя из значений моментов $T_m(t)$, $T_b(t)$ и скоростей $\omega_m(t)$, $\omega_b(t)$ в блоках P_m -Subsystem и P_b -Subsystem:

$$P_m(t) = T_m(t)\omega_m(t); \quad P_b(t) = T_b(t)\omega_b(t).$$

В блоке ETP-Subsystem вычисляются энергетические и технологические параметры буровой установки. Общий расход энергии электропривода и энергия на долоте за время бурения T определяются следующими выражениями:

$$E_m(T) = \int_0^T P_m(t) dt; \quad E_b(T) = \int_0^T P_b(t) dt.$$

Отношение затрат энергии на долоте и на двигателе определяет коэффициент эффективности использования электроэнергии привода

$$k_{b-m}(T) = \frac{E_b(T)}{E_m(T)}.$$

Энергетические и технологические характеристики связаны через показатели удельной энергоемкости различных пород – Mechanical specific energy (MSE) [16, 17]. Согласно данным энергокаротажа, которые могут входить в современные геолого-технологические исследования,



значения удельного энергопотребления на разрушение горной породы (табл.1) в зависимости от класса энергоемкости породы могут изменяться от нескольких единиц до нескольких тысяч кВт·ч/м³ [18]. Данные по удельным $e_{уд}$ (MSE) и общим $E_b(T)$ затратам энергии на долоте позволяют определить механическую скорость бурения Rate of penetration (ROP)

$$v_{meh} = \frac{E_b(T)}{e_{уд} TF_b} = \frac{\bar{P}_b}{e_{уд} F_b},$$

где F_b – площадь долота, м²; \bar{P}_b – среднее значение мощности на долоте (интегральная оценка за время T), кВт.

Таблица 1

Показатели энергоемкости бурения [18]

Класс породы	Энергоемкость	Удельное энергопотребление $e_{уд}$, кВт·ч/м ³
I	Низкая	До 15,6
II		15,6-31,2
III		31,2-62,5
IV	Малая	62,5-125
V		125-250
VI	Средняя	250-500
VII		500-1000
VIII	Повышенная	1000-2000
IX		2000-4000
X	Высокая	Свыше 4000

Значение механической скорости бурения позволяет определить другой характерный показатель роторного бурения – углубку за один оборот долота

$$h_1 = k \frac{v_{meh}}{\omega_b(T)},$$

где $k = \pi/1800$ – коэффициент размерности.

В бурении используется и величина, обратная h_1 , называемая Rate of penetration index (RPI).

Наряду с удельными энергозатратами на долоте, необходимыми для разрушения породы, предлагается ввести показатель общих удельных затрат электропривода ротора

$$e_{уд.m} = \frac{E_m(T)}{v_{meh} TF_b} = \frac{\bar{P}_m}{v_{meh} F_b},$$

где \bar{P}_m – среднее значение мощности электропривода (интегральная оценка за время T), кВт.

Энергия электропривода включает энергию на долоте, а также энергию, затрачиваемую на холостое вращение КБТ, и потери энергии на трение, в том числе на трение колонны о стенки скважины. Поэтому общие удельные затраты электроэнергии на бурение значительно превышают удельные энергозатраты на разрушение породы $e_{уд.m} \gg e_{уд}$. При этом параметр $e_{уд.m}$ проще определить на практике в процессе бурения.

Таким образом предложена модифицированная комплексная модель асинхронный электропривод ротора – колонна бурильных труб – долото – горная порода. Модель представляет собой нелинейную систему с обратными связями, что обуславливает возможность появления автоколебаний в системе [19, 20]. Основными входными параметрами модели являются нагрузка на долото P_{ref} (Weight on bit – WOB) и скорость вращения n_{ref} , об/мин (Revolution per minute – RPM) [21-24], а выходными – электромеханические параметры привода (скорости, моменты, токи, мощности), а также энергетические и технологические характеристики буровой установки [18, 25-28]. Сочетание параметров (WOB×RPM) определяет режимы бурения, а выходные параметры позволяют



оценить выбранные режимы бурения с позиций их электромеханической, энергетической и технологической эффективности и с учетом динамики процессов бурения [29-31].

Обсуждение результатов. Некоторые результаты моделирования для указанной буровой установки, исходные данные и режимы бурения представлены в табл.2.

Таблица 2

Результаты моделирования режимов электроприводного роторного бурения

Номер режима	Параметры						
	WOB×RPM, кН·об/мин	P_m , кВт	P_b , кВт	K_{b-m}	v_{meh} , м/ч	h_1 , мм/об	$e_{уд.m}$, кВт·ч/м ³
1	20×20	30,2	2,3	0,078	0,07	0,10	6237
2	40×30	59,8	5,5	0,096	0,17	0,14	5073
3	80×50	143,1	15,3	0,108	0,45	0,21	4491
4	120×70	255,1	29,8	0,117	1,25	0,27	4116
5	160×90	374,4	45,8	0,123	1,33	0,30	3933
6	200×110	523,2	65,3	0,125	1,90	0,34	3857
7	20×70	103,3	12,7	0,123	0,38	0,08	3919
8	60×90	198,1	26,3	0,133	0,77	0,14	3625
9	100×110	313,6	42,9	0,137	1,26	0,18	3525
10	120×130	450,4	62,4	0,139	1,83	0,23	3474
11	180×150	603,0	84,8	0,141	2,49	0,27	3426
12	20×120	202,4	21,6	0,107	0,63	0,08	4521
13	40×130	265,3	30,4	0,115	0,89	0,10	4199
14	80×150	396,0	50,1	0,127	1,47	0,15	3805
15	120×170	547,0	72,6	0,133	2,13	0,19	3621
16	120×30	82,0	5,1	0,062	0,14	0,21	7816

Одной из основных задач при выполнении буровых работ является анализ режимов бурения в координатах (WOB×RPM) [32-35]. Первые шесть режимов относятся к режимам неустойчивого вращения долота и, как показано на рис.4, в координатах (WOB×RPM) отделяют зону равномерного вращения долота от зоны неравномерного вращения с длительными остановками. В рассмотренных режимах отмечается невысокий уровень механической скорости бурения, что объясняется большим диаметром долота и достаточно высокой энергоемкостью породы VII класса (принято 750 кВт·ч/м³). Для долота диаметром 0,128 м при бурении пород П-III классов энергоемкости механическая скорость бурения достигает нескольких десятков метров в час. Приведенные значения углубки долота достаточно большие, в литературе можно встретить более низкие значения ограничения углубки, но при этом расчет ведут на оборот ротора двигателя, а не долота, отношение которых определяется передаточным отношением.

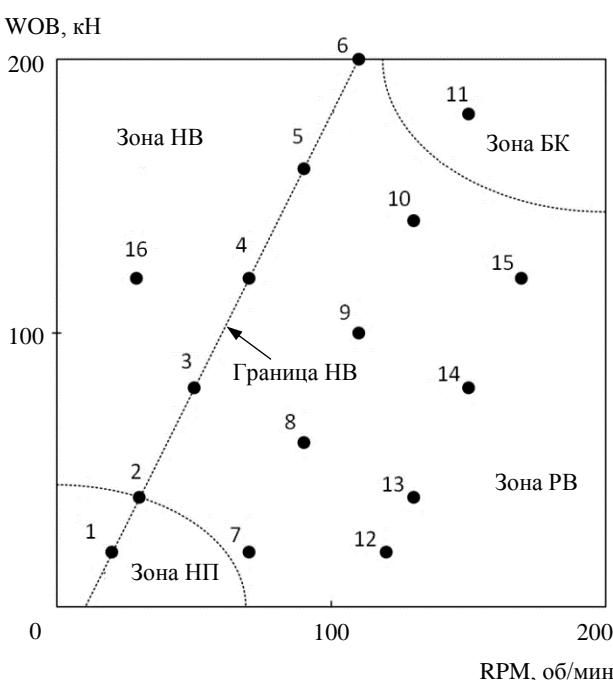


Рис.4. Режимы роторного бурения

НВ – неравномерное вращение долота; РВ – равномерное вращение долота; НП – недостаточные параметры; БК – боковые кручения

На основании анализа режимов (1-15) можно заключить, что по энергетическим характеристикам трудно выделить режимы неравномерного вращения (НВ) долота, если они близки к зоне равномерного вращения (РВ). Так, по всем характеристикам режимы 4 (на границе зон) и 9 (внутри зоны РВ) близки. Чем больше удален режим НВ от зоны РВ, например, режим 16, тем легче по приведенным характеристикам установить факт неустойчивого вращения долота. Для режимов внутри зоны НВ характерно

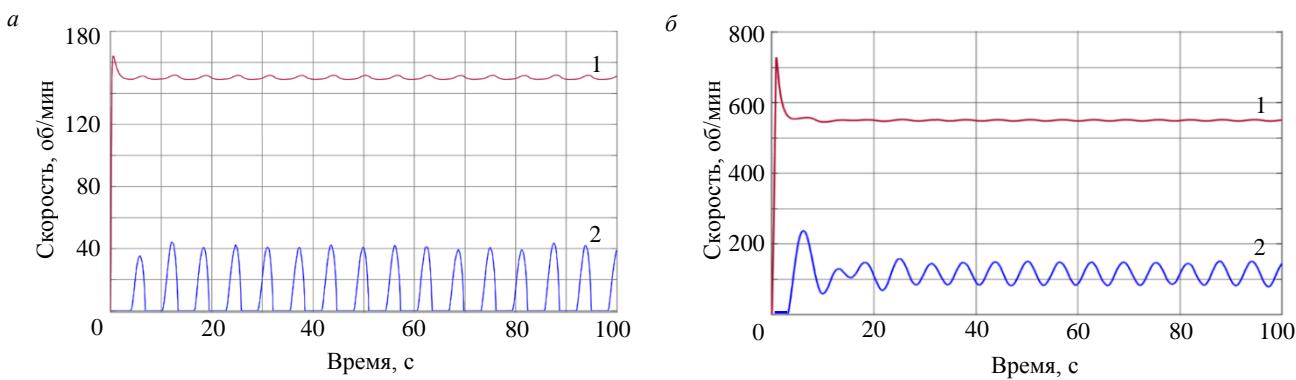


Рис.5. Графики скорости ротора (1) и долота (2) в режиме 16 неравномерного вращения долота с длительными остановками (а) и в режиме 9 равномерного вращения (б)

явное снижение механической скорости бурения ROP и повышение уровня энергозатрат. Графики скорости долота и ротора буровой установки для режима 16 представлены на рис.5, а. Для сравнения на рис.5, б приведены графики скорости долота и ротора для режима равномерного вращения долота в точке 9, в котором колебания скорости долота значительно меньше и отсутствуют остановки долота. Отметим, что в обоих случаях пуск двигателя привода осуществлялся без нагрузки, при отключенной муфте между двигателем и ротором буровой установки и с плавным нарастанием заданной скорости. Длительные остановки долота приводят к существенному снижению средней скорости долота, чем можно объяснить снижение механической скорости бурения и повышение энергозатрат при бурении в зоне НВ. В процессе бурения происходит износ долота, что, согласно уравнению (2), влияет на момент сопротивления долота, при этом граница зоны неравномерного вращения долота перемещается вправо, увеличивая площадь зоны НВ долота. С другой стороны, на величину зоны неравномерного вращения влияет и диаметр долота, при его уменьшении граница зоны неравномерного вращения долота смещается влево, уменьшая площадь зоны НВ долота.

Наряду с зонами равномерного и неравномерного вращения долота на рис.4 выделена зона недостаточных параметров бурения НП (insufficient parameters) [20], при работе в которой бурение неэффективно из-за низкого ROP. Зона РВ также может быть разделена, в верхней ее части (режим 11) механическая скорость бурения максимальна, но при этом происходит ускоренный износ долота и возникает режим ударов колонны по стенке скважины – боковые колебания (backward whirl) [21].

В режимах неустойчивого неравномерного вращения долота, как видно из рис.5, а, имеют место остановки долота длительностью в несколько секунд. В режимах 1-6 на границе неравномерного вращения остановки минимальны и увеличиваются по мере удаления рабочей точки вглубь зоны НВ, достигая десятка секунд. При увеличении масштаба рисунка видно, что на интервалах остановки процесс изменения скорости затухает [9]. Как показано на рис.6, а скорость «замирает» от небольших положительных и отрицательных начальных значений, стремясь к нулю. Имеют место высокочастотные колебания (до 3000 Гц) – крутильная вибрация, снижающая ресурс долота. Пересчет высокочастотных колебаний скорости в ускорения позволил получить кривую вибрации в принятых в бурении единицах измерения – шоках. Расчетный график вибрации долота, представленный на рис.6, б, подтверждает на практике возможность возникновения опасных вибраций, достигающих нескольких десятков шоков [25, 34].

Установлено, что в интервалах замирания на долото воздействует положительный и отрицательный моменты, превышающие 80 кН·м, которым соответствуют силы, действующие на резцы (зубки) долота до 15-20 кН, что согласовывается с критическим усилием, при котором может происходить скол армирующей пластиинки зубка [26, 27]. Кроме того, достигаемое значение момента, действующего на долото, превышает рекомендуемое развинчивающее усилие резьбового соединения долота. Для резьбового соединения долота 185,7 мм оно составляет 21,7 кН·м, что значительно меньше достигаемых на долоте значений момента. Это подтверждает возможность ускоренного износа и потери (отвинчивания) долота и нецелесообразность работы долота

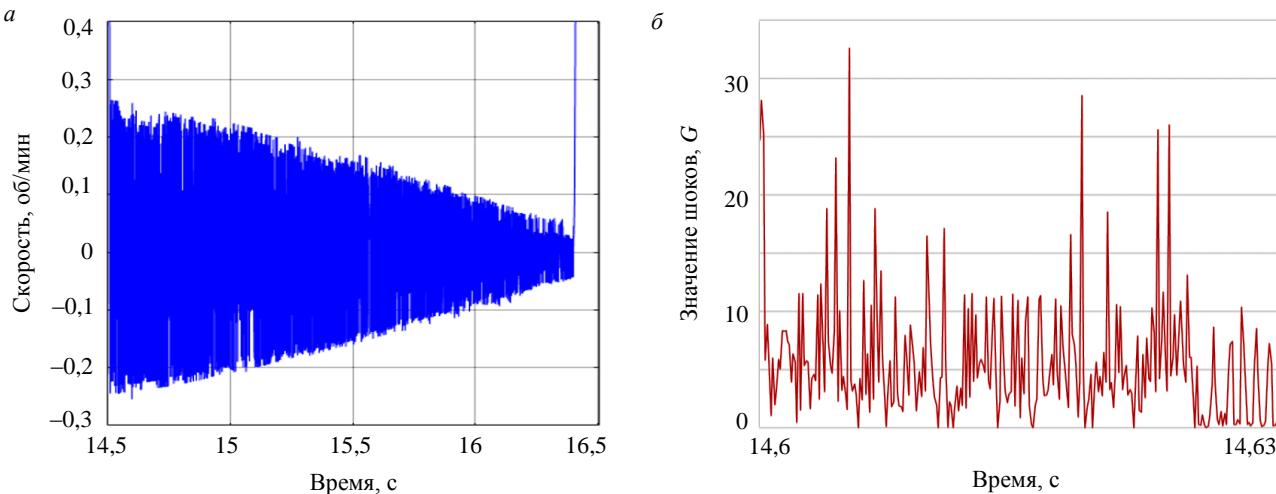


Рис.6. Высокочастотные колебания (а) и вибрация (б) долота при остановке и в stick-slip-режиме

в stick-slip-режимах [27, 32]. Особенно быстрый износ долота при высокочастотных крутильных колебаниях обусловлен изменением направления вращения долота, при котором сила реакции породы направлена не навстречу зубков долота, а по касательной к ним, вызывая сколы армирующих зубки пластин и вырывание зубков из гнезд корпуса долота [33, 34]. Учитывая конструкцию PDC долот, моделирование фрикционных изменений момента на долоте $T_b(t)$ при переходе скорости через ноль более обоснованно осуществлять по модели, отличающейся от модели (3) смещением вверх по оси ординат. Возможный вариант такой модели представлен в работе [35]. Расчеты показали, что такое смещение приводит к увеличению риска возникновения stick-slip эффекта.

Заключение. Предложена модификация комплексной модели асинхронный электропривод ротора – колонна бурильных труб – долото – горная порода, позволяющая рассчитать и оценить выбранные режимы бурения с учетом их электромеханической, энергетической и технологической эффективности [36-38] и динамики процессов бурения [29, 30, 39]. Результаты моделирования соответствуют практике роторного бурения [40-42]. Выполненное компьютерное моделирование режимов бурения подтвердило возможность возникновения stick-slip-эффекта, сопровождаемого высокочастотными вибрациями при остановках долота, при которых возможно изменение направления вращения долота, его ускоренный износ и отвинчивание бурового инструмента. Модель может быть использована в качестве базовой для дальнейшего совершенствования управления роторным [43-45] и другими [46-49] способами бурения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юнин Е.К. Автоколебания в глубоком бурении. М.: Либроком, 2013. 264 с.
2. Guangjian Dong, Ping Chen. A Review of the Evaluation, Control, and Application Technologies for Drill String Vibrations and Shocks in Oil and Gas Well // Shock and Vibration. 2016. № 7418635. 34 p. DOI: 10.1155/2016/7418635
3. Saldivar Márquez M.B., Boussaada I., H.Mounier, Niculescu S.-I. Analysis and Control of Oilwell Drilling Vibrations. A Time-Delay Systems Approach. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 282 p. DOI: 10.1007/978-3-319-15747-4
4. Yang Liu, Wei Lin, Chávez J.P., De Sa R. Torsional stick-slip vibrations and multistability in drill-strings // Applied Mathematical Modelling. 2019. Vol. 76. P. 545-557. DOI: 10.1016/j.apm.2019.06.012
5. Liping Tang, Xiaohua Zhu, Xudong Qian, Changshuai Shi. Effects of weight on bit on torsional stick-slip vibration of oil well drill string // Journal of Mechanical Science and Technology. 2017. Vol. 31. № 10. P. 4589-4597. DOI: 10.1007/s12206-017-0905-7
6. Еришов М.С., Балицкий В.П., Мелик-Шахназарова И.А. Исследование работы привода постоянного тока ротора буровой установки в режиме неустойчивого вращения долота // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 11. С. 166-179. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-166-179
7. Еришов М.С., Комков А.Н., Феоктистов Е.А. Работа электроприводов постоянного и переменного тока ротора буровой установки в режиме неустойчивого вращения долота // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 6. С. 153-167. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_153
8. Еришов М.С., Феоктистов Е.А. Влияние режима неустойчивого вращения долота на энергоэффективность электропривода ротора буровой установки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 1. С. 148-161. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_148



9. Dardan Klimenta, Antti Hannukainen, Antero Arkkio. Estimating the parameters of induction motors in different operating regimes from a set of data containing the rotor cage temperature // Electrical Engineering. 2018. № 100. Р. 139-150. DOI: 10.1007/s00202-016-0497-8
10. Vaziri V., Oladunjoye I.O., Kapitaniak M. et al. Parametric analysis of a sliding-mode controller to suppress drill-string stick-slip vibration // Meccanica. 2020. № 55. Р. 2475-2492. DOI: 10.1007/s11012-020-01264-5
11. Двойников М.В. Исследования технико-технологических параметров бурения наклонных скважин // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 86-92. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.86
12. Долгий И.Е., Николаев Н.И. Сопротивление горных пород разрушению при бурении скважин // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 655-660. DOI: 10.18454/PMI.2016.5.655
13. Saldivar B., Mondié S., Ávila Vilchis J.C. The control of drilling vibrations: A coupled PDE-ODE modeling approach // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 2016. Vol. 26. № 2. Р. 335-349. DOI: 10.1515/amcs-2016-0024
14. Погорелов Д.Ю., Лысиков Н.Н. Силы взаимодействия долота с породой при компьютерном моделировании динамики бурильной колонны // Нефтегазовое дело. 2019. № 3. С. 211-236.
15. Коронатов В.А. Основы математической строгой теории глубокого бурения // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 2 (46). С. 23-29. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-2-23-29
16. Kunshin A., Dvoynikov M., Timashev E., Starikov V. Development of Monitoring and Forecasting Technology Energy Efficiency of Well Drilling Using Mechanical Specific Energy // Energies. 2022. Vol. 15 (19). DOI: 10.3390/en15197408
17. Kadocnikov V.G., Dvoynikov M.V. Development of Technology for Hydromechanical Breakdown of Mud Plugs and Improvement of Well Cleaning by Controlled Buckling of the Drill String // Applied Sciences. 2022. Vol. 12 (13). DOI: 10.3390/app12136460
18. Лукьянов Э.Е., Кудашева С.В. Методические рекомендации по интерпретации данных ГТИ. Новосибирск: Историческое наследие Сибири, 2016. 512 с.
19. Vromen T.G.M., Dai C.H., Van de Wouw N. et al. Mitigation of torsional vibrations in drilling systems: a robust control approach // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2019. Vol. 27. Iss. 1. № 8094252. Р. 249-265. DOI: 10.1109/TCST.2017.2762645
20. Tengesdal N.K., Hovda S., Holden C. A Discussion on the Decoupling Assumption of Axial and Torsional Dynamics in Bit-rock Models // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 202. № 108070. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108070
21. Amorim Jr.D.S., Santos O.L.A., Azevedo R.C. New industry standards to increase the reliability of drilling operations // Holos. 2019. Vol. 6. Р. 1-14. DOI: 10.15628/Holos.2019.9009
22. Нескоромных В.В., Попова М.С., Головченко А.Е.и др. Методика управления процессом бурения и экспериментальные исследования сил сопротивления при бурении долотами с резцами PDC // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 539-546. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.5
23. Нескоромных В.В., Чихоткин А.В. Аналитическое исследование механики разрушения горных пород резцами PDC с учетом динамических процессов резания-скалывания горной породы и сопротивления среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 4. С. 127-136. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-127-136
24. Нескоромных В.В., Попова М.С., Зотов З.Г., Лиу Баочанг. Алгоритм управления системой алмазного бурения // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 2. С. 81-89. DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3562
25. Abdul Rani A.M., Khairiyah I., Ab Adzis A.H. et al. Investigation on the effect of changing rotary speed and weight bit on PCD cutter wear // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2020. Vol. 10. Р. 1063-1068. DOI: 10.1007/s13202-019-00795-2
26. Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Борисов К.А. Влияние крутильных и продольных колебаний на скорость бурения и образование поломок режущих элементов буровых долот, армированных PDC // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 12. С. 135-141. DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2410
27. Борисов К.А., Третьяк А.А., Сидорова Е.В. Влияние вибраций на прочностные свойства буровых долот // Разведка и охрана недр. 2019. № 12. С. 33-37.
28. Третьяк А.Я., Сидорова Е.В., Литкевич Ю.Ф. и др. Контроль ресурса PDC-пластин бурового долота // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 8. С. 28-35. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3302
29. Литвиненко В.С., Двойников М.В. Методика определения параметров режима бурения наклонно прямолинейных участков скважины винтовыми забойными двигателями // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 105-112. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.105
30. Нескоромных В.В., Попова М.С. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 701-710. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.701
31. Козярук А.Е. Опыт создания и перспективы развития электромеханических комплексов – технологических, движения и позиционирования технических средств освоения шельфа // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 701-705. DOI: 10.18454/PMI.2016.5.701
32. Zhiqiang Huang, Yachao Ma, Qin Li, Dou Xie. Geometry and force modeling, and mechanical properties study of polycrystalline diamond compact bit under wearing condition based on numerical analysis // Advances in Mechanical Engineering. 2017. Vol. 9 (6). Р. 1-15. DOI: 10.1177/1687814017702080
33. Guohui Zhang, Xiwen Zhang, Rong Chen et al. Pediction method of rock stratum anti-diamond characteristics of carbonate rocks used in Qinghai YingXi block // 2018 3rd International Conference on Advances in Energy and Environment Research (ICAEER 2018), September 2018, Guilin, China. E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 53 (12). № 03002. Р. 1-5. DOI: 10.1051/e3sconf/20185303002
34. Залеев М.Ф. Исследование вибрации при бурении скважин на Термокарстовом газоконденсатном месторождении // Нефтегазовое дело. 2015. № 4. Т. 13. С. 36-40.
35. Леонов Г.А., Киселева М.А. Устойчивость электромеханических моделей буровых установок при резкопеременных нагрузках // Доклады Академии наук. 2012. Т. 444. № 2. С. 160-164.

36. *Dvoynikov M.V., Nutskova M.V., Blinov P.A.* Developments Made in the Field of Drilling Fluids by Saint Petersburg Mining University // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. 2020. Vol. 33. Iss. 4. P. 702-711. DOI: 10.5829/IJE.2020.33.04A.22
37. *Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V.* Monitoring and control of the drilling string and bottomhole motor work dynamics // Topical Issues of Rational use of Natural Resources. 2019. Vol. 2. P. 804-809. DOI: 10.1201/9781003014638-42
38. *Guangjian Dong, Ping Chen.* A Review of the Evaluation, Control, and Application Technologies for Drill String Vibrations and Shocks in Oil and Gas Well // Shock and Vibration. 2016. № 7418635. 34 p. DOI: 10.1155/2016/7418635
39. *Ritto T.G., Ghandchi-Tehrani M.* Active control of stick-slip torsional vibrations in drill-strings // Journal of Vibration and Control. 2018. Vol. 25. Iss.1. P. 1-9. DOI: 10.1177/1077546318774240
40. *Pérez-Aracil J., Camacho-Gómez C., Pereira E. et al.* Eliminating Stick-Slip Vibrations in Drill-Strings with a Dual-Loop Control Strategy Optimised by the CRO-SL Algorithm // Mathematics 2021. Vol. 9. № 1526. DOI: 10.3390/math9131526
41. *Pavković D., Šprljan P., Cipek M., Krznar M.* Cross-axis control system design for borehole drilling based on damping optimum criterion and utilization of proportional-integral controllers // Optimization and Engineering. 2021. Vol. 22. P. 51-81. DOI: 10.1007/s11081-020-09566-z
42. *Wei Lin, Paez Chavez J., Yang Liu et al.* Stick-slip suppression and speed tuning for a drill-string system via proportional-derivative control // Applied Mathematical Modelling. 2020. Vol. 82. P. 487-502. DOI: 10.1016/j.apm.2020.01.055
43. *Vaziri V., Kapitaniak M., Wiercigroch M.* Suppression of drill-string stick-slip vibration by sliding mode control: Numerical and experimental studies // European Journal of Applied Mathematics. 2018. Vol. 29. Iss. 5. P. 805-825. DOI: 10.1017/S0956792518000232
44. *Литвиненко В.С., Двойников М.В.* Обоснование выбора параметров режима бурения скважин роторными управляемыми системами // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 24-29. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.24
45. *MacLean J.D.J., Vaziri V., Aphalec S.S., Wiercigroch M.* Feedback control method to suppress stick-slip in drill-strings featuring delay and actuation constraints // The European Physical Journal Special Topics. 2021. Vol. 230. P. 3627-3642. DOI: 10.1140/epjs/s11734-021-00228-4
46. *Симонянц С.Л., Аль Тии М.* Стимулирование процесса бурения верхним силовым приводом с использованием винтового забойного двигателя // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 438-442. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.438
47. *Dvoynikov M.V., Sidorkin D.I., Kunshin A.A., Kovalev D.A.* Development of hydraulic turbodrills for deep well drilling // Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11. Iss. 16. DOI: 10.3390/app11167517
48. *Dvoynikov M., Kunshin A., Blinov P., Morozov V.* Development of Mathematical Model for Controlling Drilling Parameters with Screw Downhole Motor // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. 2020. Vol. 33. Iss.7. P. 1423-1430. DOI: 10.5829/IJE.2020.33.07A.30
49. *Podoliak A.V., Blinov P.A.* The technology of directional drilling in ice via drills on carrying cable // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11 (9). P. 6411-6417.

Авторы: **М.С.Ершов**, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-7772-0095> (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, Россия), **А.Н.Комков**, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0002-1010-6971> (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, Россия), **Е.А.Феоктистов**, студент, <https://orcid.org/0000-0002-9490-3854> (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Оценка энергоэффективности функционирования и увеличение наработки гидравлических приводов установок штанговых скважинных насосов в осложненных условиях эксплуатации

Д.И.ШИШЛЯННИКОВ¹, В.Ю.ЗВЕРЕВ¹, А.Г.ЗВОНАРЕВА²✉, С.А.ФРОЛОВ¹, А.А.ИВАНЧЕНКО¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Шишлияников Д.И., Зверев В.Ю., Звонарева А.Г., Фролов С.А., Иванченко А.А. Оценка энергоэффективности функционирования и увеличение наработки гидравлических приводов установок штанговых скважинных насосов в осложненных условиях эксплуатации // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 349-362. EDN XLRCWN

Аннотация. Обоснована необходимость совершенствования приводов установок штанговых скважинных насосов (УШСН), эксплуатирующихся в условиях малодебитных и осложненных скважин. Для осложненных условий нефтедобычи перспективно применение гидравлического привода УШСН, позволяющего подбирать и устанавливать рациональные режимы работы скважинного оборудования. Приведены результаты сравнительных испытаний традиционных механических и гидравлических приводов УШСН с пневматическим и электродинамическим типами уравновешивания. Предложен обобщенный показатель оценки эффективности функционирования перспективных гидроприводов УШСН – коэффициент энергоэффективности. Экспериментально доказано, что использование гидравлического привода УШСН с пневматическим уравновешиванием характеризуется низкой энергоэффективностью процесса добычи скважинной жидкости. Применение испытываемого гидропривода УШСН позволило успешно устранить асфальтосмолопарафиновые отложения и минимизировать время простоя скважины. Результаты испытаний традиционного механического привода УШСН и гидравлического привода с электродинамическим уравновешиванием показали удовлетворительную энергоэффективность последнего. Достоинством гидравлического привода УШСН с электродинамическим уравновешиванием является простота конструкции гидравлической части. Процесс рекуперации электроэнергии при работе системы управления привода обуславливает увеличение реактивной составляющей мощности в сети нефтепромысла и появление гармонических помех, негативно сказывающихся на работе потребителей. Предложены технические решения, направленные на повышение энергоэффективности функционирования и увеличение наработки гидравлических приводов УШСН в условиях малодебитных и осложненных скважин. Приведены методические основы оценки экономической эффективности внедрения перспективных гидроприводов УШСН.

Ключевые слова: установка штангового скважинного насоса; гидропривод; энергоэффективность; уравновешивание; сравнительные испытания; осложненные условия эксплуатации

Благодарность. Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № ФСНМ-2023-0005).

Поступила: 14.03.2023

Принята: 20.06.2023

Онлайн: 19.07.2023

Опубликована: 19.07.2023

Введение. Значительное количество добывающих скважин на нефтяных промыслах России и стран ближнего зарубежья находится на завершающих (третьей и четвертой) стадиях эксплуатации. Такие скважины характеризуются малыми дебитами ($Q = 1-15 \text{ м}^3/\text{сут}$) и наличием факторов, осложняющих работу погружного оборудования [1-3]. Эксплуатация малодебитных и осложненных нефтяных скважин осуществляется преимущественно с использованием установок штанговых скважинных насосов (УШСН), оснащенных механическим приводом – балансирными станками-качалками (СК) [4]. В диапазонах подач штанговых насосов $Q = 30-45 \text{ м}^3/\text{сут}$ УШСН характеризуется достаточно высокой энергоэффективностью, КПД исправной установки составляет $\eta = 0,36-0,54$.



Наличие осложняющих факторов и низкие дебиты скважин обуславливают резкое уменьшение КПД УШСН ($\eta = 0,02\text{--}0,05$ при коэффициенте мощности приводных электродвигателей СК, не превышающем $\cos\varphi = 0,3$) [5]. В результате показатели работы УШСН существенно снижаются, а затраты на добычу нефти, напротив, неоправданно повышаются [6]. Величина удельных энергозатрат на подъем скважинной жидкости с использованием УШСН традиционных конструкций для малодебитных и осложненных скважин в 5-10 раз превышает аналогичные значения для средне- и высокодебитных скважин [7, 8].

Применение безбалансирных приводов УШСН, позволяющих обеспечить длинноходовые режимы работы скважинных насосов и повысить энергоэффективность установок при эксплуатации малодебитных скважин, ограничивается низкой надежностью гибких связей – цепей, клиновых ремней, стальных канатов и др. Это обуславливает необходимость частого выполнения замен недолговечных элементов гибких связей, возникновение простоев оборудования и, как следствие, значительных материальных потерь нефтедобывающих предприятий.

В трудах отечественных и зарубежных исследователей указывается, что одним из путей повышения эффективности и надежности функционирования УШСН при эксплуатации малодебитных и осложненных скважин является использование гидравлического привода (ГП) [9, 10]. Гидропривод УШСН характеризуется мобильностью, малой материалоемкостью, простотой регулировки и широкими диапазонами изменения режимных параметров работы. Указанные достоинства позволяют подбирать и устанавливать режимы работы ГП УШСН, рациональные по величине удельных затрат энергии на подъем пластовой жидкости, а также повышать эффективность выполнения технических и технологических мероприятий по устранению негативных последствий осложняющих факторов [11, 12].

Задачи по оценке энергоэффективности функционирования серийно выпускаемых ГП УШСН и разработке технических решений, направленных на повышение надежности их работы в осложненных условиях эксплуатации, являются актуальными, представляют научный и практический интерес.

Методы. Разработка и опытная эксплуатация ГП УШСН начата в США в 40-х годах XX в. Специалистами компаний Vickers, Pelton, Axelson созданы и испытаны оригинальные конструкции ГП УШСН, которые имели худшие эксплуатационные характеристики по сравнению с балансирными СК, что обусловило их малое распространение. В то же время компактность, мобильность и широкие возможности автоматизации работы данных приводов определили перспективность исследований, направленных на их дальнейшее совершенствование. Отечественными специалистами разработаны ГП УШСН, конструктивные схемы которых аналогичны схемам, применяемым за рубежом, а также предложены оригинальные решения, например установка АГН конструкции проф. Г.В.Молчанова [11]. Общая классификация ГП УШСН по конструктивным признакам приведена в табл.1.

Таблица 1

Классификация ГП УШСН по конструктивным признакам [11]

Кинематическая связь силового органа и уравновешивающего устройства	Способ уравновешивания					Неуравновешенный
	Статический			Динамический		
Пневматический	Грузовой	Взаимный	Инерционный	Электродинамический	–	Неуравновешенные приводы
Гидравлическая	Привод с пневматическим аккумулятором	Привод с отдельными грузами. Установки с НКТ в качестве уравновешивающего груза	Взаимное уравновешивание двух и более установок	Использование маховика с индивидуальным приводом	–	Частично уравновешенные приводы
Механическая жесткая	–	Балансирная жесткая связь	–	Использование маховика, установленного на валу двигателя	Работа двигателя в генераторном режиме	–
Механическая гибкая	–	Уравновешивающий груз на канатной подвеске	–	–	–	–



Современные серийно выпускаемые образцы ГП УШСН оснащаются системами мониторинга параметров работы и самодиагностики: посредством контроля значений давлений в нагнетательных трубопроводах осуществляется динамометрирование, т.е. оценка нагруженности, технического состояния и эффективности функционирования глубинно-насосного оборудования. Контроль положения точки подвеса колонны штанг, величину хода полированного штока и частоту качаний осуществляют посредством датчиков (отметчиков магнитного типа).

К факторам, в наибольшей степени влияющим на эффективность функционирования ГП УШСН и величину их наработки в условиях нефтяного промысла, относятся: принятый способ уравновешивания; качество выполненного уравновешивания; способ передачи энергии от уравновешивающего устройства к силовому органу; конструкция силового органа [5].

Выбор уравновешивающего устройства гидропривода УШСН осуществляется с учетом его энергоемкости, устойчивости функционирования (приведенной долговечности), технологии предварительной зарядки при первоначальном пуске, а также при поддержании и регулировании режима работы установки (табл.2) [11].

Таблица 2

Основные параметры уравновешивающих устройств ГП УШСН

Параметр	Уравновешивающее устройство		
	Пневматическое	Грузовое	Инерционное
Удельная энергоемкость, кДж/кг	25-30	1-6	100-200
КПД, %	97	98	95
Время хранения энергии, ч	Не ограничено	Не ограничено	0,05-0,1
Число циклов «заряд-разряд»	10^7	Не ограничено	Не ограничено
Приведенная долговечность (в расчете на 1 м хода ТПКШ), ч	$1,7 \cdot 10^4$	Не ограничено	Не ограничено

Задача уравновешивания гидропривода УШСН на практике может быть решена несколькими способами, отличающимися принимаемыми критериями уравновешенности [13]: уравновешивание по максимальным нагрузкам, по величине среднего значения работы или среднеквадратичного отклонения от среднего значения работы. Эти критерии разработаны для балансирных СК, для которых характерен режим нагрузки на двигатель, отличный от нагруженности двигателя гидропривода УШСН. Для уравновешенного балансирного СК закон изменения крутящего момента на валу двигателя близок к синусоиде, а для уравновешенного гидропривода он характеризуется линией, близкой к прямой [1].

Привод УШСН считается идеально уравновешенным, если мгновенная мощность в любой момент времени будет постоянной и равной средней мощности, развиваемой двигателем за один цикл работы привода [14]. Поскольку постоянство мгновенной мощности электродвигателя в течение цикла работы ГП УШСН обеспечить затруднительно, то условие уравновешенности определяют, исходя из минимума дисперсии мощности за полный цикл работы привода УШСН [11]. Из указанного следует, что оценку качества уравновешивания и энергоэффективность функционирования ГП УШСН в условиях нефтяного промысла рационально определять посредством непрерывных замеров мощности электродвигателя в процессе функционирования привода и последующего анализа полученных ваттметrogramм [15, 16].

На нефтяных промыслах России и стран ближнего зарубежья наибольшее распространение получили ГП УШСН с пневматическим и электродинамическим уравновешиванием. Они состоят из насосной станции и силового гидроцилиндра, обеспечивающего возвратно-поступательное движение точки подвеса колонны насосных штанг (ТПКШ), оснащаются системами дистанционного управления, удаленного мониторинга и встроенным системами самодиагностики, что позволяет оперативно изменять параметры работы ГП УШСН и скважинного оборудования [11].

Совместно со специалистами ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь» выполнены исследования по оценке нагруженности и энергоэффективности функционирования ГП УШСН с пневматическим и электродинамическим уравновешиванием. Программа исследований предусматривала выполнение сравнительных испытаний приводов УШСН – механических балансирных приводов СК-8 и серийно выпускаемых ГП УШСН: с пневматическим уравновешиванием НПК-10-8-6 (рис.1, а); с электродинамическим уравновешиванием ГПШСН 80-3,5 «Гейзер» (рис.1, б).

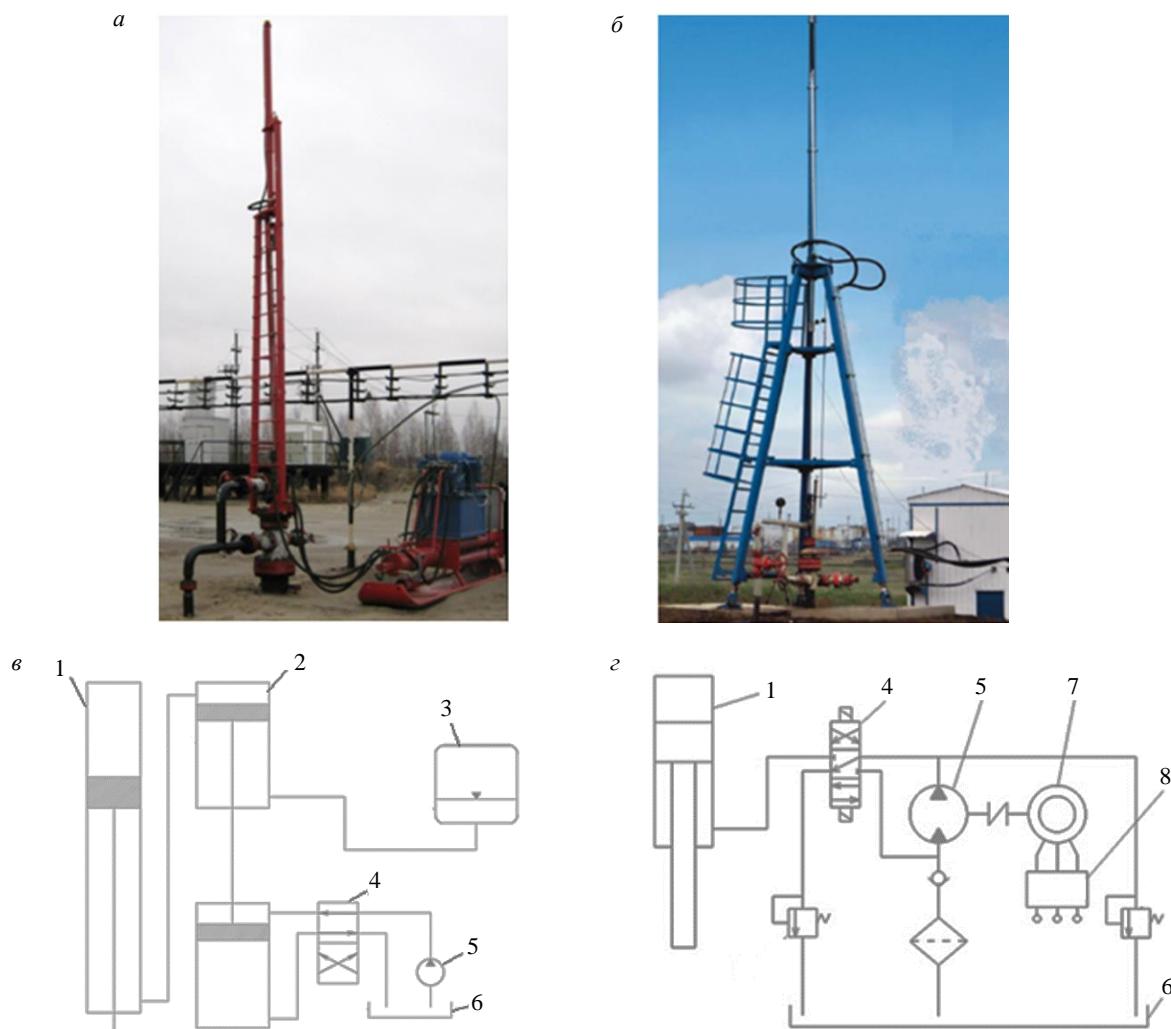


Рис.1. Общий вид (а, б) и принципиальные гидравлические схемы (в, г) приводов УШСН: а, в – НПК-10-8-6; б, г – ГППШН 80-3,5 «Гейзер»

1 – силовой гидроцилиндр; 2 – промежуточный гидроцилиндр; 3 – пневмоаккумулятор; 4 – гидрораспределитель; 5 – гидронасос; 6 – бак; 7 – электродвигатель; 8 – блок интеллектуальной системы управления

Оценка характера изменения и величины нагруженности приводов УШСН, определение энергетических показателей работы обследуемых насосных установок осуществлялись с использованием программно-регистрирующего комплекса «АКД-СК» производства ООО «НПП «РОС» (Пермь). Комплекс предназначен для мониторинга энергетических параметров приводных электродвигателей УШСН, выпускается серийно, сертифицирован как средство измерения (номер в Госреестре средств измерений 19988-10). Диапазоны измерения мощности 4-30 кВт, частота опроса каналов до 1 кГц, основная приведенная погрешность измерений не более 5 %. Комплекс «АКД-СК» устанавливается стационарно в станцию управления УШСН, осуществляет непрерывную регистрацию ваттметрограмм двигателей УШСН, что позволяет контролировать величину энергопотребления, определять степень уравновешенности приводов УШСН, анализировать характер изменения нагрузок приводов в процессе мониторинга [17].

Программно-регистрирующий комплекс «АКД-СК» (рис.2, а) имеет модульное исполнение. Комплекс состоит из коммутационного блока, контроллера, датчика мощности и магнитного отметчика. Схема подключения программно-регистрирующего комплекса в станции управления УШСН приведена на рис.2, б. Магнитный отметчик позволяет фиксировать нижнее (верхнее) положение ТПКШ.

Параметры электродвигателей приводов УШСН определяются в соответствии с формулами:

- эффективное значение тока

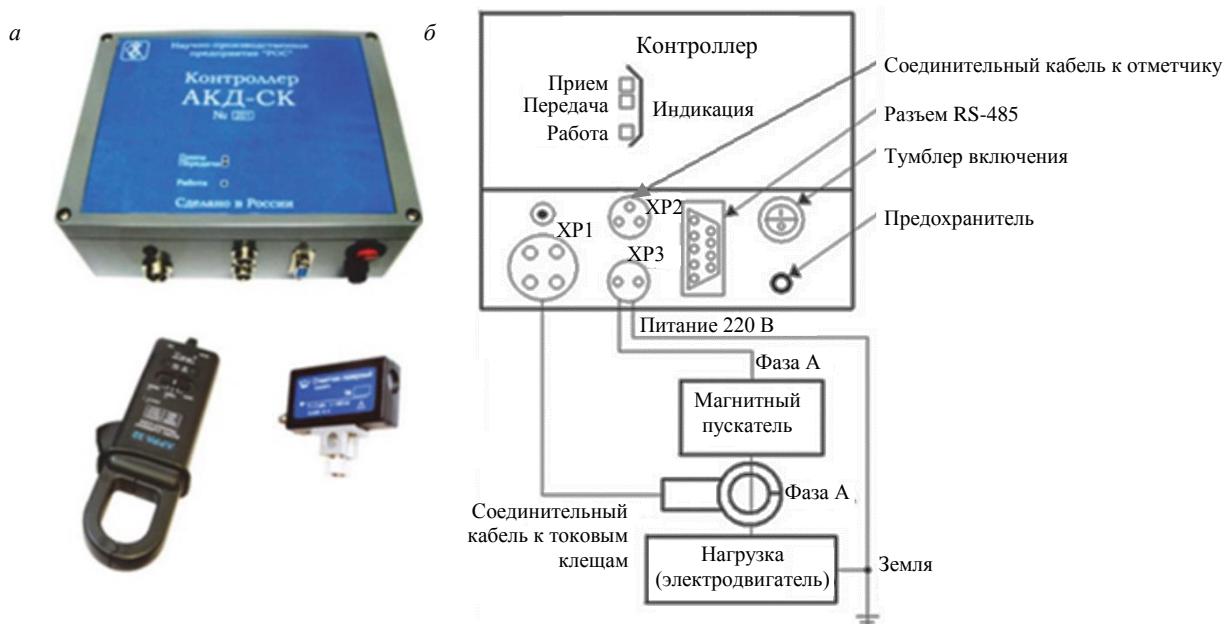


Рис.2. Программно-регистрирующий комплекс «АКД-СК»: *а* – общий вид; *б* – структурная схема

$$I_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n i_m^2},$$

где n – число точек измерения за фиксированный интервал времени ΔT ; i_m – мгновенное значение тока в m -й момент времени, А;

- эффективное значение напряжения

$$U_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n u_m^2},$$

u_m – мгновенное значение фазного напряжения в m -й момент времени, В.

Активные N_a (кВт) и полные S_w (кВА) мощности электродвигателя привода УШСН рассчитываются в соответствии с формулами:

$$N_a = \frac{3}{n} \sum_{m=1}^n u_m i_m;$$

$$S_w = 3 I_{\text{эфф}} U_{\text{эфф}}.$$

Коэффициент мощности определяется выражением

$$\cos \varphi = N_a / S_w.$$

Данные эксплуатационного контроля сохраняются в энергонезависимой памяти прибора. По запросу инженерно-технических специалистов нефтяного промысла они передаются в операторскую сеть. С использованием специализированного программного обеспечения реализуется анализ и визуализация информации, полученной в ходе мониторинга.

В качестве примера на рис.3 представлена ваттметрограмма, полученная при работе двигателя балансирного станка-качалки СК-8 [18].

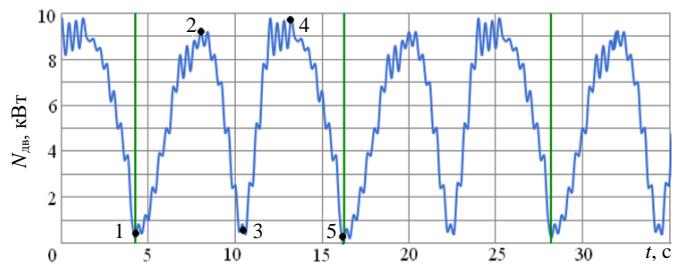


Рис.3. Ваттметрограмма двигателя балансирного СК-8: нижнее (1, 5), горизонтальное (2, 4) и верхнее (3) положение кривошипа



Отметчик (зеленый цвет) показывает верхнее положение ТПКШ, что соответствует нижнему положению кривошипа. Каждый цикл перемещения головки балансира (одно качание) механического СК характеризуется двумя максимумами мощности, разница между значениями которых (для уравновешенных СК) не должна превышать 10 % [11].

Дебит скважин, на которых проводились исследования, определялся по показаниям автоматизированных групповых замерных установок, оснащенных поверенными средствами измерений. Исследования выполнялись в два этапа. Сначала замеры проводились на скважине, оборудованной УШСН с механическим приводом типа СК-8. Затем СК заменялся ГП и выполнялся тот же объем испытаний, что позволяло корректно получить сравнительную оценку энергоэффективности функционирования приводов УШСН [19].

Среднесуточные удельные затраты энергии на добычу скважинной жидкости при работе УШСН рассчитывались по формуле

$$H_{w,i} = \Sigma W_{\text{сут},i} / Q_{\Phi,i},$$

где $\Sigma W_{\text{сут},i}$ – суммарные затраты энергии на работу УШСН за i -е сутки работы, кВт·ч; $Q_{\Phi,i}$ – производительность УШСН за i -е сутки работы, м³/сут.

Средняя величина удельных энергозатрат на добычу скважинной жидкости при работе УШСН за период t рассчитывалась по формуле

$$H_w = \sum_{i=1}^t H_{w,i} / t.$$

Сравнительная оценка эффективности функционирования перспективных гидравлических приводов УШСН осуществлялась посредством определения величины коэффициента энергоэффективности привода в соответствии с формулой

$$k_{\text{э.эф}} = H_{w,6} / H_{w,\text{ис}},$$

где $H_{w,6}$ – средняя величина удельных энергозатрат на добычу скважинной жидкости при работе УШСН, оснащенной балансирным СК (базовая величина удельных энергозатрат), кВт·ч/м³; $H_{w,\text{ис}}$ – средняя величина удельных энергозатрат на добычу скважинной жидкости при работе испытываемого ГП УШСН, кВт·ч/м³.

Перспективный привод ГП УШСН с пневматическим уравновешиванием испытывался на скважине 1096 Обливского месторождения. Программой сравнительных испытаний предусматривалось определение удельных затрат энергии на добычу пластовой жидкости при работе УШСН, оснащенной механическим приводом типа СК-8 и гидравлическим приводом НПК-10-8-6. Параметры испытываемой УШСН: глубина подвески насоса $L = 1534,9$ м; длина хода штока $S_0 = 2,5$ м; число двойных ходов $n = 5,5 \text{ мин}^{-1}$. Удельные затраты энергии на подъем скважинной жидкости при оснащении УШСН гидравлическим приводом НПК-10-8-6 составили $H_{w,\text{ис}} = 25,6 \text{ кВт·ч/м}^3$, что почти вдвое выше, чем на балансирном механическом СК-8 ($H_{w,6} = 12,8 \text{ кВт·ч/м}^3$), с использованием которого исследуемая скважина эксплуатировалась ранее (табл.3). Значение коэффициента энергоэффективности составило $k_{\text{э.эф}} = 0,45$.

Таблица 3

Результаты испытаний ГП УШСН

Тип привода	Гидропривод НПК-10-8-6			ГПШСН 80-3,5 «Гейзер»	
	СК-8	НПК-10-8-6	НПК-10-8-6	СК-8	ГПШСН 80-3,5 «Гейзер»
Применяемые двигатели	22 кВт; 970 об/мин	15 кВт; 1480 об/мин	15 кВт; 1480 об/мин	22 кВт; 970 об/мин	37 кВт; 1480 об/мин
Параметры эксплуатации	$S_0 = 2,5$ м; $n = 5,5 \text{ мин}^{-1}$	$S_0 = 2,5$ м; $n = 5,5 \text{ мин}^{-1}$	$S_0 = 5,0$ м; $n = 1,8 \text{ мин}^{-1}$	$S_0 = 2,5$ м; $n = 5,5 \text{ мин}^{-1}$	$S_0 = 2,5$ м; $n = 5,5 \text{ мин}^{-1}$
Время замеров, сут	9	7	42	6	5
Среднесуточное потребление энергии, кВт·ч/сут	123,8	294,0	228,6	117,0	128,9
Среднесуточный дебит жидкости, м ³ /сут	9,7	11,5	9,7	10,4	10,1
Удельные затраты энергии, кВт·ч/м ³	12,8	25,6	23,6	11,25	12,76
Коэффициент энергоэффективности	–	0,45	0,54	–	0,88



Анализ ваттметрограмм, полученных при обследовании гидропривода с пневматическим уравновешиванием, показал, что в данных условиях максимальное значение мощности при подъеме ТПКШ составляет $N_{\text{дв}} = 12,1 \text{ кВт}$, а при опускании штока $N_{\text{дв}} = 4,8 \text{ кВт}$ (рис.4, а).

По мере движения ТПКШ вверх нагрузженность приводного двигателя увеличивается, так как расходуется энергия, запасенная пневмоаккумулятором (см. рис.1, в, поз. 3). Недостаточный объем последнего обуславливает наличие выраженных пиков в сигнале активной мощности электродвигателя испытываемого ГП УШСН. Существенное влияние на процесс формирования нагрузок оказывает наличие асфальтосмолопарафиновых отложений в скважине: колонна насосных штанг и плунжер насоса перемещаются неравномерно, периодически «подвисая», что обуславливает появление локальных пиков и провалов мощности на ваттметрограмме электродвигателя испытываемого ГП УШСН (рис.4, а).

Для снижения удельных энергозатрат на добычу нефти выполнена замена штангового насоса в скважине. Длина хода штока УШСН увеличена до $S_0 = 5,0 \text{ м}$, число двойных ходов уменьшено до $n = 1,8 \text{ мин}^{-1}$. Отмечено незначительное снижение удельных затрат энергии на добычу скважинной жидкости (до $H_{\text{в.ис}} = 23,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$). Коэффициент энергоэффективности увеличился до $k_{\text{эф}} = 0,54$. Высокие удельные затраты энергии и неравномерность нагрузок при работе ГП УШСН НПК-10-8-6 обусловлены несовершенством выбранного способа уравновешивания: энергии, запасаемой пневмоаккумулятором при обратном ходе ТПКШ, объективно недостаточно для существенного уменьшения мощности привода при рабочем ходе.

Широкие диапазоны регулирования режимных параметров работы ГП позволяют успешно применять их в осложненных условиях функционирования УШСН. Например, в процессе опытной эксплуатации перспективного гидравлического привода НПК-10-8-6 зафиксировано отключение привода по причине зависания колонны насосных штанг из-за образования в насосно-компрессорном трубопроводе асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) [20-22]. Запуск привода в режиме реанимации скважины (частота качаний и длина хода автоматически изменяются в зависимости от нагрузки в ТПКШ) при установленном числе качаний $n = 1 \text{ мин}^{-1}$ и длине хода штока $S_0 = 0,5 \text{ м}$ совместно с подачей горячей нефти в затрубное пространство позволил промыть АСПО. Через 2 ч работы привода в указанном режиме ход штока увеличился до установленного значения $S_0 = 2,5 \text{ м}$, через 3 ч нагрузка в ТПКШ нормализовалась, работа УШСН возвращена к номинальному режиму без проведения текущего ремонта скважины [15].

Сравнительные испытания УШСН, оснащенной механическим приводом типа балансирный станок-качалка СК-8 и гидроприводом с электродинамическим уравновешиванием ГПШСН 80-3,5 «Гейзер», проводились на скважине 404 Сосновского месторождения. Отличительной особенностью схемы данного гидропривода является наличие блока интеллектуальной электронной системы управления (ИЭСУ) приводным электродвигателем маслостанции (см. рис.1, г, поз. 7, 8), в состав которой входят частотный преобразователь и инвертор [23].

В ходе испытаний скважина эксплуатировалась со следующими параметрами УШСН: глубина подвески насоса $L = 1560,1 \text{ м}$; длина хода штока $S_0 = 2,5 \text{ м}$; число двойных ходов $n = 5 \text{ мин}^{-1}$ (табл.3). Удельные затраты энергии на подъем скважинной жидкости при работе УШСН, оснащенной

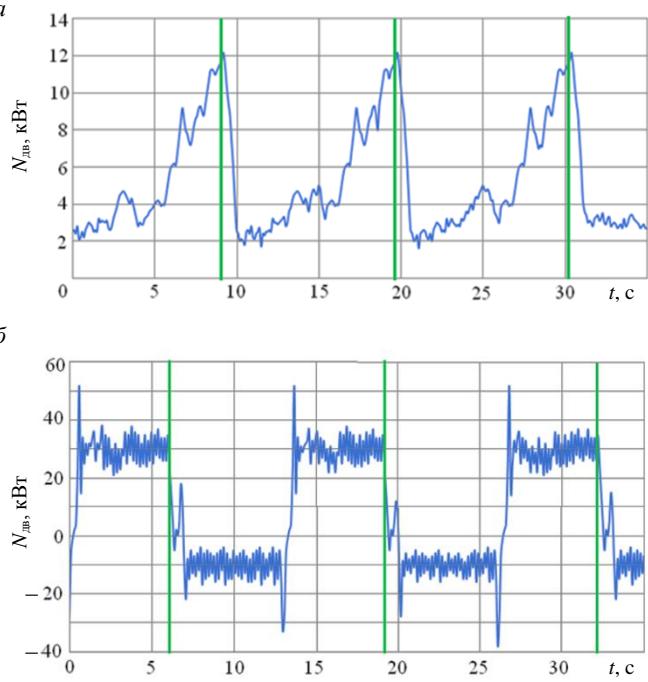


Рис.4. Изменение мощности приводного двигателя:
а – насосной станции гидропривода НПК-10-8-6 с пневматическим уравновешиванием; б – насосной станции ГПШСН 80-3,5 «Гейзер» с электродинамическим уравновешиванием [24]; верхнее положение ТПКШ показано зеленым цветом



гидроприводом ГПШСН 80-3,5 «Гейзер», составили $H_{w,ic} = 12,76 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$, что несколько выше значений удельных энергозатрат, полученных при замерах на механическом приводе СК-8 ($H_{w,6} = 11,25 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$), с использованием которого данная скважина эксплуатировалась ранее. На ваттметрограмме двигателя насосной станции ГПШСН 80-3,5 «Гейзер» (рис.4, б) можно выделить участки рабочего и обратного хода штока силового гидроцилиндра [24].

При рабочем ходе двигатель насосной станции ГП с электродинамическим уравновешиванием работает с номинальной нагрузкой, коэффициент мощности составляет $\cos\phi = 0,85$. При опускании штока силового гидроцилиндра двигатель ГПШСН 80-3,5 «Гейзер» рекуперирует в сеть нефтепромысла 25-29 % энергии, что соответствует результатам аналогичных исследований [7].

Энергия, рекуперируемая в сеть нефтепромысла ИЭСУ насосной станции ГПШСН 80-3,5 «Гейзер», характеризуется наличием высших гармоник в сигналах токов и напряжений, что обусловлено работой частотного преобразователя. Искажение формы сигнала напряжения негативно сказывается на работе потребителей электроэнергии: снижается эффективность процессов генерации, передачи и использования энергии в сети нефтяного промысла; происходит старение изоляции электрооборудования; увеличиваются потери в обмотках электрических машин [15, 25, 26].

Обсуждение результатов. Оба испытываемых ГП УШСН показали меньшую энергоэффективность по сравнению с традиционными механическими приводами СК-8. Общим недостатком ГП УШСН с пневматическим уравновешиванием является использование двух рабочих агентов – газа и жидкости, что обуславливает необходимость применения двух отдельных систем компенсации утечек. В большинстве моделей ГП УШСН с пневматическим уравновешиванием частота двойных ходов штока силового гидроцилиндра регулируется увеличением паузы между ходами из-за меньшей надежности регулируемых насосов по сравнению с насосами с постоянной подачей. Это существенно снижает энергоэффективность работы рассмотренных гидроприводов. Тем не менее ряд производителей продолжают выпуск и продажу на рынке приводов УШСН с пневматическим уравновешиванием, так как удовлетворительные регулировочные характеристики и меньшая по сравнению с механическими СК металлоемкость позволяют успешно использовать описанные ГП УШСН в осложненных условиях эксплуатации скважинного оборудования.

Достоинством ГП УШСН с динамическим и электродинамическим уравновешиванием является простота конструкции гидравлической части. Открытый тип гидропередачи не предусматривает использования дополнительного оборудования для компенсации утечек. Регулирование режимных параметров осуществляется посредством использования частотного привода, что позволяет использовать в конструкции объемные мотор-насосы постоянной подачи.

Следует отметить существенные недостатки рассмотренных приводов. Процесс рекуперации электроэнергии при работе ИЭСУ обуславливает увеличение реактивной составляющей мощности в сети нефтепромысла и появление гармонических помех (паразитной ЭДС), негативно сказывающихся на работе потребителей [7, 27, 28]. Коррекция баланса мощности в промысловой сети обеспечивается путем установки дорогостоящих компенсирующих устройств, что повышает эксплуатационные затраты на содержание оборудования скважин [29].

Устранение данного недостатка возможно при использовании схемы коммутации потребителей электроэнергии в составе ГП УШСН с электродинамическим уравновешиванием, обеспечивающей накопление и использование рекуперируемой электроэнергии для работы вспомогательных потребителей и периферийных устройств УШСН (рис.5).

Суть разработанного авторами технического решения заключается в следующем. В схему потребителей рассматриваемого ГП УШСН устанавливаются реле обратного хода силового гидроцилиндра и аккумулятора электроэнергии. При подъеме штока силового гидроцилиндра и ТПКШ напряжение от питающей сети подается на частотный преобразователь (ЧП) и далее на электродвигатель М1 насосной станции гидропривода. Посредством ЧП обеспечивается регулирование частоты вращения ротора двигателя М1 и подачи насоса гидропривода, что позволяет изменять частоту ходов ТПКШ (n). Реле К обратного хода ГЦ обесточено, а его замкнутый контакт К.2 подает управляющий сигнал на замыкание автоматического выключателя питания аккумулятора напрямую из сети.

При опускании ТПКШ рабочая жидкость из штоковой полости силового гидроцилиндра подается в насос, который работает как гидромотор, раскручивая ротор двигателя М1. Двигатель М1

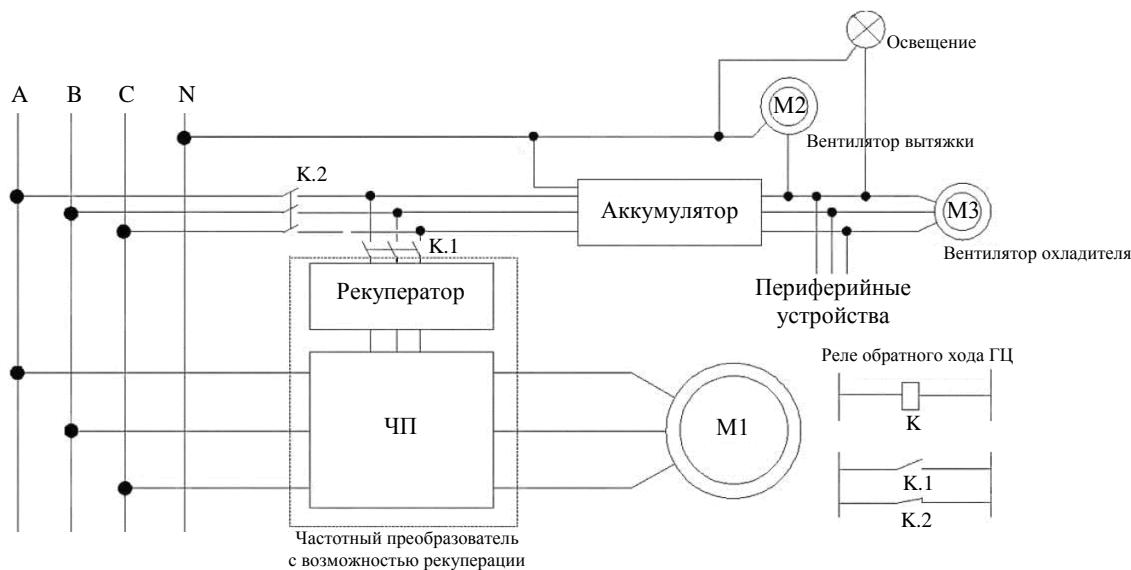


Рис.5. Схема коммутации потребителей электроэнергии в составе гидроприводов УШСН с электродинамическим уравновешиванием

функционирует в генераторном режиме. Выработанная электроэнергия через рекуператор и замкнувшийся автоматический выключатель, управляемый контактом К.1 реле К обратного хода гидроцилиндра, подается на аккумулятор и далее, по мере необходимости, расходуется при функционировании вспомогательных потребителей гидропривода. В качестве таковых могут выступать двигатель М2 вентилятора вытяжки в блок-боксе привода или двигатель М3 вентилятора охладителя рабочей жидкости (радиатора), осветительные приборы. Различные схемы подключения и применение электротехнической аппаратуры позволяют осуществить питание приемников разных родов и величин напряжения.

Электроэнергия от аккумулятора может расходоваться на работу периферийных устройств УШСН: штанговращателей, устройств локального нагрева, установок дозирования реагентов и др. Описанное техническое решение обеспечивает эффективное использование вырабатываемой и аккумулируемой энергии при работе ГП УШСН с электродинамическим уравновешиванием.

С точки зрения анализа кинематических параметров перемещения ТПКШ и нагрузок на электродвигатель обследуемый гидропривод «Гейзер» следует рассматривать как неуравновешенный. Данные приводы требуют оснащения электродвигателями повышенной мощности. Значительные динамические нагрузки обусловливают ускоренный расход ресурса приводов с электродинамическим уравновешиванием, что определяет повышение эксплуатационных затрат на их поддержание в рабочем состоянии.

Общим недостатком ГП УШСН с динамическим уравновешиванием является изменение направления противомомента от внешней нагрузки на валах мотор-насосов и приводных электродвигателей. Так как данные детали, как правило, имеют небольшие размеры в поперечных сечениях и сопрягаются с остальными узлами привода посредством шлицевых соединений, для них характерны частые отказы, связанные с усталостью металла и разрушением шлицев. Свыше 41 % отказов гидравлической части ГП УШСН с динамическим уравновешиванием возникают из-за выхода из строя аксиально поршневых насосов силовой гидропередачи. Это негативное явление характерно для приводов с электродинамическим уравновешиванием и для ГП УШСН с инерционным типом уравновешивания.

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что использование электродинамического и пневматического способов уравновешивания ГП УШСН негативно сказывается на энергоэффективности и надежности функционирования насосной установки в целом. Максимальным КПД и долговечностью характеризуются грузовые уравновешивающие устройства (см. табл.2).

В ГП УШСН с грузовым уравновешиванием в качестве аккумулятора энергии уравновешивающего устройства используется груз. Достоинством таких приводов является простота конструкции и надежность работы. В то же время данные ГП характеризуются увеличенной металлоемкостью, сравнимой с гидроприводами УШСН с пневматическим уравновешиванием, и худшей монтажеспособностью.

Авторами предложена и запатентована схема ГП УШСН с грузовым уравновешиванием (рис.6). Привод состоит из силового гидроцилиндра 1 и уравновешивающего грузогидравлического аккумулятора 2 (представляет собой вертикально установленный гидроцилиндр с грузами, закрепленными на штоке), штоковые полости которых соединены трубопроводом 3 как сообщающиеся сосуды. Трубопровод 3 через обратный клапан 4 соединен с полостью высокого давления 5 промежуточного двухстороннего цилиндра 6. В поршневые полости силового гидроцилиндра 1 и грузогидравлического аккумулятора 2 насосом 7 подается рабочая жидкость из маслобака 8 через гидрораспределитель 9. Очистка рабочей жидкости осуществляется фильтром 10. Защита насоса 7 от перегрузок реализуется предохранительным клапаном 11.

Нагнетание рабочей жидкости в полость низкого давления 12 и высокого давления 5 промежуточного двухстороннего цилиндра 6 осуществляется насосом 7 через гидрораспределитель 13. Слив рабочей жидкости из штоковых полостей силового гидроцилиндра 1 и грузогидравлического аккумулятора 2 осуществляется через двухпозиционный гидрораспределитель 14 через регулируемый дроссель 15. Рабочее давление в гидросистеме контролируется посредством манометров (датчиков давления) 16-18. Число качаний и ход штока силового гидроцилиндра 1 определяются по показаниям датчиков 19, сигналы с которых передаются в блок интеллектуального управления (БИУ) 20. В сливной магистрали ГП УШСН предусмотрено переключение потока жидкости распределителем 21 на управляемый дроссель 22 для демпфирования нагрузок на завершающих участках перемещения ТПКШ.

После заполнения гидросистемы рабочей жидкостью и установки описываемого ГП УШСН над устьем скважины его работа осуществляется следующим образом. Шток силового гидроцилиндра 1 соединяется с колонной насосных штанг и плунжером скважинного насоса. Подъем штока силового цилиндра 1 осуществляется посредством нагнетания рабочей жидкости насосом 7 из бака 8 в поршневую полость грузогидравлического аккумулятора 2 при переключении гидрораспределителя 9 в положение II. При этом в ТПКШ на штоке силового гидроцилиндра 1 возникает нагрузка G_p , уравновешиваемая весом грузов G_a , закрепленных на штоке грузогидравлического аккумулятора 2. Вес уравновешивающего груза при одинаковых конструктивных параметрах

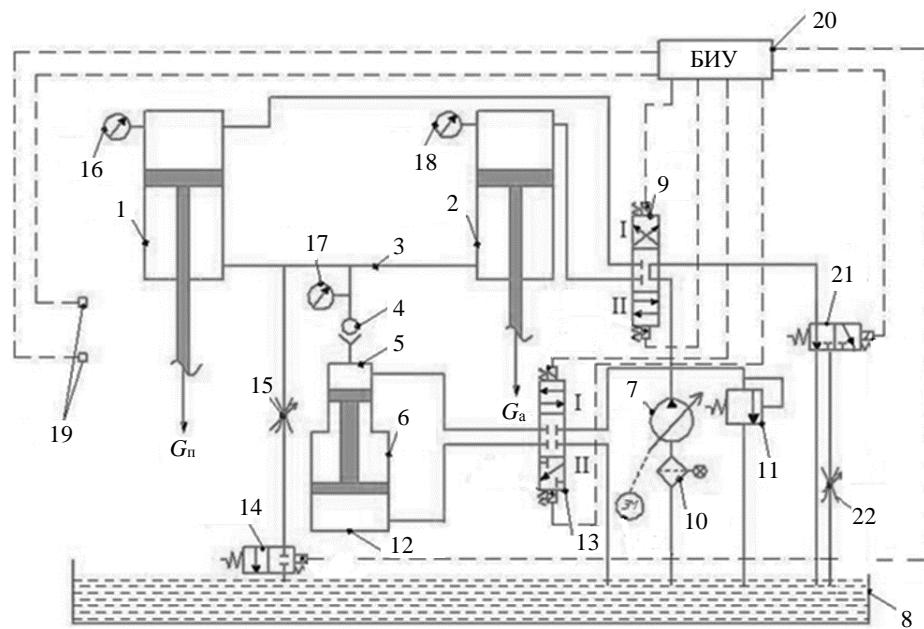


Рис.6. Гидравлическая схема перспективного привода УШСН с грузовым уравновешиванием



силового гидроцилиндра и уравновешивающего гидроцилиндра грузогидравлического аккумулятора рассчитывается по формуле

$$G_a = G_{\text{ш}} + 0,5G_{\text{ж}},$$

где $G_{\text{ш}}$ – вес колонны насосных штанг в жидкости, кН; $G_{\text{ж}}$ – вес столба жидкости, кН [11].

Рабочая жидкость из поршневой полости силового гидроцилиндра 1 через распределитель 9 подается в сливную магистраль посредством двухпозиционного распределителя 21, который на завершающем этапе движения ТПКШ переключает поток жидкости к дросселю 22, осуществляя торможение поршня силового гидроцилиндра 1.

Подача сигнала от БИУ 20 на магнитную катушку гидрораспределителя 9 обеспечивает переключение последнего в позицию I. Рабочая жидкость из бака 8 регулируемым насосом 7 подается в поршневую полость силового гидроцилиндра 1, осуществляется обратный ход ТПКШ и плунжера скважинного насоса. При этом рабочая жидкость из штоковой полости силового гидроцилиндра 1 вытесняется в штоковую полость уравновешивающего гидроцилиндра грузогидравлического аккумулятора 2. Грузы весом G_a , закрепленные на штоке грузогидравлического аккумулятора 2, поднимаются, осуществляется накопление энергии для уравновешивания ГП УШСН. Из поршневой полости цилиндра грузогидравлического аккумулятора 2 жидкость через гидрораспределители 9 и 21 сливается в маслобак 8.

В случае необходимости уменьшения величины хода штока силового гидроцилиндра 1 реализуется частичный слив рабочей жидкости из трубопровода 3 через регулируемый дроссель 15 и двухпозиционный гидрораспределитель 14 в маслобак 8. Нагнетание рабочей жидкости в штоковые полости силового 1 и уравновешивающего гидроцилиндра 2 для увеличения длины хода ТПКШ осуществляется через трубопровод 3 промежуточным двухсторонним гидроцилиндром 6. Процесс реализуется следующим образом. БИУ 20 подает сигнал на управляющую катушку гидрораспределителя 13 и переключает его в положение I. Рабочая жидкость насосом 7 нагнетается в полость высокого давления 5 промежуточного двухстороннего гидроцилиндра 6, при этом из полости низкого давления 12 жидкость вытесняется в маслобак 8.

После заполнения полости 5 гидрораспределитель 13 переключается по сигналу БИУ 20 в положение II, осуществляется заполнение полости низкого давления 12 промежуточного двухстороннего гидроцилиндра 6 рабочей жидкостью из маслобака 8, из полости высокого давления 5 рабочая жидкость вытесняется через обратный клапан 4 в трубопровод 3. Работа промежуточного гидроцилиндра 6 и гидрораспределителя 13 осуществляется до заполнения штоковых полостей силового 1 и уравновешивающего 2 гидроцилиндров заданным объемом рабочей жидкости, при котором обеспечивается необходимая величина перемещения ТПКШ, ее действительное значение определяется по показаниям датчиков 19. Изменение количества возвратно-поступательных движений в единицу времени штока силового гидроцилиндра 1 осуществляется регулированием подачи объемного насоса 7.

Применение описанной схемы и алгоритма работы обеспечивает уравновешивание ГП УШСН и его энергоэффективное функционирование в условиях нефтяного промысла [30]. Простота предложенной схемы ГП и минимизация динамических нагрузок на элементы привода позволят повысить наработку на отказ всей УШСН, что положительно скажется на рентабельности процесса нефтедобычи [31-33]. Отличительной особенностью схемы ГП УШСН является отсутствие подпиточного насоса: компенсация утечек и подача рабочей жидкости в штоковые полости силового гидроцилиндра и уравновешивающего грузогидравлического аккумулятора осуществляются за счет промежуточного двухстороннего гидроцилиндра, что упрощает конструкцию привода.

Оценку экономической эффективности внедрения ГП с грузовым уравновешиванием можно осуществить путем сравнения чистых приведенных доходов NPV при эксплуатации нефтяных скважин с УШСН, оснащенных традиционными механическими приводами СК и предлагаемыми ГП [34, 35]. Факторы, влияющие на оценку экономической эффективности, представлены в табл.4.

Особенность сравнения проектов в том, что сроки эксплуатации приводов разные: у ГП УШСН средний срок службы в 1,5-2 раза меньше, чем у механического привода СК. Для сравнения разновременных проектов можно применить метод цепного повтора: определить наименьшее кратное сроков проектов и сравнить суммы их чистых приведенных доходов [36].



Таблица 4

Оценка экономической эффективности при замене механического привода УШСН гидравлическим

Факторы, ведущие к увеличению чистого приведенного дохода	Факторы, ведущие к снижению чистого приведенного дохода
Снижение удельных затрат на электроэнергию	Увеличение количества ремонтов и технических обслуживаний привода
Снижение затрат на монтаж привода (отсутствует необходимость в массивных фундаментах, как для механических СК)	Повышение затрат на закупку запасных частей при проведении ремонтно-восстановительных работ (гидравлической и электрической части приводов)
Уменьшение количества текущих ремонтов скважин	Уменьшение срока службы в 1,5-2 раза по сравнению с механическими СК

Предполагается, что выручка от реализации будет одинаковая для сравниваемых проектов, так как производительность УШСН не отличается. Изменение чистого приведенного дохода ΔNPV_{Σ} заключается в сокращении эксплуатационных затрат, изменении налога на прибыль, разнице в капитальных вложениях и величине амортизации. Таким образом, изменение чистого приведенного дохода при замене традиционного механического привода УШСН на перспективный гидравлический в общем виде определяется выражением

$$\Delta NPV_{\Sigma} = \sum_{t=0}^P \frac{\Delta O_t - \Delta T_t \pm \Delta C_t \pm \Delta A_t}{(1+r)^t},$$

где P – срок реализации проекта, лет; ΔO_t – изменение эксплуатационных затрат за период t , руб.; ΔT_t – изменение налога на прибыль за период t , руб.; ΔC_t – разница в капитальных вложениях за период t , руб.; ΔA_t – разница в величине амортизации за период t , руб.; r – ставка дисконтирования, принятая для оценки проекта, д.ед.

Сокращение эксплуатационных затрат будет достигнуто за счет снижения удельных затрат на электроэнергию и затрат на проведение текущих ремонтов скважин [37]. Следует учитывать, что применение ГП с грузовым уравновешиванием влечет за собой увеличение количества ремонтов, технических обслуживаний привода и закупку запасных частей при проведении ремонтно-восстановительных работ (гидравлической и электрической части приводов) [38]. Формула для расчета сокращения эксплуатационных затрат от внедрения схемы ГП УШСН с грузовым уравновешиванием может быть представлена в виде

$$\Delta O_t = \Delta O_{\text{эн}} + \Delta O_{\text{pc}} - \Delta O_{\text{по}} \pm \Delta A,$$

где $\Delta O_{\text{эн}}$ – сокращение эксплуатационных затрат на электроэнергию для добычи скважинной жидкости, руб.; ΔO_{pc} – сокращение эксплуатационных затрат на проведение текущих ремонтов скважин, руб.; $\Delta O_{\text{по}}$ – дополнительные эксплуатационные затраты, связанные с увеличением количества ремонтов и технических обслуживаний приводов, руб.; ΔA – разница в величине амортизации, руб.

Для расчета экономии затрат на энергию для добычи скважинной жидкости необходимы данные среднесуточного потребления электроэнергии при работе ГП УШСН с грузовым уравновешиванием и среднесуточного дебита скважинной жидкости. В дальнейших исследованиях планируется создание промышленного образца ГП УШСН и проведение испытания предложенного привода, в ходе которого будут получены необходимые данные.

Заключение. Особенности конструкции и функционирования ГП УШСН показывают перспективность их дальнейшего совершенствования и широкого внедрения на нефтяных промыслах России и стран СНГ при эксплуатации осложненных и малодебитных нефтяных скважин. Описанные подходы, методика и оборудование для проведения экспериментальных исследований позволяют выполнить сравнительную оценку эффективности функционирования механических и гидравлических приводов УШСН по величине коэффициента энергоэффективности.

Введение в схемы коммутации ГП УШСН с электродинамическим уравновешиванием аккумуляторов электроэнергии позволяет накапливать и использовать рекуперируемую электроэнергию для работы вспомогательных потребителей и периферийных устройств УШСН. Обеспечивается



минимизация реактивной мощности и паразитной ЭДС в сетях нефтяных промыслов. Предложена перспективная схема ГП УШСН с грузовым уравновешиванием, обеспечивающая возможность эффективного уравновешивания привода и снижение динамической нагруженности его силовых элементов.

Авторы признательны директору ООО «НПП «РОС» (Пермь) Н.Н.Софыной за помощь в планировании и проведении экспериментальных исследований, сотрудникам ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь» за консультации и содействие при проведении исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивановский В.Н. Повышение интереса к штанговым насосным установкам – в чем причина? // Территория НЕФТЕГАЗ. 2013. № 8. С. 46-47.
2. Мырзахметов Б.А., Нуркас Ж.Б., Султабаев А.Е. Защита скважинного насосного оборудования в условиях высокого пескотрещинования // Горный журнал. 2022. № 7. С. 82-86. DOI: [10.17580/gzh.2022.07.14](https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.14)
3. Bealessio B.A., Blánquez Alonso N.A., Mendes N.J. et al. A review of enhanced oil recovery (EOR) methods applied in Kazakhstan // Petroleum. 2021. Vol. 7. Iss. 1. P. 1-9. DOI: [10.1016/j.petlm.2020.03.003](https://doi.org/10.1016/j.petlm.2020.03.003)
4. Lavrenko S., Klushnik I., Iarmolenko V. Test results for hydraulic drives of sucker-rod pumping units // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. Vol. 14. № 16. P. 2881-2885.
5. Григорьев С.Л., Демидов О.В. Гидропривод штангового скважинного насоса – новая технология добычи нефти // Территория НЕФТЕГАЗ. 2010. № 10. С. 59.
6. Xinmin Song, Debin Qu, Cunyou Zou. Low cost development strategy for oilfields in China under low oil prices // Petroleum Exploration and Development. 2021. Vol. 48. Iss. 4. P. 1007-1018. DOI: [10.1016/S1876-3804\(21\)60085-X](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(21)60085-X)
7. Дроздов А.Н., Блохин С.А., Пак Д.Х. и др. Анализ эффективности применения гидропривода штангового скважинного насоса «Герон» в качестве альтернативы станку-качалке // Труды научно-практической конференции с международным участием «Инженерные системы – 2019», 3-5 апреля 2019 г., Москва, Россия. М.: Российский университет дружбы народов, 2019. С. 360-366.
8. Fei Yao, Yu-xue Sun, Dekui Xu et al. Research Status and Development Trend of Clean Operation Technology in Domestic Onshore Oilfield // Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2020. Singapore: Springer, 2021. P. 2331-2342. DOI: [10.1007/978-981-16-0761-5_220](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0761-5_220)
9. Youhong Sun, Yuanling Shi, Qingyan Wang, Zongwei Yao. Study on speed characteristics of hydraulic top drive under fluctuating load // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 167. P. 277-286. DOI: [10.1016/j.petrol.2018.04.003](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.04.003)
10. Abebe A., Tadesse Y., Beyene A. Conversion of Thermally Amplified Hydraulic Shock for Power Generation: Modeling and Experimental Analyses // Journal of Energy Resources Technology. 2023. Vol. 145. Iss. 2. № 022103. DOI: [10.1115/1.4054826](https://doi.org/10.1115/1.4054826)
11. Молчанов А.Г. Научные основы проектирования и эксплуатации штанговых скважинных насосных установок с гидроприводом для добычи нефти: Автодис. ... д-ра техн. наук. М.: Государственная академия нефти и газа им. И.М.Губкина, 1998. 34 с.
12. Сидоркин Д.И., Купавых К.С. Обоснование выбора винтовых насосных установок как энергоэффективной технологии механизированной добычи // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021. Т. 64. № 2. С. 143-151. DOI: [10.21122/1029-7448-2021-64-2-143-151](https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-143-151)
13. Уразаков К.Р., Молчанова В.А., Тугунов П.М. Метод расчета динамических нагрузок и энергопотребления штанговой установки с системой автоматического уравновешивания // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 640-649. DOI: [10.31897/PMI.2020.6.6](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.6)
14. Nickell I., Treiberg T. Autonomous Control of Well Downtime to Optimize Production and Cycling in Sucker Rod Pump Artificially Lifted Wells // SPE Artificial Lift Conference and Exhibition – Americas, 23-25 August 2022, Galveston, USA. OnePetro, 2022. № SPE-209743-MS. DOI: [10.2118/209743-MS](https://doi.org/10.2118/209743-MS)
15. Устинов А.Н., Тяжтев М.В., Шишилянников Д.И. и др. Повышение эффективности гидравлических приводов штанговых скважинных насосных установок для добычи нефти // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 7 (134). С. 26-31.
16. Eisner P., Langbauer C., Fruhwirth R.K. Comparison of a novel finite element method for sucker rod pump downhole dynamometer card determination based on real world dynamometer cards // Upstream Oil and Gas Technology. 2022. Vol. 9. № 100078. DOI: [10.1016/j.upstre.2022.100078](https://doi.org/10.1016/j.upstre.2022.100078)
17. Kunshin A., Dvoynikov M., Timashev E., Starikov V. Development of Monitoring and Forecasting Technology Energy Efficiency of Well Drilling Using Mechanical Specific Energy // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 19. № 7408. DOI: [10.3390/en15197408](https://doi.org/10.3390/en15197408)
18. Moreno G.A., Garriz A.E. Sucker rod string dynamics in deviated wells // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 184. № 106534. DOI: [10.1016/j.petrol.2019.106534](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106534)
19. Теплякова А.В., Азимов А.М., Алиева Л., Жуков И.А. Обзор и анализ технических решений для повышения долговечности и улучшения технологичности элементов ударных узлов бурильных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 9. С. 120-132. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_9_0_120](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_120)
20. Shuqiang Wang, Shimin Dong, Xuelin Yu. Transverse vibration simulation of sucker rod string under normally distributed load caused by viscoelastic fluid in a curved wellbore // Journal of Sound and Vibration. 2022. Vol. 536. № 117181. DOI: [10.1016/j.jsv.2022.117181](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117181)
21. Dong Shimin, Wang Hongbo. Simulation model of lateral vibration of sucker rod string in directional wells and point arrangement optimization of centralizer // Acta Petrolei Sinica. 2020. Vol. 41. Iss. 12. P. 1686-1696. DOI: [10.7623/syxb202012021](https://doi.org/10.7623/syxb202012021)



22. Wang Hong-bo, Dong Shi-min. A model for the transverse vibration simulation of sucker rod strings with axial reciprocating motion in curved wellbores // Engineering Mechanics. 2020. Vol. 37. № 10. P. 228-237. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.12.0731
23. Omirbekova Z., Aktaukenov D., Amangeldiyev A., Abdallah A. Developing Predictive Oil Well Diagnostics Based on Intelligent Algorithms // IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies, 28-30 April 2021, Nur-Sultan, Kazakhstan. IEEE, 2021. P. 1-7. DOI: 10.1109/SIST50301.2021.9465959
24. Шишлянников Д.И., Тяжев М.М., Иванченко А.А. и др. Оценка нагруженности гидравлических приводов штанговых скважинных насосных установок // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2019. № 4. С. 34-39. DOI: 10.30713/0130-3872-2019-4-34-39
25. Ruichao Zhang, Yuqiong Yin, Liangfei Xiao, Dechun Chen. A real-time diagnosis method of reservoir-wellbore-surface conditions in sucker-rod pump wells based on multidata combination analysis // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 198. № 108254. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108254
26. Takács G. A critical analysis of power conditions in sucker-rod pumping systems // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol. 210. № 110061. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.110061
27. Савинкин В.В., Санюк А.В., Ратушная Т.Ю. и др. Исследование эффективности перераспределения мощности силового привода нефтедобывающего комплекса на малодебитных скважинах при внедрении конструкции электрогидроцилиндра рекуперативного действия // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 2. С. 229-244. DOI: 10.18799/24131830/2021/2/3058
28. Skamyin A., Shklyarskiy Ya., Dobush I. et al. An assessment of the share contributions of distortion sources for various load parameters // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2022. Vol. 13. № 2. P. 950-959. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp950-959
29. Shklyarskiy Ya., Skamyin A., Vladimirov I., Gazizov F. Distortion Load Identification Based on The Application of Compensating Devices // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 6. № 1430. DOI: 10.3390/en13061430
30. Litvinenko V.S., Sergeev I.B. Innovations as a Factor in the Development of the Natural Resources Sector // Studies on Russian Economic Development. 2019. Vol. 30. № 6. P. 637-645. DOI: 10.1134/S107570071906011X
31. Патент № 2779011 РФ. Гидропривод штангового скважинного насоса / Д.И.Шишлянников, А.А.Иванченко, С.А.Фролов, В.Ю.Зверев, А.В.Николаев. Опубл. 30.08.2022. Бюл. № 25.
32. Isaev A.A., Aliev M.M.O., Drozdov A.N. et al. Improving the Efficiency of Curved Wells' Operation by Means of Progressive Cavity Pumps // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 12. № 4259. DOI: 10.3390/en15124259
33. Cherepovitsyn A., Rutenko E. Strategic Planning of Oil and Gas Companies: The Decarbonization Transition // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 17. № 6163. DOI: 10.3390/en15176163
34. Ponomarenko T., Marin E., Galevskiy S. Economic Evaluation of Oil and Gas Projects: Justification of Engineering Solutions in the Implementation of Field Development Projects // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 9. № 3103. DOI: 10.3390/en15093103
35. Тарабаринова Т.А., Головина Е.И. Капитализация минеральных ресурсов как инновационная экологическая стратегия // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2021. № 4 (48). С. 86-96. DOI: 10.20403/2078-0575-2021-4-86-96
36. Яшин С.Н., Трифонов Ю.В., Кошелев Е.В. Сравнение методов цепного повтора и эквивалентных аннуитетов для оценки технологических инноваций компаний // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2018. Т. 11. Вып. 1. С. 32-42. DOI: 10.24891/fa.11.1.32
37. Ruidong Zhao, Jinya Li, Zhen Tao et al. Research and Application of Rod/Tubing Wearing Prediction and Anti-Wear Method in Sucker Rod Pumping Wells // SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 18-21 March 2019, Manama, Bahrain. OnePetro, 2019. № SPE-194955-MS. DOI: 10.2118/194955-MS
38. Алиев Э.А., Габибов И.А., Исмаилова Р.А., Гусейнов Р.О. Применение новой технологии ремонта при восстановлении плунжеров скважинных штанговых насосов // SOCAR Proceedings. 2022. № SI2. Р. 1-4. DOI: 10.5510/OGP2022SI200730

Авторы: Д.И.Шишлянников, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-7395-6869> (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), В.Ю.Зверев, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0009-0002-2483-132X> (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), А.Г.Звонарева, канд. экон. наук, ассистент, Zvonaeva_AG@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4468-5342> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), С.А.Фролов, ассистент, <https://orcid.org/0009-0008-7720-5991> (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), А.А.Иванченко, ассистент, <https://orcid.org/0009-0005-9667-2606> (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Исследование надежности тягового электропривода карьерных самосвалов на основе анализа отказов его функциональных узлов

А.Н.НАЗАРЫЧЕВ, Г.В.ДЯЧЕНОК[✉], Ю.А.СЫЧЕВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Назарычев А.Н., Дяченок Г.В., Сычев Ю.А. Исследование надежности тягового электропривода карьерных самосвалов на основе анализа отказов его функциональных узлов // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 363-373. EDN HCLPJВ

Аннотация. Эффективность работы горно-обогатительного комбината зависит от уровня комплексной механизации технологического процесса. При добыче полезного ископаемого основные расходы приходятся на транспортирование горной массы. Ключевыми звенами в горно-транспортной системе являются карьерные самосвалы. Поэтому для увеличения эффективности работы горно-обогатительного комбината путем улучшения грузооборота и снижения затрат на транспортирование горных масс необходимо повысить заданный уровень надежности карьерных самосвалов посредством повышения средней наработки до первого отказа. В статье проанализировано состояние надежности тягового электропривода карьерных самосвалов, работающих в отраслях минерально-сырьевого комплекса. Приводится количественная оценка отказов электропривода от дефектов, возникающих в функциональных узлах, а также затрат на выполнение восстановительных ремонтных работ. Анализ отказов с 2018 по 2022 гг. и результаты вибрационных испытаний дизель-генераторной установки показали, что самыми затратными оказались дефекты в синхронных генераторах электропривода, а основной причиной дефекта стали повышенные внешние вибрационные воздействия. На основании испытаний общего уровня вибраций и их спектрального состава в различных режимах работы оборудования сформулированы рекомендации по стойкости генератора к механическим внешним воздействующим факторам и увеличению степени защитной оболочки корпуса для исключения загрязнения. Представлен диапазон частот, представляющий наибольшую опасность разрушения для обмоток генератора.

Ключевые слова: тяговый электропривод; карьерные самосвалы; надежность; техническое состояние; дефекты; отказы; синхронный тяговый генератор

Поступила: 14.03.2023

Принята: 20.06.2023

Онлайн: 19.07.2023

Опубликована: 19.07.2023

Введение. В настоящее время в минерально-сырьевом комплексе (МСК) для транспортировки добываемых горных пород при открытой карьерной добыче полезных ископаемых наиболее часто используют карьерные самосвалы [1-3]. На отдельных предприятиях МСК расходы на транспортировку достигают 70 % себестоимости затрат на добычу полезных ископаемых [4, 5], из которых значительная часть затрат связана с восстановлением работоспособности комплекта тягового электропривода (КТЭ) [6]. Простой карьерных самосвалов связан как с плановым техническим обслуживанием и ремонтом, так и с аварийно-восстановительным ремонтом в результате отказа оборудования КТЭ [7-9].

В состав КТЭ входит следующее комплектующее оборудование: синхронный тяговый генератор (СТГ); шкаф преобразователей и систем управления (ШПСУ); тяговые асинхронные двигатели (ТАД), устанавливаемые на каждое заднее колесо карьерного самосвала.

Для повышения надежности, безопасности и эффективности эксплуатации карьерного автотранспорта и обеспечения оптимальных затрат на поддержание его в работоспособном состоянии необходимы исследования оценки и обеспечения надежности КТЭ [10-12]. В связи с тем, что карьерные самосвалы эксплуатируются в различных климатических условиях в более чем 80 странах мира* и работают часто с экстремальными режимами [13-15], к КТЭ предъявляют высокие требования по устойчивости к внешним воздействиям.

* Потребители техники БЕЛАЗ. URL: <https://belaz.by/about/consumers/> (дата обращения 20.12.2022).

Повышению надежности электропривода и его комплектующих посвящены различные исследования:

- Удаленный мониторинг технического состояния карьерного самосвала (узлы двигателя, электропривода и гидравлической системы) для предотвращения аварийных ситуаций и проведение технического обслуживания и ремонта согласно фактическому состоянию автосамосвала, а не традиционного планово-предупредительного ремонта [16].
- Прогнозирование износа подшипников электрических машин. В работах [17, 18] рассматриваются методики по прогнозированию остаточного срока службы подшипников электрических машин с помощью математического аппарата.
- Диагностика неисправностей асинхронного двигателя путем многоуровневого объединения информации [19, 20]. Исследования представляют модели, одна из которых выдает условную вероятность для каждого из состояний работоспособности двигателя на основании данных, полученных на тестируемых двигателях в лабораторных условиях, а другая распознает режимы работы электрической машины по субгармоническим параметрам.
- Оценка вероятности отказа асинхронного двигателя в составе электропривода путем диагностики вибрационных и электрических характеристик [21-23].
- Мониторинг состояния синхронного генератора с помощью электрических сигналов. В работе [24] получены практические результаты для обнаружения неисправностей в действующих синхронных генераторах, подключенных в энергосистемах.
- Оценка жизненного цикла электропривода для повышения эффективности энергосистемы. В исследовании [25] предложена методика оценки технического состояния электропривода на основе нормированных уровней амплитуд частотных составляющих.
- Оценка надежности системы тягового электропривода расчетным методом и методом анализа дерева отказов [26-28].

Несмотря на разнообразие перечисленных исследований, работ, посвященных изучению надежности тягового электропривода карьерных самосвалов, практически нет. Те из них [29, 30], которые затрагивают тему надежности карьерных самосвалов, рассматривают проблему относительно отказов в таких узлах, как двигатель внутреннего сгорания, ходовая часть, редуктор мотор-колес и т.д. Вопрос надежности тягового электропривода в подобных работах исследуется поверхностно.

В данной статье исследование имеет прикладной характер. На основе анализа данных, полученных по результатам эксплуатации, установлены причины отказов КТЭ, выявлены функциональные узлы, которые требуют наибольшего внимания. Основное преимущество работы в том, что испытания проведены на отремонтированном синхронном генераторе на месте эксплуатации, а не в программном комплексе, где условия принимаются идеальными. Исследование его состояния после отработки в карьере позволяет понять, какое влияние оказали условия эксплуатации и внешние механические вибрационные нагрузки на безотказность работы электропривода. Подчеркнута важность нахождения точек соприкосновения научных и производственных областей.

Методы. Проведены исследования надежности карьерных самосвалов и проанализировано 326 случаев выхода из строя различных функциональных узлов КТЭ за 5 лет, с 2018 по 2022 гг. Для увеличения репрезентативности выборки в исследования были включены карьерные самосвалы, эксплуатирующиеся в различных регионах и климатических условиях: Вьетнам, Иран, Узбекистан, Казахстан, Кузбасс, Новосибирская обл., Республика Хакасия. На рис.1 представлена диаграмма количества выходов из строя функциональных узлов КТЭ по годам рассматриваемого периода, а на рис.2 показано соотношение затрат на восстановление работоспособности функциональных узлов КТЭ.

Анализ полученных в ходе исследования диаграмм показал, что количество выходов из строя КТЭ по причине отказов в СТГ значительно меньше в сравнении с отказами ШПСУ, а затраты на восстановление работоспособности занимают 3/4 от всех затрат. Причина такого соотношения затрат – невозможность восстановления работоспособности СТГ на месте эксплуатации, что требует дополнительных затрат на транспортировку поврежденного узла на завод-изготовитель или специализированное ремонтное предприятие. Кроме того, ремонтные работы выполняются

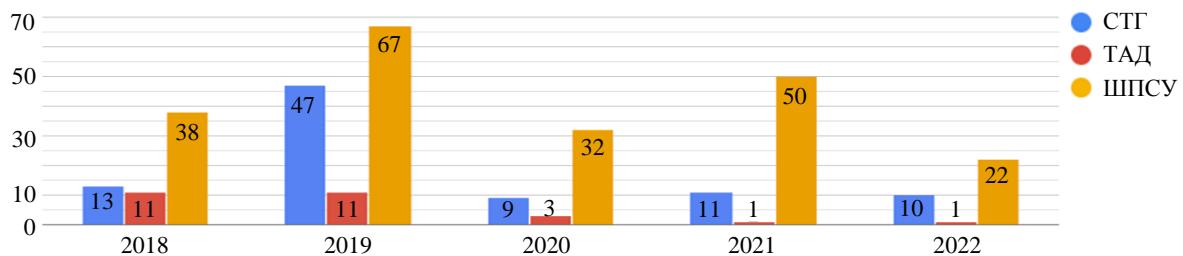


Рис.1. Количество выходов из строя функциональных узлов КТЭ, работающих в составе карьерного самосвала за период 2018-2022 гг.

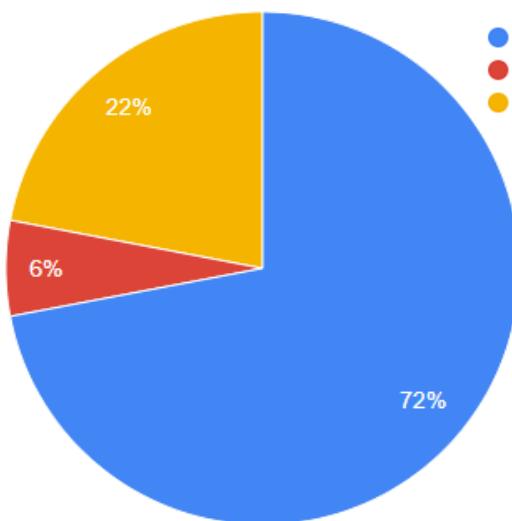


Рис.2. Соотношение затрат на восстановление функциональных узлов КТЭ за период 2018-2022 гг.

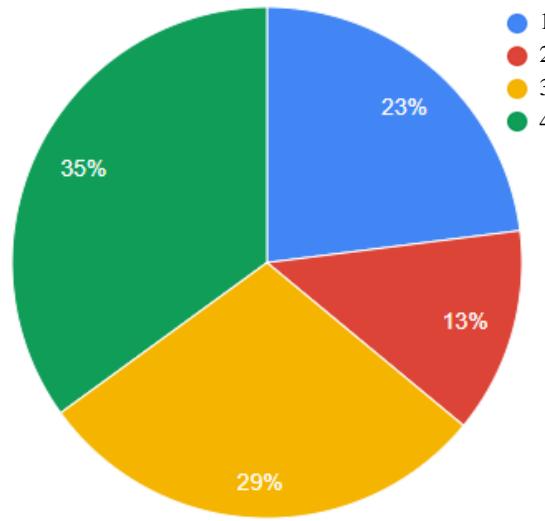


Рис.3. Причины повреждения СТГ

1 – подшипниковый узел; 2 – другое; 3 – некачественное изготовление; 4 – отгорание выводных шин обмотки статора

для дорогостоящих узлов – обмотки статора, ротора, подшипникового узла. Все это приводит к длительному простою карьерного самосвала.

Учитывая количество выходов из строя СТГ и наибольшую долю затрат СТГ при восстановлении КТЭ, будем рассматривать отказы КТЭ, случившиеся по причине выходов из строя СТГ.

Распределение отказов СТГ по видам неисправностей функциональных узлов, полученное для карьерных самосвалов на основе статистики повреждаемости, состоящей из 90 случаев, представлено на диаграмме (рис.3). Отказы СТГ происходят из-за того, что карьерные самосвалы в отличие от стационарных электрических машин эксплуатируются в тяжелых и неблагоприятных условиях и режимах работы, связанных с часто изменяющимися климатическими условиями, повышенной запыленностью, влажностью, наличием частых пусков и остановок, высоким уровнем тепловых и вибрационных нагрузок [31-33].

Учитывая сложные условия эксплуатации карьерных самосвалов от умеренного климата и до северных широт [34-36], к СТГ предъявляют следующие требования по устойчивости к воздействиям внешних условий эксплуатации:

- температура окружающей среды от -50 до $+50$ $^{\circ}\text{C}$;
- допустимое верхнее значение относительной влажности окружающего воздуха 100 % при температуре 25 $^{\circ}\text{C}$;
- высота над уровнем моря не более 1200 м;
- степень защиты генератора IP21 по ГОСТ 14254-96 «Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP)»;
- группа условий эксплуатации в части воздействия механических факторов внешней среды соответствует группе M28 по ГОСТ 17516.1-90 «Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам»;

- перепад давления воздуха на подводящем воздуховоде и фильтрах не должен превышать 1 кПа при расходе воздуха $1 \text{ м}^3/\text{с}$;
- предельно допустимая температура подшипника не должна превышать 125°C ;
- допустимые значения вибрации – на холостом ходу 10 мм/с , под нагрузкой 15 мм/с ;
- электропривод должен обеспечивать надежную эксплуатацию карьерного самосвала в условиях запыленности различных горнодобывающих предприятий до 10 мг/м^3 .

Рассмотрим более подробно все виды неисправностей СТГ в порядке увеличения их доли (рис.3), под «другими» выявлены единичные случаи отказов по следующим причинам: деформация катушек статора в процессе транспортировки; выход из строя из-за смещения статорной обмотки по направлению вращения ротора; замыкание на выводных концах статорной обмотки.

В ходе исследований было установлено, что в процессе эксплуатации между выводными токоведущими шинами СТГ из-за отсутствия на них изоляции образовался токопроводящий «мостик» из-за пыли и влаги по поверхностям колодок. В результате образования такого токопроводящего «мостика» произошло межфазное замыкание на выводных токопроводящих шинах СТГ, что привело к выходу его из строя. С учетом реальных условий эксплуатации СТГ для повышения надежности выводных концов статорной обмотки можно рекомендовать усиление их изоляции.

Статистика повреждаемости СТГ показывает, что почти каждый третий отказ происходит по причине выхода из строя подшипникового узла из-за следующих основных причин: разрушение подшипникового ролика (бракованный подшипник); разрушение сепаратора подшипника (скрытый дефект при его изготовлении); отсутствие или недостаточное количество смазки.

Зачастую одна причина повреждения порождает другую, так, например, при отсутствии необходимого количества смазки в подшипниковом узле во время эксплуатации начинает разрушаться сепаратор. Кроме того, по этой причине происходит перегрев в подшипниковом узле, так как отсутствие качественной смазки не обеспечивает равномерное распределение тепла, образующегося в ходе работы подшипникового узла [37, 38]. Для минимизации подобных отказов необходимо повысить качество проверки изготовления подшипникового узла при входном контроле и периодически оценивать его техническое состояние в процессе эксплуатации.

Одной из причин отказов СТГ является некачественное изготовление оборудования из-за невнимательности сборщиков электрических машин.

Рассмотрим отдельные виды повреждений СТГ, которые привели к отказам и простою карьерных самосвалов:

- Отгорание катушки полюса обмотки возбуждения ротора в месте его соединения с шиной. Причиной такого повреждения является отсутствие пайки или ее низкое качество в месте соединения полюса генератора и выводной шины, идущей к токосъемным кольцам в месте крепления к изоляционной колодке.

- Повреждения статорной обмотки СТГ из-за отломившегося куска сердечника полюса ротора. Наиболее вероятная причина поломки этой детали, работающей в условиях ударных нагрузок, – низкий уровень прочностных и пластических характеристик, грубая литая структура, отсутствие термической обработки, которая должна была улучшить уровень механических свойств и структуру материала.

- Излом выводной шины катушки ротора из-за отсутствия надлежащей затяжки болтового соединения.

- Повреждение статорной обмотки СТГ в результате короткого замыкания на корпус. Причиной повреждения является невыполнение требований конструкторской документации по изолировке выводных шин и нарушение последовательности выполнения работ.

К одному из основных видов повреждений относится отгорание выводных шин обмоток статора. К этой группе повреждений относится также отгорание вывода катушки статора от токоведущего кольца в обмотке статора и разрушение межкатушечных соединений обмотки статора [39]. Наиболее вероятной причиной таких повреждений является превышение внешних вибрационных воздействий [40-42] на СТГ по отношению к указанным в технических условиях значениям. Длительное воздействие вибраций на водителя является признанным фактором риска различных заболеваний [43-45]. Также в процессе эксплуатации во внутренней полости СТГ карьерного



самосвала может скапливаться глинистый осадок, который приводит с одной стороны к ухудшению теплоотвода от обмоток [46-48], а с другой – к появлению дисбаланса и увеличению вибрации.

Для поиска возможных причин разрушения обмоток статора были проведены вибрационные испытания по определению общего уровня вибраций и их спектрального состава в различных режимах работы дизель-генераторной установки (ДГУ). Испытания были проведены на отремонтированном генераторе на месте эксплуатации карьерного самосвала в Кемеровской обл. в следующих режимах работы: на холостом ходу при частоте вращения 900 и 1900 об/мин; при нагрузке на тормозной резистор при частоте вращения 800 и 1800 об/мин.

В ходе испытаний было установлено, что при 1800-1900 об/мин уровень вибрации максимальный. Поэтому при дальнейших исследованиях опираемся только на эти частоты вращения.

На рис.4 показаны места измерения вибрации, включающие 14 точек измерений:

- 1, 2 и 3 – вертикальная, горизонтальная и осевая вибрации подшипникового узла генератора со стороны контактных колец;
- 4, 5 и 6 – вертикальная, горизонтальная и осевая вибрации корпуса генератора со стороны дизеля;
- 7, 8 и 9 – вертикальная, горизонтальная и осевая вибрации левой опорной лапы генератора со стороны дизеля;
- 10 и 11 – вертикальная и осевая вибрации блока цилиндров дизеля со стороны генератора;
- 12 и 13 – вертикальная и горизонтальная вибрации блока цилиндров дизеля со стороны радиатора;
- 14 – горизонтальная вибрация рамы ДГУ под дизельным двигателем.

Обсуждение результатов. Результаты измерений среднеквадратичных значений виброскорости ДГУ в диапазоне частот 10-5000 Гц представлены в табл.1. По полученным данным видно, что вибрация корпуса генератора как на холостом ходу, так и под нагрузкой на исследуемых частотах вращения не превышает допустимое значение 10 и 15 мм/с соответственно. Исключение составляют ненормируемые точки на щите у подшипника генератора. Отметим, что суммарная вибрация в зоне двигателя в отдельных точках значительно выше, чем в зоне генератора. Результаты представлены в относительных единицах сравнительно с допустимыми значениями по виброскорости генератора (показатели, превышающие допустимое значение, выделены жирным).

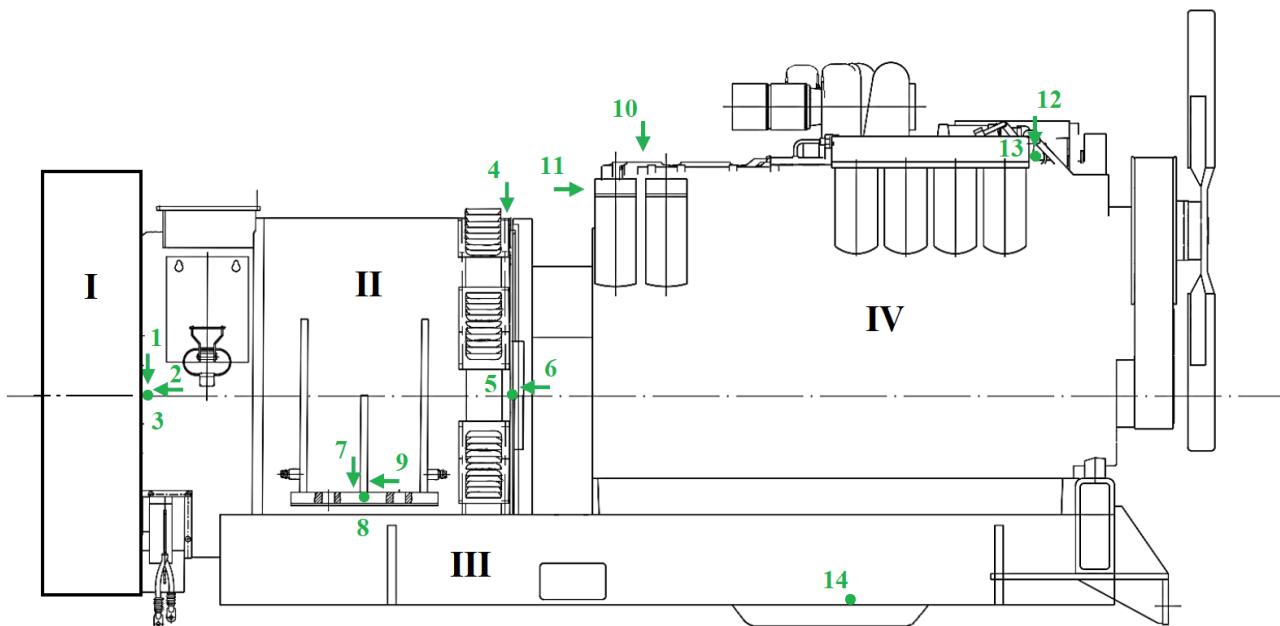


Рис.4. Точки проведения замеров и снятия вибрационных параметров дизель-генераторной установки

I – кожух вентилятора охлаждения; II – синхронный тяговый генератор; III – рама дизель-генераторной установки;

IV – дизельный двигатель

Таблица 1

Относительное среднеквадратичное значение виброскорости генератора, о.е.

Точки измерения	Холостой ход при $n = 900$ об/мин	Холостой ход при $n = 1900$ об/мин	Нагрузка на тормозной резистор при $n = 800$ об/мин, $I = 250$ А	Нагрузка на тормозной резистор при $n = 1800$ об/мин, $I = 330$ А
1	0,46	1,05	0,31	0,89
2	0,58	1,62	0,44	1,08
3	0,31	1,57	0,27	1,30
4	0,36	0,55	0,31	0,48
5	0,22	0,63	0,13	0,42
6	0,27	0,8	0,23	0,57
7	0,41	0,56	0,28	0,69
8	0,26	0,95	0,21	0,68
9	0,27	0,67	0,20	0,49
10	0,39	1,08	0,29	0,55
11	0,22	1,34	0,16	0,38
12	0,45	3,71	0,34	1,44
13	0,27	0,53	0,15	0,43
14	0,47	1,07	0,30	1,77

В ходе испытаний проведены замеры значений виброускорений ДГУ в диапазонах частот до 55 и 200 Гц (согласно ГОСТ 17516.1-90 «Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам» для группы устойчивости М28). Полученные значения приведены в табл.2, жирным выделены показатели, превышающие предельное рабочее значение. Из результатов следует, что внешнее механическое воздействие на генератор в диапазоне частот 0-55 Гц удовлетворяет группе устойчивости М28 по ГОСТ 17516.1-90. Однако основной вклад в общий уровень вибрации генератора вносят гармоники с частотами от 60 до 300-400 Гц, величина которых в разы больше вибрации в диапазоне частот 0-55 Гц. Можно полагать, что именно эти гармоники представляют наибольшую опасность для обмотки генератора, так как в этом диапазоне лежат ее резонансные частоты. На этом основании следует считать, что группа М28 к данной установке неприменима. Следует применять группу механического исполнения М37 (изделия, устанавливаемые на поршневые двигатели, диапазон частот 0,5-500 Гц, амплитуда виброускорения до 100 м/с²).

Таблица 2

Максимальные значения виброускорений генератора относительно предельного значения
в диапазоне частот 0-55/0-200 Гц, о.е.

Точки измерения	Холостой ход при $n = 900$ об/мин	Холостой ход при $n = 1900$ об/мин	Нагрузка на тормозной резистор при $n = 800$ об/мин, $I = 250$ А	Нагрузка на тормозной резистор при $n = 1800$ об/мин, $I = 330$ А
1	0,043/0,135	0,106/0,444	0,024/0,199	0,101/0,457
2	0,092/0,171	0,158/0,605	0,037/0,265	0,158/0,485
3	0,011/0,123	0,047/1,630	0,014/0,146	0,038/1,930
4	0,033/0,111	0,068/0,167	0,017/0,218	0,060/0,321
5	0,019/0,058	0,085/0,187	0,024/0,033	0,093/0,166
6	0,028/0,087	0,065/0,359	0,014/0,147	0,084/0,340
7	0,028/0,164	0,045/0,516	0,025/0,139	0,075/0,808
8	0,035/0,084	0,095/0,456	0,027/0,119	0,139/0,404
9	0,025/0,088	0,061/0,264	0,016/0,124	0,076/0,297
10	0,020/0,096	0,098/0,156	0,009/0,169	0,107/0,201
11	0,013/0,036	0,210/0,184	0,019/0,047	0,073/0,218
12	0,012/0,053	0,614/0,659	0,019/0,148	0,212/0,440
13	0,034/0,075	0,033/0,259	0,017/0,077	0,065/0,240
14	0,024/0,328	0,084/0,729	0,026/0,235	0,133/3,150

На рис.5 показан спектр вибрации блока цилиндров дизеля в наиболее активной зоне с диапазонами частот 1,5-2,5 и 3-3,5 кГц. Степень влияния этих высокочастотных составляющих на генератор неизвестна.

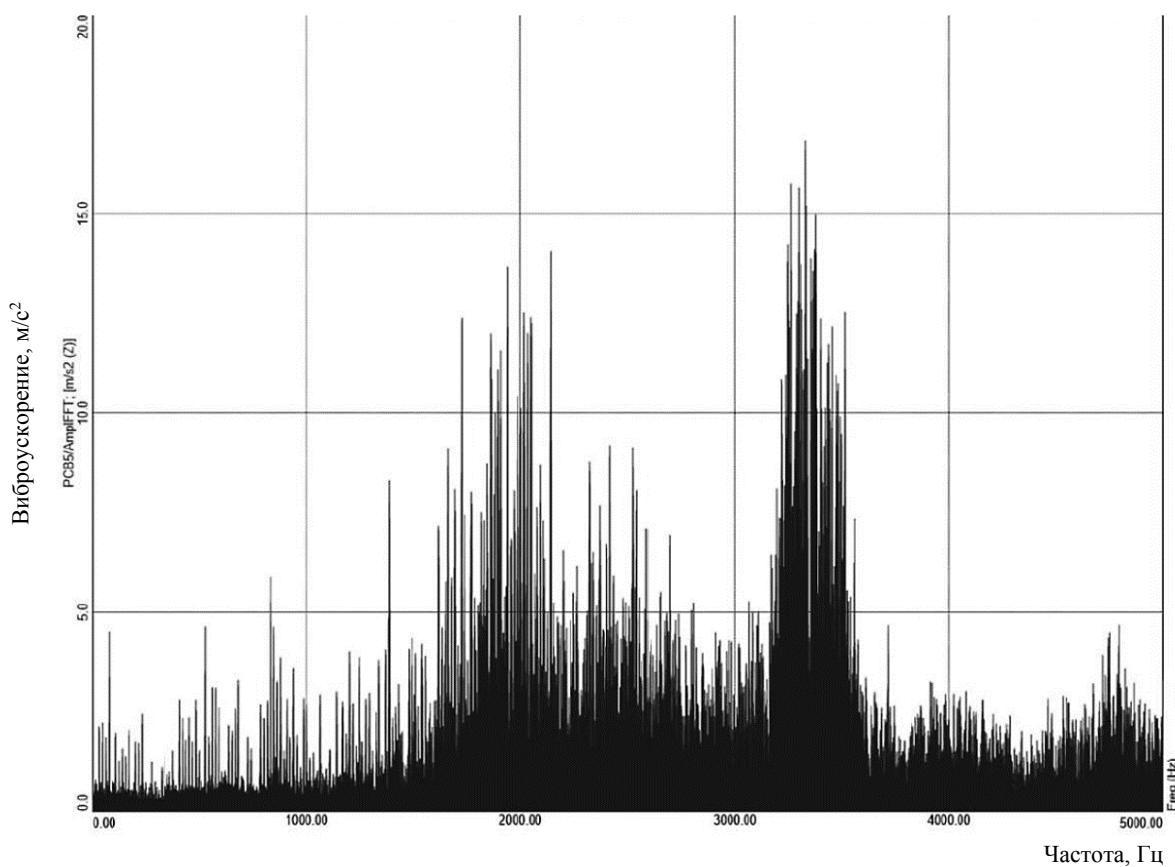


Рис.5. Спектр виброускорения блока цилиндров дизеля со стороны радиатора, направление вертикальное (точка 12)

Значения виброускорений левой опорной лапы генератора со стороны дизеля (точка 8) и рамы ДГУ под дизельным двигателем (точка 14) по гармоникам частоты вращения при 1846 об/мин, 330 А в режиме нагрузки на тормозной резистор приведены в табл.3. Из табл.3 видно, что на гармониках 3,5 и 5 явным источником вибрации является дизель. Спектр виброускорений для перечисленных точек измерений представлен на рис.6. Вид спектра практически не зависит от нагрузки генератора, следовательно, вибрация имеет механическую природу.

Таблица 3

Значения виброускорений опорной лапы генератора и рамы ДГУ под дизельным двигателем в горизонтальном направлении

Частота, Гц	Номер гармоники	Виброускорение, о.е.	
		Лапа генератора	Рама под дизелем
31,01	1	0,13	0,09
61,59	2	0,22	0,05
77,09	2,5	0,44	0,06
108,44	3,5	0,15	0,47
152,16	5	0,08	3,13
1093,57	36,5	0,07	0,7
1131,31	37	0,15	1,1
1167,99	38	0,05	0,96

Высокие значения виброускорения осевой вибрации подшипникового узла генератора (точка 3) определяются гармониками диапазона частот 150-200 Гц (табл.4). Это можно объяснить резонансными свойствами конструкции данного элемента. Для аналогичного генератора при испытаниях на площадке завода собственная частота щита с корпусом подшипника составила 180 Гц (рис.7).

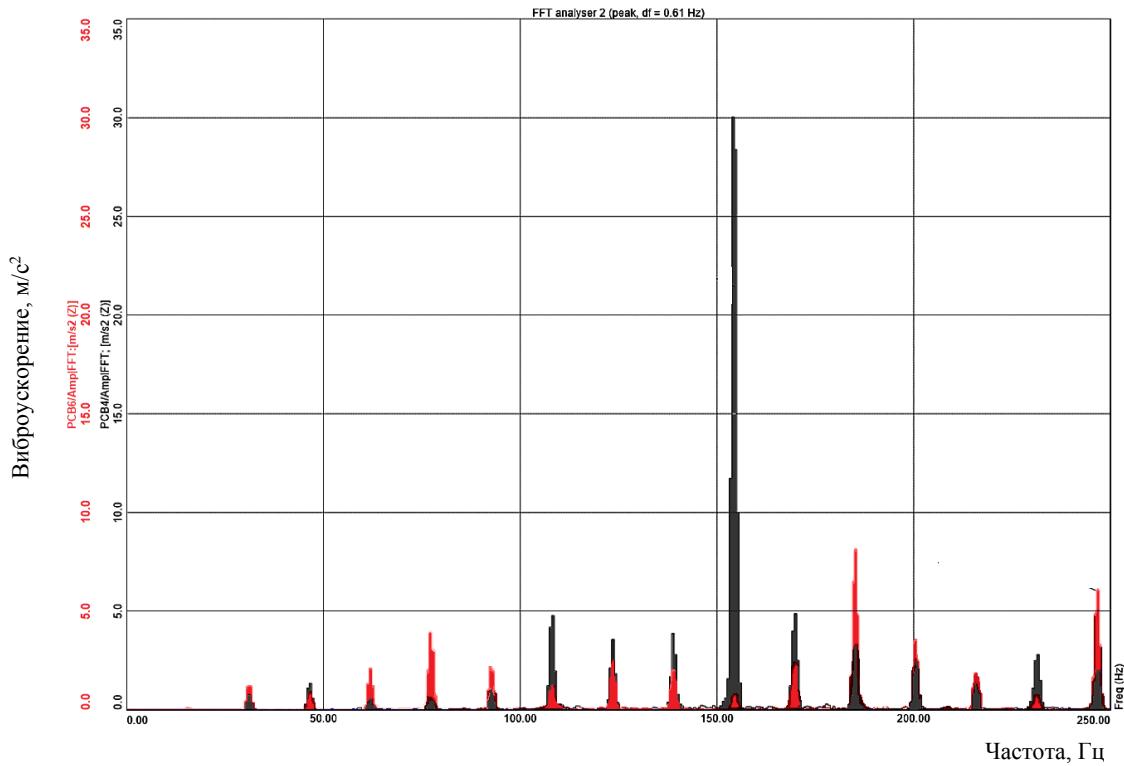


Рис.6. Спектр виброускорения опорной лапы генератора (точка 8 – красный) и рамы ДГУ под дизелем (точка 14 – черный) в горизонтальном направлении при частоте вращения 1846 об/мин

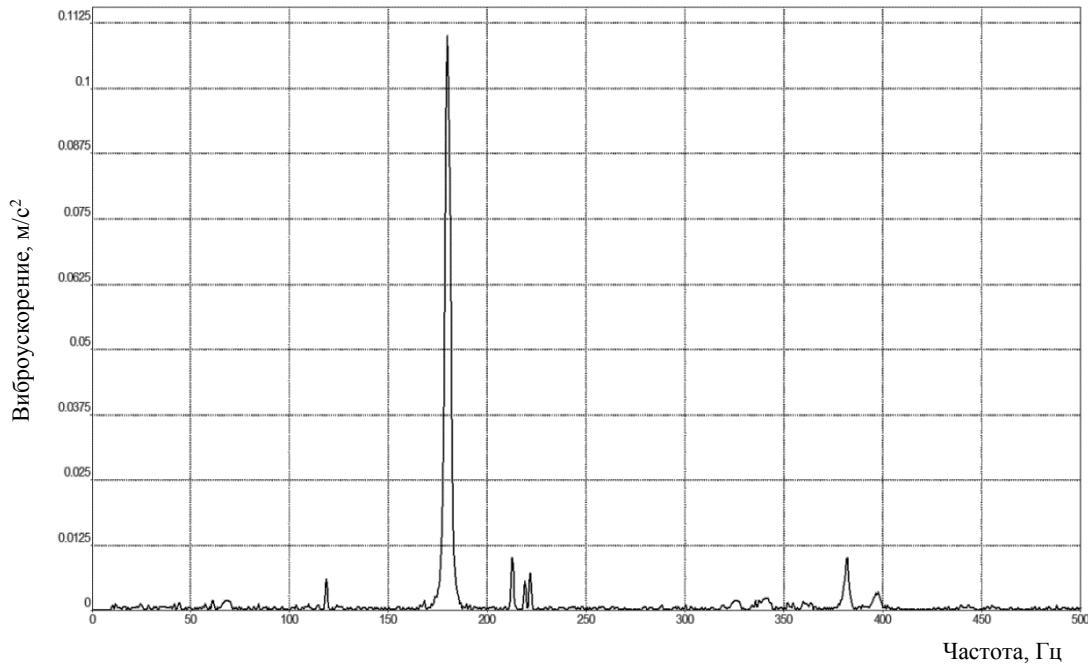


Рис.7. Спектр виброускорения торцевого щита генератора в осевом направлении

Таблица 4

Виброускорение подшипникового узла в осевом направлении по гармоникам частоты вращения при 1914 об/мин, 325 А

Частота, Гц	31,7	63,6	95,2	127,1	143,3	159,2	175,3	190,9	205,2
Номер гармоники	1	2	3	4	4,5	5	5,5	6	6,5
Виброускорение, о.е.	0,01	0,07	0,21	0,31	0,35	0,47	1,26	1,92	1,62



Заключение. На основе проведенных исследований рассмотрены отказы КТЭ карьерных самосвалов, проанализированы причины отказов СТГ, для определения причин разрушения обмоток статора проведены стендовые испытания ДГУ, которые позволяют сделать следующие выводы:

- Анализ отказов СТГ показал, что наибольшую степень повреждаемости имеют: обмотка статора (35 %) и подшипниковый узел (29 %). При этом к отказам в обмотке статора относятся такие повреждения, как отгорание выводных шин катушки статора и разрушение межкатушечных соединений его обмотки.
- Основная причина разрушений обмоток статора – это превышение внешних вибрационных воздействий на генератор по отношению к указанным в технических условиях на эксплуатацию.
- Общий уровень виброскорости корпуса генератора на частотах вращения в диапазоне 1800-1900 об/мин не превышает допустимые значения, указанные в нормативных документах.
- Внешнее механическое воздействие на генератор не соответствует группе устойчивости M28 по ГОСТ 17516.1-90. Установлено, что корректной группой внешнего механического исполнения является M37 (0,5-500 Гц до 100 м/с²).
- В ходе испытаний установлено, что вибрация генератора практически не зависит от его нагрузки и определяется прежде всего механическими причинами.
- Наибольшую опасность для обмоток генератора представляют вибрации с частотами в диапазоне от 60 до 200 Гц. Выявлено, что источником вибрации, по крайней мере для некоторых гармоник, в этом диапазоне частот является двигатель.
- Проблема повреждения обмоток статора генератора комплексная и первопричина ее кроется не только в вибрационной активности дизельного двигателя или генератора, но и в собственных частотах самой обмотки или ее креплений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козярук А.Е., Камышьян А.М. Повышение энергетической эффективности электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 576-582. DOI: [10.31897/PMI.2019.5.576](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.576)
2. Patterson S.R., Kozan E., Hyland P. Energy efficient scheduling of open-pit coal mine trucks // European Journal of Operational Research. 2017. Vol. 262. Iss. 2. P. 759-770. DOI: [10.1016/j.ejor.2017.03.081](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.081)
3. Dubinkin D., Sadovets V., Syrkin I., Chicherin I. Assessment of the Need to Create Control System of Unmanned Dump Truck // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 177. № 03022. DOI: [10.1051/e3sconf/202017703022](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017703022)
4. Kuznetsov D., Kosolapov A. Dynamic of performance of open-pit dump trucks in ore mining in severe climatic environment // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. P. 1042-1048. DOI: [10.1016/j.trpro.2022.06.104](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.104)
5. Журавлев А.Г., Исаков М.В. Экспериментальные исследования работы карьерных автосамосвалов в условиях эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3-1. С. 530-542. DOI: [10.25018/0236-1493-2020-31-0-530-542](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-530-542)
6. Кузин Е.Г., Пудов Е.Ю., Дубинкин Д.М. Анализ отказов узлов карьерных самосвалов в условиях эксплуатации // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 2. С. 55-61. DOI: [10.26730/1816-4528-2021-2-55-61](https://doi.org/10.26730/1816-4528-2021-2-55-61)
7. Власов Ю.А., Спирин Е.Н., Лягин А.Н. и др. Анализ причин низкой эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов // Научное обозрение. Технические науки. 2016. № 5. С. 37-44.
8. Semykina A., Zagorodnii N., Novikov A. Study of the effectiveness of the organization of the system of maintenance and repair of quarry transport of mining and processing plants // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. P. 983-989. DOI: [10.1016/j.trpro.2022.06.097](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.097)
9. Дубинкин Д.М., Карташов А.Б., Арутюнян Г.А. и др. Разработка программы и методики предварительных испытаний автономного карьерного самосвала // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 6. С. 59-65. DOI: [10.26730/1816-4528-2021-6-59-65](https://doi.org/10.26730/1816-4528-2021-6-59-65)
10. Zhen Wang, Lihui Zhao, Zhiguo Kong et al. Development of accelerated reliability test cycle for electric drive system based on vehicle operating data // Engineering Failure Analysis. 2022. Vol. 141. № 106696. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2022.106696](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106696)
11. Махараткин П.Н., Абдулаев Э.К., Вишняков Г.Ю. и др. Повышение эффективности функционирования карьерных автосамосвалов на основе обоснования их рациональной скорости с помощью имитационного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 237-250. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_62_0_237](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_237)
12. Yanbiao Feng, Zuomin Dong. Integrated design and control optimization of fuel cell hybrid mining truck with minimized lifecycle cost // Applied Energy. 2020. Vol. 270. № 115164. DOI: [10.1016/j.apenergy.2020.115164](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115164)
13. Bolshunova O.M., Korzhev A.A., Kamyshyan A.M. Adaptive control system of dump truck traction electric drive // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. Iss. 5. № 052007. DOI: [10.1088/1757-899X/327/5/052007](https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052007)
14. Yanbiao Feng, Qiang Liu, Yong Li et al. Energy efficiency and CO₂ emission comparison of alternative powertrain solutions for mining haul truck using integrated design and control optimization // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 370. № 133568. DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.133568](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133568)
15. Seifoori S., Parrany A.M., Khodayari M. A high-cycle fatigue failure analysis for the turbocharger shaft of BELAZ 75131 mining dump truck // Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 116. № 104752. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2020.104752](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104752)

16. Клебанов А.Ф., Сиземов Д.Н., Кадочников М.В. Комплексный подход к удаленному мониторингу технического состояния и режимов эксплуатации карьерного автосамосвала // Горная промышленность. 2020. № 2. С. 75-81. DOI: [10.30686/1609-9192-2020-2-75-81](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-2-75-81)
17. Koteleva N., Korolev N., Zhukovskiy Yu., Baranov G. A Soft Sensor for Measuring the Wear of an Induction Motor Bearing by the Park's Vector Components of Current and Voltage // Sensors. 2021. Vol. 21. Iss. 23. № 7900. DOI: [10.3390/s21237900](https://doi.org/10.3390/s21237900)
18. Kundu P., Darpe A.K., Kulkarni M.S. Weibull accelerated failure time regression model for remaining useful life prediction of bearing working under multiple operating conditions // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol. 134. № 106302. DOI: [10.1016/j.ymssp.2019.106302](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106302)
19. Jinjiang Wang, Peilun Fu, Laibin Zhang et al. Multilevel Information Fusion for Induction Motor Fault Diagnosis // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2019. Vol. 24. Iss. 5. P. 2139-2150. DOI: [10.1109/TMECH.2019.2928967](https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2928967)
20. Минакова Т.Е., Маларев В.И., Коржев А.А. Метод распознавания режимов работы асинхронных электродвигателей горных производств по субгармоническим параметрам // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 11. С. 96-108. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_11_0_96](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_11_0_96)
21. Zhukovskiy Yu.L., Vasilev B.Y., Korolev N.A., Malkova Y.M. Analysis of the behavior of asynchronous electric drive with a closed scalar control system when changing the inductance of the magnetizing circuit // Indonesian Journal of Science and Technology. 2023. Vol. 8. № 1. P. 65-78. DOI: [10.17509/ijost.v8i1.51983](https://doi.org/10.17509/ijost.v8i1.51983)
22. Glowacz A., Glowacz W., Kozik J. et al. Detection of Deterioration of Three-phase Induction Motor using Vibration Signals // Measurement Science Review. 2019. Vol. 19. № 6. P. 241-249. DOI: [10.2478/msr-2019-0031](https://doi.org/10.2478/msr-2019-0031)
23. Barański M. New vibration diagnostic method of PM generators and traction motors – detecting of vibrations caused by unbalance // IEEE International Energy Conference (Energycon), 13-16 May 2014, Cavtat, Croatia. IEEE, 2014. P. 28-32. DOI: [10.1109/ENERGYCON.2014.6850401](https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2014.6850401)
24. Salomon C.P., Ferreira C., Sant'Ana W.C. et al. A Study of Fault Diagnosis Based on Electrical Signature Analysis for Synchronous Generators Predictive Maintenance in Bulk Electric Systems // Energies. 2019. Vol. 12. Iss. 8. № 1506. DOI: [10.3390/en12081506](https://doi.org/10.3390/en12081506)
25. Korolev N., Kozyaruk A., Morenov V. Efficiency Increase of Energy Systems in Oil and Gas Industry by Evaluation of Electric Drive Lifecycle // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 19. № 6074. DOI: [10.3390/en14196074](https://doi.org/10.3390/en14196074)
26. Qi Gong, Bingzhi Chen, Yonghua Li, Pengpeng Zhi. Reliability Assessment Based on GO Method of Metro Traction System // Advances in Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 2020. № 2829084. P. 1-13. DOI: [10.1155/2020/2829084](https://doi.org/10.1155/2020/2829084)
27. Jianqiang Liu, Shi Li, Yong Jiang, Krishnamurthy M. Reliability Evaluating for Traction Drive System of High-speed Electrical Multiple Units // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 16-19 June 2013, Detroit, USA. IEEE, 2013. P. 1-6. DOI: [10.1109/ITEC.2013.6574491](https://doi.org/10.1109/ITEC.2013.6574491)
28. Shuai Lin, Xiaochun Fang, Fei Lin et al. Reliability of rail transit traction drive system – A review // Microelectronics Reliability. 2018. Vol. 88-90. P. 1281-1285. DOI: [10.1016/j.microrel.2018.07.037](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.07.037)
29. Kabikov S.J., Buyalich G.D., Sembayev N.S. Ways To Upgrade The Utilisation Efficiency Of Open-Pit Dump Trucks // PalArch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology. 2020. Vol. 17. № 3. P. 602-614. DOI: [10.48080/jae.v17i3.138](https://doi.org/10.48080/jae.v17i3.138)
30. Андреева Л.И., Ушаков Ю.Ю. Исследование эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов // Известия Уральского государственного горного университета. 2016. Вып. 3 (43). С. 74-77. DOI: [10.21440/2307-2091-2016-3-74-77](https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-74-77)
31. Vinogradov A.B., Gnedov N.E., Chistoserdov V.L., Korotkov A.A. Mining Dump Trucks Electrical Traction Equipment Improvement // XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), 04-07 October 2020, St. Petersburg, Russia. IEEE, 2020. P. 1-4. DOI: [10.1109/ICEPDS47235.2020.9249279](https://doi.org/10.1109/ICEPDS47235.2020.9249279)
32. Ziran Guo, Ming Yang, Xu Huang. Bearing fault diagnosis based on speed signal and CNN model // Energy Reports. 2022. Vol. 8. S. 13. P. 904-913. DOI: [10.1016/j.egyr.2022.08.041](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.08.041)
33. Цыглыну П.П., Ромашева Н.В., Фадеева М.Л., Петров И.В. Инжениринговые проекты в топливно-энергетическом комплексе России: актуальные проблемы, факторы и рекомендации по развитию // Уголь. 2023. № 3. С. 45-51. DOI: [10.18796/0041-5790-2023-3-45-51](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-3-45-51)
34. Борисенко А.Н., Олейников А.В., Семенов М.Н. К вопросу о совершенствовании регламентов технического обслуживания и планово-предупредительных ремонтов карьерных автосамосвалов в ООО «СУЭК-Хакасия» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 6. С. 104-119. DOI: [10.25018/0236_1493_2021_6_0_104](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_6_0_104)
35. Khalturin A.A., Parfenchik K.D., Shpenst V.A. Features of Oil Spills Monitoring on the Water Surface by the Russian Federation in the Arctic Region // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11. Iss. 1. № 111. DOI: [10.3390/jmse11010111](https://doi.org/10.3390/jmse11010111)
36. Petrov D.S., Korotaeva A.E., Pashkevich M.A., Chukaeva M.A. Assessment of heavy metal accumulation potential of aquatic plants for bioindication and bioremediation of aquatic environment // Environmental Monitoring and Assessment. 2023. Vol. 195. № 122. DOI: [10.1007/s10661-022-10750-0](https://doi.org/10.1007/s10661-022-10750-0)
37. Jin Woo Oh, Dogun Park, Jongpil Jeong. Fault Detection for Lubricant Bearing with CNN // 2nd International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS), 28 February – 02 March 2019, Singapore. IEEE, 2019. P. 142-145. DOI: [10.1109/ICoIAS.2019.00031](https://doi.org/10.1109/ICoIAS.2019.00031)
38. Karpat F., Kalay O.C., Dirik A.E. et al. Convolutional Neural Networks Based Rolling Bearing Fault Classification Under Variable Operating Conditions // International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA), 25-27 August 2021, Kocaeli, Turkey. IEEE, 2021. P. 1-6. DOI: [10.1109/INISTA52262.2021.9548378](https://doi.org/10.1109/INISTA52262.2021.9548378)
39. Ehya H., Lyng Rødal G.L., Nysveen A., Nilssen R. Condition Monitoring of Wound Field Synchronous Generator under Interturn Short Circuit Fault utilizing Vibration Signal // 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 24-27 November 2020, Hamamatsu, Japan. IEEE, 2020. P. 177-182. DOI: [10.23919/ICEMS50442.2020.9291088](https://doi.org/10.23919/ICEMS50442.2020.9291088)
40. Андреева Л.И. Применение методов оценки технического состояния горной техники на горнодобывающем предприятии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 5. С. 136-143. DOI: [10.25018/0236-1493-2018-5-0-136-143](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-5-0-136-143)
41. Рудаков М.Л., Дука Н.Е. Изучение свойств звукопоглощающих материалов при конструировании средств индивидуальной защиты органа слуха // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 3. С. 165-180. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_3_0_165](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_3_0_165)



42. *Ustinov D., Nazarychev A., Pelenev D. et al.* Investigation of the Effect of Current Protections in Conditions of Single-Phase Ground Fault through Transient Resistance in the Electrical Networks of Mining Enterprises // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 9. № 3690. DOI: 10.3390/en16093690

43. Гендлер С.Г., Прохорова Е.А. Оценка совокупного влияния производственного травматизма и профессиональных заболеваний на состояние охраны труда в угольной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10-2. С. 105-116. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_105

44. Гендлер С.Г., Фазылов И.Р., Абашин А.Н. Результаты экспериментальных исследований теплового режима нефтяных шахт при термическом способе добычи нефти // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-1. С. 248-262. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_248

45. Бабырь К.В., Устинов Д.А., Пеленев Д.Н. Повышение электробезопасности обслуживающего персонала в условиях неполных однофазных замыканий на землю // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 8. С. 55-61. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-8-55-61

46. Xihui Liang, Ming J. Zuo, Zhipeng Feng. Dynamic modeling of gearbox faults: A review // Mechanical Systems and Signal Processing. 2018. Vol. 98. P. 852-876. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.05.024

47. Haijun Zhang, Mingjie Zhang, Xin Wang. Fracture failure analysis of insulation with initial crack defect for stator end-winding in induction motor by using magnetic-structural coupling model // Engineering Failure Analysis. 2023. Vol. 149. № 107239. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107239

48. Yetgin A.G. Effects of induction motor end ring faults on motor performance. Experimental results // Engineering Failure Analysis. 2019. Vol. 96. P. 374-383. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.10.019

Авторы: А.Н.Назарычев, д-р техн. наук, заместитель проректора, <https://orcid.org/0000-0001-6223-4150> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Г.В.Дяченок, аспирант, s205027@stud.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6828-4252> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Ю.А.Сычев, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-0119-505X> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Оценка влияния температуры рабочей жидкости на потери мощности карьерного гидравлического экскаватора

М.Г.РАХУТИН¹, ЗАНГ КУОК КХАНЬ², А.Е.КРИВЕНКО¹✉, ЧАН ВАН ХИЕП¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

² Куангниньский индустриальный университет, Куангнинь, Вьетнам

Как цитировать эту статью: Рахутин М.Г., Занг Куок Кхань, Кривенко А.Е., Чан Van Хиеп. Оценка влияния температуры рабочей жидкости на потери мощности карьерного гидравлического экскаватора // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 374-383. EDN OKWKUF

Аннотация. В установившемся режиме работы температура рабочей жидкости гидравлической системы карьерного экскаватора определяется температурой окружающей среды, конструкцией гидравлической системы и потерями мощности. Величина потерь мощности зависит от физических и термодинамических свойств рабочей жидкости и степени износа рабочих элементов гидравлической системы карьерного экскаватора. Основными причинами потерь мощности являются гидравлические потери в местных сопротивлениях, трубопроводах и утечках в насосах и гидромоторах. При увеличении температуры рабочей жидкости ее вязкость уменьшается, что приводит к снижению потерь мощности за счет гидравлических потерь в трубопроводах и местных сопротивлениях и к увеличению объемных утечек и связанных с ними потерь мощности. Для численного определения уровня потерь мощности на примере экскаватора Komatsu PC750-7 при применении гидравлических масел Shell Tellus S2 V 22, 32, 46, 68 с соответствующей кинематической вязкостью 22, 32, 46, 68 сСт при 40 °C использовалась разработанная методика расчета и программный алгоритм в среде MatLab Simulink. Предложен коэффициент потери мощности, получаемый сравнением потерь мощности при оптимальной величине температуры для гидросистемы в рассматриваемых условиях с фактическими. Использование коэффициента позволяет выбирать рабочие жидкости и устанавливать величины предельного состояния основных насосов и других элементов гидросистемы, оценивать фактическую энергоэффективность работы экскаватора. Расчеты показали, что проведение мероприятий, обеспечивающих работу в интервале с отклонением 10 % от оптимального значения температуры для данных условий, позволяет сократить потери энергии от 3 до 12 %.

Ключевые слова: карьерный гидравлический экскаватор; гидравлическая система; потеря мощности; вязкость; температура; утечки рабочей жидкости; гидравлические потери

Поступила: 16.03.2023

Принята: 20.06.2023

Онлайн: 19.07.2023

Опубликована: 19.07.2023

Введение. Общеизвестно, что в большинстве гидравлических систем КПД не превышает 75 %. Подведенная мощность при этом расходуется на преодоление механического трения, гидравлические потери в трубопроводах и местных сопротивлениях, внутренние утечки рабочей жидкости. Все потери мощности превращаются в тепло, поглощаемое рабочей жидкостью [1-3]. Рост температуры рабочей жидкости выше определенного предела приводит к возрастанию скорости старения, ухудшению рабочих свойств и существенно влияет на производительность экскаватора и долговечность гидравлической системы. Особое значение потери мощности имеют при эксплуатации карьерных гидравлических экскаваторов, поскольку они работают в режиме изменяющихся внешних условий, в первую очередь температуры окружающей среды, и имеют мощный привод, что дает большие абсолютные значения потерь электрической энергии или дизельного топлива [4-6].

Расчет потерь мощности позволит выбрать соответствующую мощность привода при проектировании новой техники, найти условия теплового равновесия, определить максимально возможную температуру масла в гидравлической системе экскаватора, правильно выбрать параметры маслоохладителя с учетом мощности, режима и условий эксплуатации оборудования. Точный



расчет суммарных потерь мощности гидравлической системы карьерного экскаватора сложен из-за большого объема вычислений и необходимости учета изменчивости физических параметров сред, участвующих в процессе.

Методы. В качестве объекта изучения выбрана гидравлическая система экскаватора Komatsu PC750-7. Рабочие жидкости Shell Tellus S2 V 22, 32, 46, 68 с соответствующей кинематической вязкостью 22, 32, 46, 68 сСт при 40 °C. Механические потери в узлах трения приняты постоянной величиной и при расчетах не учитывались [7, 8].

В гидравлической системе карьерного экскаватора потери энергии зависят от выполняемых операций и температуры рабочей жидкости. Это мощность, расходуемая на преодоление сопротивления в гидравлических магистралях, местных сопротивлениях и утечки рабочей жидкости в элементах гидравлической системы. Для точной оценки потерь энергии в гидросистеме экскаватора необходимо учитывать зависимость плотности и вязкости рабочей жидкости от температуры. В расчетах, выполняемых вручную, принято усреднять физические параметры рабочей жидкости, поскольку учет изменения плотности и вязкости от температуры значительно усложняет вычисления.

Изменение плотности и вязкости рабочей жидкости в широком диапазоне температур влияет на энергоемкость процессов передачи и преобразования энергии, протекающих в гидравлической системе карьерного экскаватора, и для получения точных результатов необходим учет этих изменений. С изменением температуры изменяется величина каждого типа потерь мощности. С ростом температуры рабочей жидкости уменьшается ее вязкость, что влечет за собой уменьшение потерь мощности из-за гидравлических потерь в трубопроводах и местных сопротивлениях и одновременно увеличение потерь мощности из-за возрастания объема утечек в элементах гидравлической системы.

Изменение плотности рабочей жидкости в рабочем диапазоне температур влияет на величину потерь мощности, носит линейный характер и может быть определено по формуле [9-11]

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \alpha_t \Delta t},$$

где ρ_0 , ρ_t – плотность рабочей жидкости при температуре t_0 и t , кг/м³; Δt – изменение температуры, °C; α_t – коэффициент температурного расширения, °C⁻¹.

Изменение вязкости рабочей жидкости при изменении температуры в диапазоне 40-110 °C определяется из выражения

$$\nu_t = \nu_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n,$$

где ν_0 , ν_t – кинематический коэффициент вязкости при температуре t_0 и t , м²/с; n – коэффициент, зависящий от типа и марки рабочей жидкости, температуры t_0 и вязкости ν_0 [9, 10, 12].

В диапазоне температур от 0 до 40 °C выражение для расчета кинематической вязкости принимает следующий вид:

$$\nu_t = at^2 + bt + c,$$

где a , b , c – коэффициенты, зависящие от температуры и характеристик рабочей жидкости, определяются по справочной литературе или экспериментально. Их значения для рабочей жидкости Shell Tellus S2 V 46 в интервалах температуры до 40 °C представлены в табл.1.

Таблица 1

Значения коэффициентов для рабочей жидкости Shell Tellus S2 V 46

Интервал температуры t	Коэффициенты		
	a	b	c
0-10	0,9	-30,5	430
10-20	0,6	-28	435
20-30	0,14	-11,3	285
30-40	0,04	-5,4	198

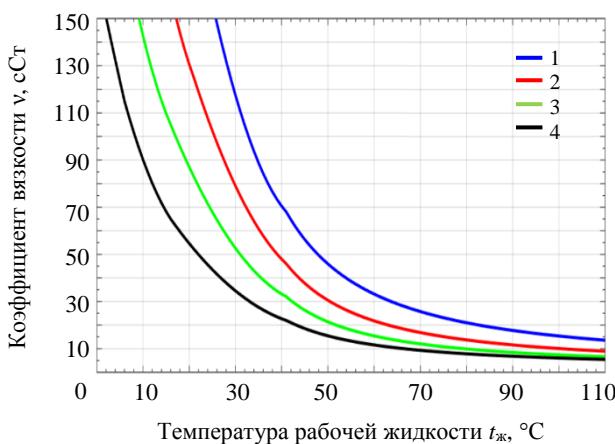


Рис.1. Зависимость вязкости рабочих жидкостей от температуры

1 – Shell Tellus S2 V 68; 2 – S2 V 46; 3 – S2 V 32; 4 – S2 V 22

где i – количество прямых участков гидравлической трубы; λ_i – коэффициент гидравлического трения для соответствующей гидролинии; L_i , d_i – длина и внутренний диаметр i -го трубопровода; v_i – средняя скорость потока рабочей жидкости i -го трубопровода [10, 13, 14].

Величина коэффициента гидравлического трения зависит от характера течения жидкости. После длительного простоя, сразу после запуска гидросистемы, когда жидкость еще не прогрелась, в каналах может наблюдаться ламинарное течение и коэффициент гидравлического трения принято подсчитывать по формуле Пуазейля [10, 14, 15]

$$\lambda = \frac{64}{Re}.$$

Далее при турбулентном режиме по формуле Блазиуса [14-16] определяется

$$\lambda = 0,3164 Re^{-0,25},$$

где Re – число Рейнольдса потока рабочей жидкости в трубопроводе.

Также потери возникают, когда жидкость проходит через местные сопротивления: фитинги, клапаны, управляющие устройства гидросистемы. Величину потерь давления рассчитывают по формуле [14, 17]

$$\sum \Delta p_{\phi} = \sum_{j=1}^J \rho g K_j \left(\frac{v_j^2}{2g} \right) = \frac{\rho}{2} \sum_{j=1}^J K_j v_j^2,$$

где K – коэффициент местных потерь давления, значения определяются по справочной литературе или экспериментально.

Рабочий цикл рабочей камеры аксиально-поршневого насоса состоит из процессов всасывания и нагнетания рабочей жидкости. Причиной утечек рабочей жидкости в насосе служит большая разница давлений между рабочей камерой и корпусом. Объемные потери возникают, когда происходит вытеснение жидкости в напорную магистраль. Утечки рабочей жидкости из рабочей камеры складываются из четырех компонентов: утечки через зазор между плунжером и стенкой цилиндра Q_{pc} ; через зазор между плунжером и башмаком Q_{ps} ; через зазор между башмаком и упорным диском Q_{ss} ; через зазор между блоком цилиндров и распределительным диском Q_{cv} (рис.2, а).

Утечки рабочей жидкости через кольцевой зазор между плунжером и стенкой цилиндра определяются по выражению [10, 17, 18]

$$Q_{pc} = \frac{\pi d_p h_{pc}^3 (P_1 - P_0)}{12 \mu l} (1 + 1,5 \eta^2) - \frac{\pi d_p h_{pc} v}{2}, \quad (1)$$

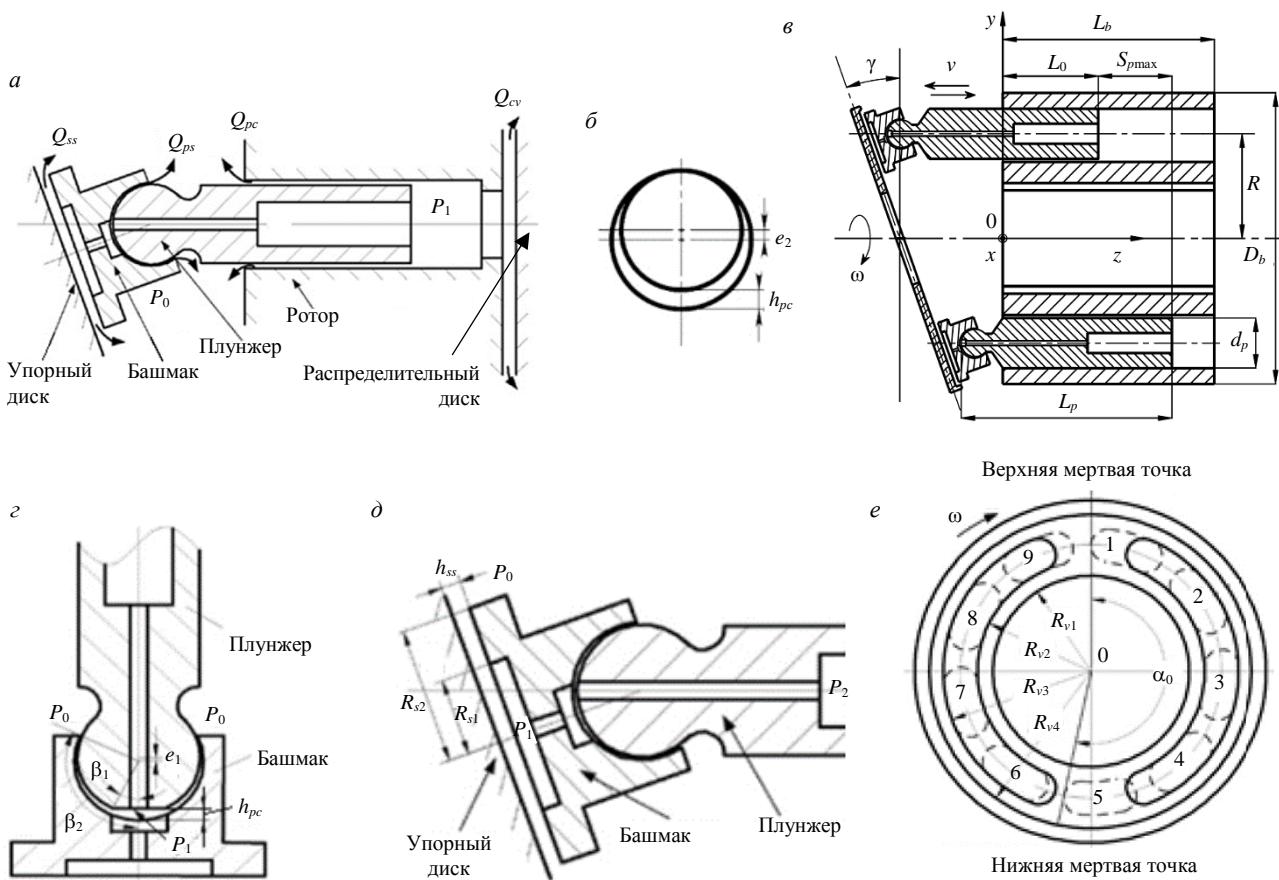


Рис.2. Утечки рабочей жидкости в аксиально-плунжерных насосах и гидромоторах

где d_p – диаметр плунжера, м; h_{pc} – ширина зазора между плунжером и цилиндром, м; P_1 , P_0 – давление в рабочей камере насоса и в корпусе, Па; μ – динамический коэффициент вязкости рабочей жидкости, Па·с; l – длина плунжера в цилиндре, м; $\eta = e/h_{pc}$ – относительный эксцентрикситет; e – эксцентрикситет плунжера относительно цилиндра, м; v – скорость движения плунжера в рабочей камере, м/с (рис.2, б, в) [10].

Утечки рабочей жидкости в сферическом шарнире между плунжером и башмаком определяются по выражению [10, 17, 18]

$$Q_{ps} = \frac{\pi h_{ps}^3 (P_1 - P_0)}{3\mu \left(\operatorname{tg}^2 \beta_2 - \operatorname{tg}^2 \beta_1 + 2 \ln \left| \frac{\operatorname{tg} \beta_2}{\operatorname{tg} \beta_1} \right| \right)}, \quad (2)$$

где h_{ps} – ширина зазора сферического шарнира, м; P_1 , P_0 – давление в камере башмака и в корпусе насоса, Па; β_1 , β_2 – конструктивные углы сферического сочленения плунжера и башмака, рад (рис.2, г).

Утечки рабочей жидкости через зазор между башмаком и упорным диском определяются по формуле [10, 18, 19]

$$Q_{ss} = \frac{\pi h_{ss}^3 (P_1 - P_0)}{6\mu \ln(R_{s2} / R_{s1})}, \quad (3)$$

где h_{ss} – ширина зазора между башмаком и упорным диском, м; R_{s1} – радиус проточки, м; R_{s2} – наружный радиус башмака плунжера, м (рис.2, д).

Утечки рабочей жидкости через зазор между блоком цилиндров и распределительным диском определяются по выражению [10, 18, 20]

$$Q_{cv} = \frac{a_0 h_{cv}^3 (P_s - P_0)}{12\mu} \left[\frac{1}{\ln(R_{v2}/R_{v1})} + \frac{1}{\ln(R_{v4}/R_{v3})} \right], \quad (4)$$

где h_{cv} – ширина зазора между блоком цилиндров и распределительным диском, м; $R_{v1}, R_{v2}, R_{v3}, R_{v4}$ – размеры распределительного диска, м (рис.2, e).

Суммируя результаты формул (1)-(4), с учетом рабочего цикла камер и конструкции насоса получим

$$Q_{\text{пл}} = \frac{z}{2} (Q_{pc} + Q_{ps} + Q_{ss} + Q_{cv}),$$

где z – число рабочих камер в насосе.

Принимая во внимание допущения, общие потери мощности в гидравлической системе карьерного экскаватора можно записать в виде [21-23]

$$\Delta N = \frac{Q_3 \Delta p + Q_{\text{пл}} p}{1000},$$

где Q_3 – объемный расход рабочей жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; Δp – потери давления в гидравлической системе, Па; $Q_{\text{пл}}$ – суммарные утечки рабочей жидкости в насосах и гидромоторах, $\text{м}^3/\text{с}$; p – рабочее давление в гидросистеме, Па.

Математическая модель, используемая для программирования вычислений с использованием программного обеспечения MatLab Simulink, построена на основе рассмотренных уравнений и выражений. Основными параметрами, использованными в расчетах и моделировании, являются фактические параметры гидравлической системы карьерного экскаватора Komatsu PC750-7 по данным каталога производителя (табл.2).

Таблица 2

Исходные параметры для моделирования

Элемент системы	Параметры
Рабочая жидкость Shell Tellus S2 V 440 л	Плотность при $t_{\text{ж}} = 15^{\circ}\text{C}$: $\rho = 872 \text{ кг}/\text{м}^3$
Главный гидронасос HPV160+160 2 шт.	Диаметр рабочей камеры $d_p = 22,5 \text{ мм}$ Длина плунжера $L_p = 100 \text{ мм}$ Радиус окружности осей рабочих камер $R_p = 49,5 \text{ мм}$ Угол наклона упорного диска $\gamma = 19,5^{\circ}$ Минимальная длина плунжера в рабочей камере $l_0 = 45 \text{ мм}$ Количество рабочих камер $z = 9$ Частота вращения $n = 2400 \text{ об}/\text{мин}$ Давление в рабочей камере $P_s = 31 \text{ МПа}$ Давление в корпусе $P_0 = 1,5 \text{ МПа}$ Конструктивные размеры упорного башмака плунжера $R_{s1} = 8 \text{ мм}; R_{s2} = 13^{\circ}$ Конструктивные углы сферического сочленения плунжера и башмака $\beta_1 = 14^{\circ}; \beta_2 = 119^{\circ}$ Конструктивные размеры распределительного узла $R_{v1} = 29 \text{ мм}; R_{v2} = 38 \text{ мм}; R_{v3} = 50 \text{ мм}; R_{v4} = 60 \text{ мм}; \alpha_0 = 193^{\circ}$
Гидромоторы поворота платформы (аксиально-плунжерные) 2 шт.	Рабочий объем $q_1 = 255 \text{ см}^3/\text{об}$ Частота вращения 260 об/мин Рабочее давление 28,4 МПа Мощность 31,4 кВт Механический КПД $\eta_{\text{мех}} = 0,98$ Объемный КПД $\eta_0 = 0,96$
Гидроцилиндры подъема стрелы 2 шт.	Расходы в процессах: копания $0,0018 \text{ м}^3/\text{с}$ подъема и поворота $0,0013 \text{ м}^3/\text{с}$ разгрузки $0,0014 \text{ м}^3/\text{с}$ возврата и опускания $0,00144 \text{ м}^3/\text{с}$ Внутренний диаметр гидролиний $d_{\text{трн}} = 19,05 \text{ мм}$ Длина гидролиний $L_{\text{тр}} = 13,4 \text{ м}$



Окончание табл.2

Элемент системы	Параметры
Гидроцилиндры рукояти 2 шт.	Расходы в процессах: копания 0,002 м ³ /с подъема и поворота 0,00014 м ³ /с разгрузки 0,00105 м ³ /с возврата и опускания 0,001903 м ³ /с Внутренний диаметр гидролиний $d_{trin} = 19,05$ мм Длина гидролиний $L_{tr} = 23$ м
Гидроцилиндры ковша 1 шт.	Расходы в процессах: копания 0,00191 м ³ /с подъема и поворота 0,001804 м ³ /с разгрузки 0,0021 м ³ /с возврата и опускания 0,00115 м ³ /с Внутренний диаметр гидролиний $d_{trin} = 19,05$ мм Длина гидролиний $L_{tr} = 23$ м
Маслоохладитель 1 шт.	Размеры овальных труб в маслоохладителе: $a = 22,1$ мм; $b = 6$ мм; $\delta_{tr} = 0,75$ мм Число рядов труб $z_{ряд} = 3$ Число труб в ряду $m_{колонки} = 51$ Длина труб $L_{tr} = 1290$ мм
Фильтры 5 шт. Распределитель 3 шт. Дроссель 3 шт. Стандартный угольник 90° 34 шт. Обратный клапан 5 шт. Всасывающая линия насоса	Коэффициенты местных сопротивлений 5-12 Коэффициенты местных сопротивлений 3-5 Коэффициенты местных сопротивлений 0-100 Коэффициенты местных сопротивлений 1 Коэффициенты местных сопротивлений 1-5 Диаметр 35 мм Длина 2,5 м

Численное моделирование физических процессов нашло широкое применение в области исследования процессов карьерных гидравлических экскаваторов, поскольку позволяет учитывать величины, изменяющиеся по нелинейным зависимостям, и решить ранее рассматривавшиеся задачи с существенно большей точностью [24-26]. Для компьютерного моделирования потерь мощности в гидравлической системе использовалась разработанная методика расчета и программный алгоритм, реализованный в среде MatLab Simulink.

Обсуждение результатов. Подготовка численного эксперимента потребовала проведения анализа рабочего цикла карьерного гидравлического экскаватора Komatsu PC750-7 [27-29]. Были установлены точные значения скоростей потоков на различных участках гидравлических линий, а также в отдельных устройствах гидравлической системы экскаватора, что важно для точного определения потерь энергии [30-32]. В результате моделирования получены значения потерь мощности в процессе выполнения рабочих операций при различных значениях температур (табл.3).

Таблица 3

Потери мощности в процессе выполнения рабочих операций, кВт

Температура рабочей жидкости $t_{ж}$, °C	Копание	Подъем и поворот	Разгрузка	Возврат и опускание	Объемные утечки
0	390,2	110,3	269,3	222,5	1,6
20	126,3	41,73	90,08	76,23	5,99
30	90,78	32,44	65,92	56,42	9,64
40	71,43	27,51	52,34	45,74	15,2
50	58,41	24,34	43,69	38,73	24
55	54,66	23,39	41,16	36,68	28,71
60	51,87	22,69	39,28	35,15	33,56
70	48,04	21,71	36,69	33,04	43,51
80	45,54	21,07	35,02	31,67	53,62
90	43,8	20,61	33,85	30,71	63,76
110	41,52	20,02	32,33	29,45	83,78

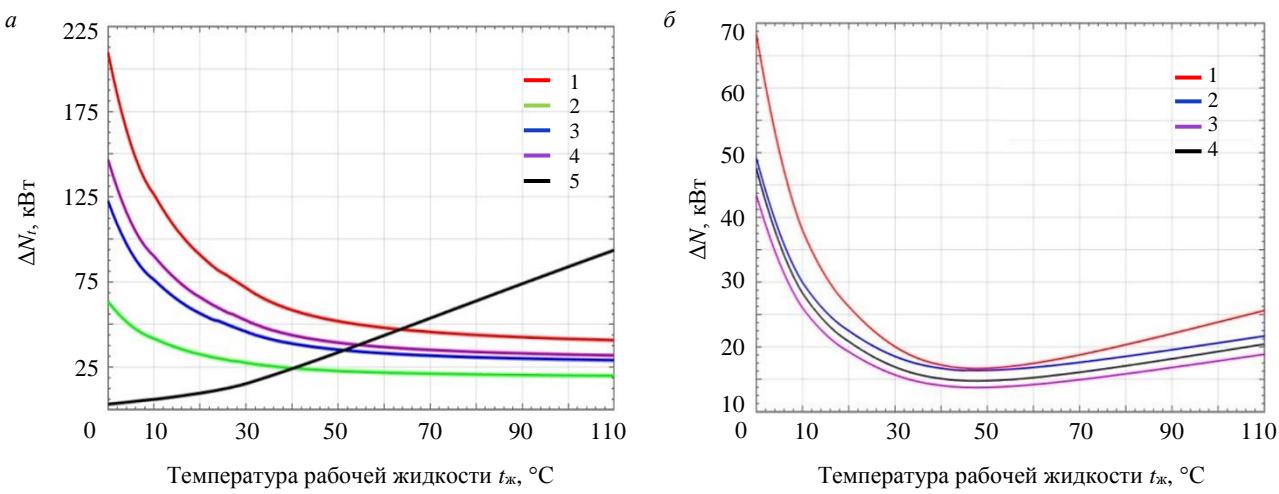


Рис.3. Потери мощности в зависимости от температуры рабочей жидкости:
 а – из-за объемных утечек, гидравлических потерь по длине трубопроводов, местных сопротивлений
 (1 – в процессе копания; 2 – подъема и поворота; 3 – возврата и опускания; 4 – разгрузки; 5 – в основных гидронасосах)
 б – суммарные потери мощности при осуществлении рабочих процессов
 (1 – копания; 2 – подъема и поворота; 3 – разгрузки; 4 – возврата и опускания)

На рис.3 представлены потери мощности из-за объемных утечек, гидравлических потерь по длине трубопроводов и местных сопротивлений в зависимости от температуры рабочей жидкости для операций копания горной массы, подъема и поворота, разгрузки, возврата и опускания рабочего оборудования.

Из представленных графических зависимостей наглядно видно, что потери энергии при различных рабочих операциях существенно отличаются друг от друга, что не противоречит ранее публиковавшимся результатам [33-35]. По мере увеличения температуры жидкости потери мощности из-за гидравлических потерь по длине трубопроводов и местных сопротивлений будут уменьшаться, тогда как потери мощности из-за объемных утечек увеличиваются.

Значения суммарных потерь мощности ΔN при различных операциях рабочего цикла экскаватора отличаются по величине, но все они имеют общую особенность: суммарные потери мощности уменьшаются с увеличением температуры рабочей жидкости от 0 до 30-35 °C, достигая самого низкого значения в диапазоне температур от 35 до 55 °C. После 55 °C потери мощности быстро повышаются с ростом температуры. Поскольку утечки в управляющих устройствах гидравлической системы на этом этапе исследований не учитывались, потери мощности с повышением температуры в рассматриваемом примере будут являться нижней границей значений.

Общие потери мощности в зависимости от температуры для различных рабочих жидкостей представлены на рис.4. Графические зависимости наглядно показывают существенный перерасход энергии при работе на непрогретом гидравлическом масле и необходимость его прогрева перед началом работы до 30-40 °C.

Из данных зависимостей следует, что при работе экскаватора в зимних условиях целесообразно использовать рабочие жидкости с меньшей вязкостью, а при работе в жарком климате, например в условиях Вьетнама, применять рабочие жидкости с повышенной вязкостью. Оптимальное значение температуры зависит от вязкости и других характеристик жидкости, от технического состояния элементов гидросистемы и горно-технических факторов эксплуатации, влияющих на продолжительность рабочих циклов, поэтому абсолютные потери мощности в определенных условиях не являются информативным показателем.

Для оценки энергоэффективности гидравлической системы карьерного экскаватора предложен коэффициент потери мощности, определяемый как отношение минимально возможных потерь мощности в гидросистеме в рассматриваемых условиях эксплуатации к фактическим:

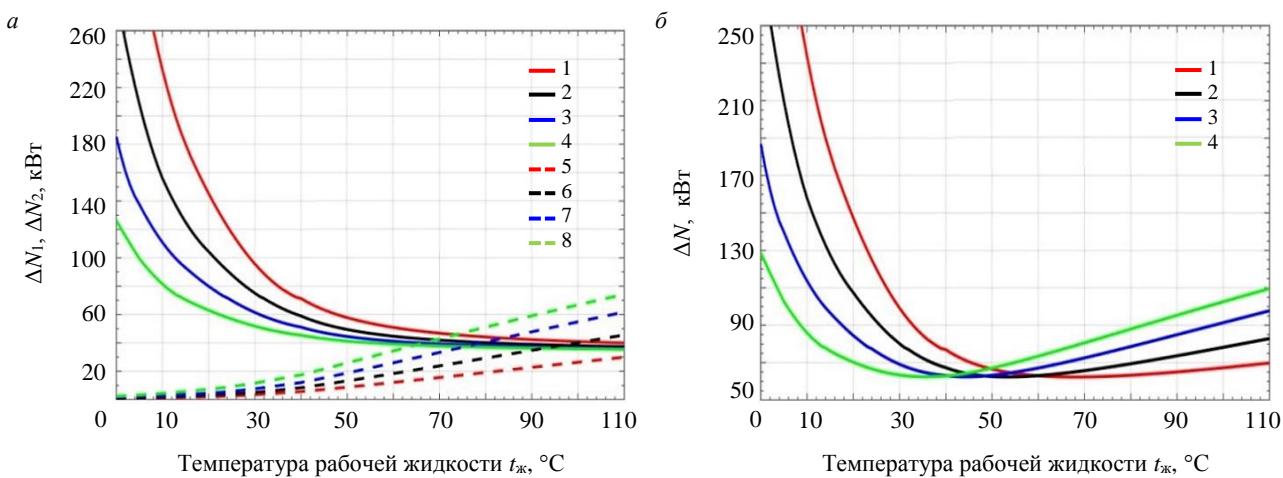


Рис.4. Потери мощности в зависимости от температуры для различных рабочих жидкостей:
 а – из-за объемных утечек, гидравлических потерь по длине трубопроводов и местных сопротивлений
 (1, 5 – ΔN_1 и ΔN_2 при использовании Shell Tellus S2 V 68; 2, 6 – ΔN_1 и ΔN_2 при Shell Tellus S2 V 46;
 3, 7 – ΔN_1 и ΔN_2 при Shell Tellus S2 V 32; 4, 8 – ΔN_1 и ΔN_2 при Shell Tellus S2 V 22)

б – общие потери мощности при осуществлении рабочих процессов
 (1 – ΔN при использовании Shell Tellus S2 V 68; 2 – при Shell Tellus S2 V 46; 3 – при Shell Tellus S2 V 32; 4 – при Shell Tellus S2 V 22)

$$K_{\text{пп}} = \frac{\Delta N_{\min}}{\Delta N_{\phi}},$$

где ΔN_{\min} – минимально возможные потери мощности в данных условиях; ΔN_{ϕ} – фактические потери мощности.

Значения коэффициентов потери мощности при использовании рабочих жидкостей представлены на рис.5. Предложено понятие «температурный интервал потери мощности $T_{\text{ппм}}$ » – интервал между минимальной и максимальной температурами, соответствующими значению коэффициента потери мощности.

Диапазон температур при значении коэффициента потерь мощности 0,8; 0,9; 0,95 для жидкостей с различной вязкостью в рассматриваемых условиях представлен в табл.4: ν – вязкость рабочей жидкости; t_{opt} – значение температуры для наименьших потерь энергии; t_{-A} , t_{+A} – наименьшее и наибольшее значения температуры в рассматриваемом интервале; t_{-Or} , t_{+Or} – величина интервала температуры от t_{opt} до t_{-A} , t_{+A} ; $t_{+}-t_{-}$ – величина интервала температуры от t_{-A} до t_{+A} .

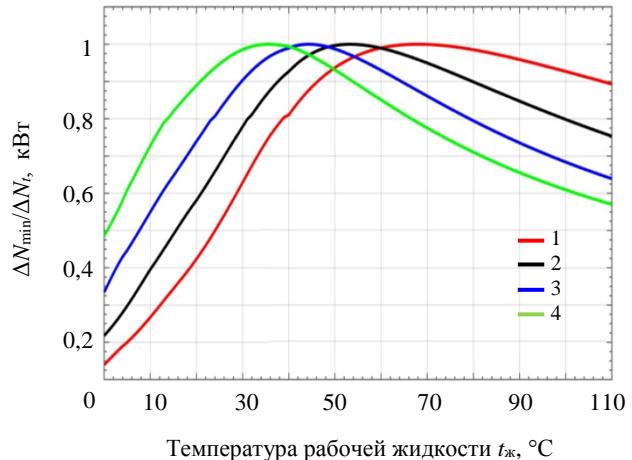


Рис.5. Изменение значений коэффициента потери мощности в зависимости от температуры
 1 – $\Delta N_{\min}/\Delta N_t$ при использовании Shell Tellus S2 V 68;
 2 – при Shell Tellus S2 V 46; 3 – при Shell Tellus S2 V 32;
 4 – при Shell Tellus S2 V 22

Таблица 4

Значения диапазона температур при различной вязкости рабочих жидкостей

ν , cSt	t_{opt}	$K_{\text{пп}} = 0,8$					$K_{\text{пп}} = 0,9$					$K_{\text{пп}} = 0,95$				
		t_{-A}	t_{-Or}	t_{+A}	t_{+Or}	$t_{+}-t_{-}$	t_{-A}	t_{-Or}	t_{+A}	t_{+Or}	$t_{+}-t_{-}$	t_{-A}	t_{-Or}	t_{+A}	t_{+Or}	$t_{+}-t_{-}$
22	35	12	23	68	33	56	20	15	52	17	32	25	10	45	10	15
32	44	24	20	79	35	55	30	14	62	18	32	32	12	53	9	21
46	55	30	25	100	45	70	38	17	80	35	42	42	13	70	15	28
68	68	40	28	> 110	> 45	80	48	20	108	50	60	52	16	95	27	43

Из графических зависимостей и данных, представленных в табл.4, следует, что с увеличением вязкости увеличивается разность значений высокой и оптимальной температуры, а также величина интервала потери мощности, соответствующие заданному значению K_{pm} .

Заключение. Предложена методика расчета потерь мощности в гидросистеме карьерного гидравлического экскаватора в зависимости от температуры, реализованная с использованием программы MatLab Simulink на примере рабочей жидкости Shell Tellus SV 2 46 и гидросистемы экскаватора Komatsu PC750-7.

• В диапазоне от 0 до 30-50 °C 70-80 % потерь мощности составляют гидравлические потери в трубопроводах и местных сопротивлениях, которые уменьшаются по квадратической зависимости с уменьшением вязкости рабочей жидкости, вызванной увеличением температуры. После 30-50 °C при дальнейшем уменьшении вязкости рабочей жидкости из-за увеличения утечек в насосах и гидромоторах основные потери мощности возрастают по зависимости, близкой к прямой. Угол наклона зависимости определяется техническим состоянием гидромоторов и насосов, в первую очередь основных насосов, параметрами рабочей жидкости и горно-техническими факторами эксплуатации.

• Предложен критерий оценки потерь энергии в гидросистеме карьерного гидравлического экскаватора в зависимости от температуры рабочей жидкости – коэффициент потерь мощности K_{pm} , получаемый сравнением минимально возможных потерь при оптимальной температуре в данных условиях с потерями энергии при фактической температуре. Использование коэффициента позволяет оценивать «излишние» потери энергии при отклонении от диапазона, близкого к оптимальной температуре рабочей жидкости в рассматриваемых условиях и гидравлических системах других машин.

• Предложено понятие «температурный интервал потери мощности $T_{\text{ппм}}$ » – интервал между минимальной и максимальной температурами, соответствующими значению коэффициента потери мощности.

• Расчеты показали, что проведение мероприятий, обеспечивающих работу в интервале с отклонением 10 % от оптимального значения температуры ($K_{\text{пп}} \geq 0,9$) для данных условий, позволяет сократить потери энергии от 3 до 12 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пудов Е.Ю., Занг К.К., Кузин Е.Г., Кривенко А.Е. Оценка влияния условий эксплуатации на производительность работы системы охлаждения рабочей жидкости гидравлического карьерного экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 1. С. 51-58. DOI: [10.26730/1816-4528-2021-1-51-58](https://doi.org/10.26730/1816-4528-2021-1-51-58)
2. Özmen Ö., Sinanoğlu C., Batbat T., Güven A. Prediction of Slipper Pressure Distribution and Leakage Behaviour in Axial Piston Pumps Using ANN and MGGP // Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2019. № 7317520. P. 1-13. DOI: [10.1155/2019/7317520](https://doi.org/10.1155/2019/7317520)
3. Bergada J.M., Kumar S., Davies D.L., Watton J. A complete analysis of axial piston pump leakage and output flow ripples // Applied Mathematical Modelling. 2012. Vol. 36. Iss. 4. P. 1731-1751. DOI: [10.1016/j.apm.2011.09.016](https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.016)
4. Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С., Иванов И.Ю. Энергопотребление одноковшовых экскаваторов // Горный журнал. 2018. № 1. С. 73-77. DOI: [10.17580/gzh.2018.01.13](https://doi.org/10.17580/gzh.2018.01.13)
5. Juza M., Hermanek P. Study of the energy efficiency of the UDS 214 excavator hydraulic system // MM Science Journal. 2022. Iss. 3. P. 5768-5774. DOI: [10.17973/MMSJ.2022_10_2022077](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2022_10_2022077)
6. Casoli P., Scolari F., Vescovini C.M. et al. Excavator hydraulic circuit solution to reduce dissipations and fuel consumption // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 312. № 05004. DOI: [10.1051/e3sconf/202131205004](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131205004)
7. Balakhnina E., Vykhodtseva G., Sizova E. et al. Theoretical interpretation of the function of changing the tractive effort of a quarry locomotive in the starting mode // AIP Conference Proceedings. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2021, 6-10 September 2021, Sevastopol, Russia. AIP Publishing, 2022. Vol. 2503. Iss. 1. № 050049. DOI: [10.1063/5.0100861](https://doi.org/10.1063/5.0100861)
8. Balakhnina E., Sizova E., Vykhodtseva G., Mishedchenko O. Investigation of the Dependence of the Friction Coefficient Change on the Speed under Rational Starting Modes of a Quarry Locomotive // AIP Conference Proceedings, International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2021, 6-10 September 2021, Sevastopol, Russia. AIP Publishing, 2022. Vol. 2503. Iss. 1. № 050048. DOI: [10.1063/5.0100597](https://doi.org/10.1063/5.0100597)
9. Пудов Е.Ю., Занг К.К., Кузин Е.Г. и др. Влияние температуры окружающей среды и типа рабочей жидкости на термодинамическое равновесие гидравлической системы карьерных экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 1. С. 45-50. DOI: [10.26730/1816-4528-2021-1-45-50](https://doi.org/10.26730/1816-4528-2021-1-45-50)
10. Занг К.К. Обоснование и выбор параметров охладителя гидросистемы карьерного гидравлического экскаватора при эксплуатации в условиях Республики Вьетнам: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСиС, 2021. 21 с.
11. Abduaizov N.A., Muzaffarov A., Toshov J.B. et al. A complex of methods for analyzing the working fluid of a hydrostatic power plant for hydraulic mining machines // International Journal of Advanced Science and Tehnology. 2020. Vol. 29. SI5. P. 852-855.



12. Абдуазизов Н.А., Джураев Р.У., Жураев А.Ш. Исследование влияния температуры и вязкости рабочей жидкости гидравлических систем на надежность работы горного оборудования // Горный вестник Узбекистана. 2018. № 3 (74). С. 58-60. DOI: 10.13140/RG.2.2.11942.96329
13. Xia Lianpeng, Quan Long, Cao Donghui et al. Research on Energy Saving Characteristics of Large Hydraulic Excavator Boom Driven by Dual Hydraulic-gas Energy Storage Cylinder // Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 55. Iss. 20. P. 240-248. DOI: 10.3901/JME.2019.20.240
14. Yusuf S.I., Ejeh S., Olayiwola R.O. Analytical Study of Leakage of Viscous Flow in a Cylindrical Pipe // International Journal of Scientific Engineering and Applied Science. 2022. Vol. 8. Iss. 3. P. 74-93.
15. Siddique M.A.A., Yong-Joo Kim, Wan-Soo Kim et al. Effects of Temperatures and Viscosity of the Hydraulic Oils on the Proportional Valve for a Rice Transplanter Based on PID Control Algorithm // Agriculture. 2020. Vol. 10. Iss. 3. № 73. DOI: 10.3390/agriculture10030073
16. Lukashuk O.A., Komissarov A.P., Letnev K.Y. Increasing power efficiency of open-pit excavators // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 709. Iss. 2. № 022083. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022083
17. Ruichuan Li, Jilu Liu, Xinkai Ding, Qi Liu. Study on the Influence of Flow Distribution Structure of Piston Pump on the Output of Pulsation Pump // Processes. 2022. Vol. 10. Iss. 6. № 1077. DOI: 10.3390/pr10061077
18. Haocen Hong, Chunxiao Zhao, Bin Zhang et al. Flow Ripple Reduction of Axial-Piston Pump by Structure Optimizing of Outlet Triangular Damping Groove // Processes. 2020. Vol. 8. Iss. 12. № 1664. DOI: 10.3390/pr8121664
19. Shishlyannikov D., Zverev V., Ivanchenko A., Zvonarev I. Increasing the Time between Failures of Electric Submersible Pumps for Oil Production with High Content of Mechanical Impurities // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 1. № 64. DOI: 10.3390/app12010064
20. Xingjian Wang, Siru Lin, Shaoping Wang et al. Remaining useful life prediction based on the Wiener process for an aviation axial piston pump // Chinese Journal of Aeronautics. 2016. Vol. 29. Iss. 3. P. 779-788. DOI: 10.1016/j.cja.2015.12.020
21. Yingxiao Yu, Tri Cuong Do, Bifeng Yin, Kyoung Kwan Ahn. Improvement of Energy Saving for Hybrid Hydraulic Excavator with Novel Powertrain // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2023. Vol. 10. Iss. 2. P. 521-534. DOI: 10.1007/s40684-022-00437-9
22. Hidayat H., Aviva D., Muis A. et al. Failure analysis of excavator hydraulic pump // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1212. Iss. 1. № 012052. DOI: 10.1088/1757-899X/1212/1/012052
23. Макарова В.В., Лагунова Ю.А., Ковязин Р.А., Нестеров В.И. Новый подход к созданию гидравлических экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 6. С. 9-14. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-9-14
24. Литвин О.И., Марков С.О., Хорешок А.А. и др. Определение области энергоэффективного положения рабочего оборудования и эффективного радиуса черпания гидравлических экскаваторов на открытых горных работах // Маркшейдерия и недропользование. 2022. № 4 (120). С. 38-44. DOI: 10.56195/20793332_2022_4_38
25. Kujundžić T., Klanfar M., Korman T., Briševac Z. Influence of Crushed Rock Properties on the Productivity of a Hydraulic Excavator // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 5. № 2345. DOI: 10.3390/app11052345
26. Holt G.D., Edwards D. Analysis of interrelationships among excavator productivity modifying factors // International Journal of Productivity and Performance Management. 2015. Vol. 64. № 6. P. 853-869. DOI: 10.1108/IJPPM-02-2014-0026
27. Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Лукашук О.А., Шестаков В.С. Программное управление процессом экскавации горных пород карьерным экскаватором // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 5. С. 28-33. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-28-33
28. Литвин О.И., Хорешок А.А., Дубинкин Д.М. и др. Анализ методик расчета производительности карьерных гидравлических экскаваторов // Горная промышленность. 2022. № 5. С. 112-120. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-112-120
29. Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Набиуллин Р.Ш., Хорошавин С.А. Цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 4. С. 156-168. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_156
30. Litvin O., Litvin Y. Evaluation of Effect of the Excavator Cycle Duration on its Productivity // E3S Web of Conferences. Vol. 174. № 01010. P. 1-5. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401010
31. Sobolevskyi R., Korobiichuk V., Levytskyi V. et al. Optimization of the process of efficiency management of the primary kaolin excavation on the curved face of the conditioned area // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2020. Vol. 35. № 1. P. 123-138. DOI: 10.17794/rgn.2020.1.10
32. Klanfar M., Herceg V., Kuhinek D., Sekulić K. Construction and testing of the measurement system for excavator productivity // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2019. Vol. 34. № 2. P. 51-58. DOI: 10.17794/rgn.2019.2.6
33. Cheol-Gyu Park, Seungjin Yoo, Hyeonsik Ahn et al. A coupled hydraulic and mechanical system simulation for hydraulic excavators // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering 2019. Vol. 234. Iss. 4. P. 527-549. DOI: 10.1177/0959651819861612
34. Ng F., Harding A.J., Glass J. An eco-approach to optimise efficiency and productivity of a hydraulic excavator // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 112. Part 5. P. 3966-3976. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.06.110
35. Juraev A. Study of the Effect of Hydraulic Systems Operation on the General Performance of a Hydraulic Excavator // The American Journal of Engineering and Technology. 2021. Vol. 3. Iss. 10. P. 36-42. DOI: 10.37547/tajet/Volume03Issue10-07

Авторы: М.Г.Рахутин, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-5873-5550> (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия), Занг Куок Кхань, канд. техн. наук, преподаватель, <https://orcid.org/0009-0006-8589-5609> (Куангниньский индустриальный университет, Куангнинь, Вьетнам), А.Е.Кривенко, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-7198-4447> (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия), Чан Ван Хиен, аспирант, <https://orcid.org/0000-0003-0962-5835> (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Повышение энергетической эффективности руднотермических печей при плавке алюмокремниевого сырья

В.Ю.БАЖИН¹, Я.В.УСТИНОВА¹✉, С.Н.ФЕДОРОВ², М.Э.Х.ШАЛАБИ³

¹Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

³Центральный научно-исследовательский металлургический институт, Каир, Египет

Как цитировать эту статью: Бажин В.Ю., Устинова Я.В., Федоров С.Н., Шалаби М.Э.Х. Повышение энергетической эффективности руднотермических печей при плавке алюмокремниевого сырья // Записки Горного института. 2023. С. 384-391. EDN RTQXSE

Аннотация. Вопросы энергосбережения пирометаллургических производств при переработке минерального сырья в руднотермических печах являются особо значимыми для разработки новых энергоэффективных технологий. Снижение удельного расхода электроэнергии во время плавки на разных стадиях нагрева и плавления шихтовых материалов при моделировании связано с получением кинетических кривых в процессе восстановления кианитового концентрата в полигермических условиях. На основе практических данных карбонтермического восстановления проведено математическое моделирование процессов восстановления из алюмокремниевого сырья – кианитов. В данной работе при восстановлении кианитовой шихты был использован неизотермический метод, основанный на постоянной скорости нагрева шихты (т.е. при линейной зависимости между временем и температурой), что экономит электрическую энергию. Эксперименты проводились на высокотемпературной установке с нагревателем, размещенным в углеродитовом тигле. На основании полученных кинетических зависимостей неизотермического нагрева обогащенных кианитовых концентратов в условиях плавленного нагрева получен ряд кинетических аноморфоз линейного вида, который указывает на возможность описания скорости реакций с помощью модифицированного уравнения Колмогорова – Ерофеева при заданных условиях нагрева и в более узком интервале температур. Выявленный при построении математической модели комплекс позволяет создать алгоритм управления технологическим процессом восстановления кианитового концентрата до металлизированного состояния в заданном интервале температур для полного протекания реакционного обмена и снизить удельный расход электроэнергии на 15-20 %. При помощи полученных кинетических зависимостей с учетом термодинамики процессов и современного уровня техники можно создать универсальный тепловой агрегат для оптимального проведения карбонтермического восстановления шихты до металлизированного состояния (сплава) с минимальными энергетическими затратами по сравнению с существующими технологиями.

Ключевые слова: энергосбережение; энергоэффективные технологии; горно-металлургический комплекс; алюмокремниевые руды; алюминий; кремний; восстановление оксида кремния; кинетика; удельный расход электроэнергии

Поступила: 12.01.2023

Принята: 20.06.2023

Онлайн: 19.07.2023

Опубликована: 19.07.2023

Введение. Энергосбережение на производстве при переработке металлургического и техногенного сырья является первостепенным для решения как локальных [1, 2], так и глобальных экологических проблем [3, 4]. Поэтому разработка новых технологий на основе фундаментальных научных подходов имеет большую практическую значимость для стратегического энергоэффективного развития металлургической отрасли [5-7]. Стратегия развития черной и цветной металлургии РФ до 2030 г. включает большой комплекс мер по энергосбережению и снижению удельной энергоемкости продукции, ресурсоемкости и выбросов вредных веществ. В горно-металлургическом комплексе страны [8-10] уже предпринят ряд мер по повышению энергоэффективности производства. Однако дефицит некоторых ресурсов или частичная недоступность ведут к возникновению существенных экономических и промышленных проблем [11-13] и рисков [14-16], а также снижению эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, иногда и полных потерь снабжения предприятий [17-19].



Для производства силуминов, наиболее распространенного вида алюминиевых сплавов, требуется организация производства первичного алюминия в электролизерах, а для получения кремния – карбонтермический способ восстановления из кварцевого сырья в рудотермических печах [20-22]. В производстве первичного алюминия в качестве алюминийсодержащего сырья используется только глинозем, при этом в России имеются значительные трудности обеспечения предприятий собственным сырьем в связи с дефицитом бокситов высокого качества [23, 24]. Дефицит глинозема для электролизного производства, который сложился в результате остановки некоторых предприятий и сокращения доли экспорта по политическим причинам, ведет к поиску инновационных энергосберегательных технологий производства алюминия и силуминов, из альтернативного сырья, которым может стать кианит [25, 26]. Несмотря на сокращение нерентабельных мощностей и консервацию нескольких заводов с устаревшими типами электролизеров, дефицит сырья составляет примерно 45 % от всего производимого на глиноземных комбинатах РФ [27-29].

Для вовлечения новых видов алюминийсодержащего сырья проводятся системные исследования с применением отходов алюминиевой и кремниевой промышленности [30, 31], а также запасов руд алюминий-кремниевого сырья – для вовлечения их в переработку [31, 32]. Конечные продукты этих технологий удовлетворяют лишь узкому спросу в отраслях промышленности ввиду специфики исходного материала и технологических решений, однако они в меньшей степени направлены на прямое производство силуминов из сырья, содержащего оксиды алюминия и кремния, посредством карбонтермического восстановления.

В настоящее время весьма актуальным вопросом является переработка и использование кианитовых руд в различных отраслях промышленности благодаря значительному запасу и простоте их выработки [33] в Кейвах [34, 35] и на Урале [36]. Основными областями использования данного вида сырья после обогащения и разделения концентрата [37-39], кроме огнеупоров и керамики, могут стать производства глинозема и оксида кремния. Однако расчеты показали, что технология дезинтеграции кианитов является экономически нерентабельной в существующих условиях традиционного производства глинозема по способу Байер-спекание [40, 41].

В XX в. было предпринято несколько попыток изучения кианитовых руд Кольского полуострова, начало которому было положено в 1929 г. учеными В.С.Артамоновым, П.А.Борисовым, Н.А.Волотовской. В 1939 г. исследователями института «Механобр» были получены предварительные данные по обогащаемости кианит-кварцевых сланцев, а в 1949 г. ученыые ВАМИ испытали алюмокремниевую руду для получения кианитового концентрата флотационным методом в промышленных условиях. Параллельно изучались геологические аспекты кианитовых месторождений, было выявлено 27 месторождений. Предварительная оценка запасов руды показала объемы в 966 млн т на глубине до 100 м, полный объем исследованных месторождений составил 11 млрд т. Благоприятные условия залегания руды дают возможность разрабатывать их открытым способом с высокими технико-экономическими показателями.

В связи с этим научно-практический интерес представляет изучение прямого восстановления алюмокремниевой шихты для производства заэвтектических силуминов (28 % кремния в конечном сплаве). Известны исследования карбонтермического восстановления глинозема для получения алюминия [42-45]. Так, в работе [43] перспективность данной технологии подтверждается расчетами технико-экономических показателей, а проведенный анализ влияния газопылевых отходов на окружающую среду говорит о низкой экологической нагрузке при производстве алюминия и его сплавов в сравнении с действующим производством. Анализ литературы показал, что перспективными являются методы прямой переработки шихтовых материалов [41, 46], которые обходятся без применения фторсодержащих и канцерогенных веществ (как в электролизе расплавленных солей по способу Холла – Эру), что безусловно является благоприятным фактором. С другой стороны, карбонтермический способ производства алюминия в 70-80-х годах прошлого века имел недостатки в реализации технологического процесса ввиду образования карбидных соединений, в результате чего снижалось извлечение алюминия. А при повышении содержания кремния процесс шел более активно с термодинамической точки зрения. Низкий уровень техники, слабая проработка вопросов, связанных с восстановителями шихты, и несовершенство металлургических агрегатов не создали условий для широкого распространения карбонтермии алюминия и силуминов в производстве.

Несмотря на имеющийся научный задел и практический опыт исследований восстановления алюмокремниевых шихт, остаются не решенными вопросы изучения прямого восстановления шихты до металлизированного состояния. Отсутствуют данные о кинетике и механизме взаимодействия в системе Si-Al-O-C, что является важным технологическим фактором и научным обоснованием для реализации карботермического способа производства силуминов из кианитовых концентратов или подобным им шихтовым материалам. Решение данной проблемы особенно важно для повышения энергоэффективности производства основных алюминиевых сплавов.

Методы. Металлургические процессы, основанные на восстановлении металлов из их соединений углеродом и углеродсодержащими материалами, проходят в руднотермических печах при повышенных температурах и имеют высокие энергетические потери (часть тепла является бросовой, частично расходуется в узлах агрегата и на восстановление примесных элементов и неверно составленного шихтового материала). В ходе работы был рассмотрен способ, позволяющий шире изучить химизм процесса карботермического восстановления кианитовой шихты при получении силумина и устранить потери электроэнергии при металлургическом переделе. Был использован неизотермический метод, который обычно основывается на постоянной скорости нагрева шихты, т.е. при наличии линейной зависимости между временем и температурой, справедливы отношения

$$dT = mdt \text{ и } \frac{da}{dt} = m \frac{da}{dT},$$

где m – скорость нагрева, $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$; a – степень перехода в металлическую фазу (реакционная способность).

Опыты проводились на высокотемпературной установке с углеграфитовым нагревателем с дополнительным элементом – направленной дугой. Регулируемая дуга была необходима для интенсивного нагрева и реализации неизотермического метода обработки кианитовой шихты до заданных значений температур (2000-2300 $^{\circ}\text{C}$).

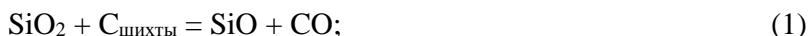
В опытах была использована проба из обогащенного кианитового концентрата с минимальным содержанием оксида титана и железа (табл.1), мольное отношение $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,73$. Содержание углерода в шихте 110 % от количества, теоретически необходимого на восстановление оксидов до металла (силумина). Восстановление проводилось с использованием направленной плазменной дуги (регулируемый плазменный поток) при скорости нагрева 10, 20 и 40 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в интервале температур от 1100 до 2200 $^{\circ}\text{C}$. Суммарная скорость нагрева и кинетика процесса оценивались по скорости газовыделения (рис.1) во время реакции восстановления и регистрации объема диоксида углерода (газоанализатор ИГС-98). Температуру регистрировали при помощи термопары типа ТВР5/20, подключенной к терморегулятору ОВЕН ТРМ1.

Таблица 1

Результаты рентгено-спектрального анализа кианитовых проб, %

Фракция	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	S	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3
Немагнитная	0,2	<0,01	51,33	37,63	0,12	0,013	0,5	0,05	0,6	<0,01	0,18
Магнитная	0,25	0,21	50,98	35,64	0,19	0,029	0,49	0,25	0,67	0,054	1,85

Для термодинамического расчета процесса в заданном интервале температур рассмотрены возможные реакции в более широких значениях 1400-1900 $^{\circ}\text{C}$ по следующей группе уравнений:





где уравнения (3) и (4) относятся к взаимодействию оксидов с мелкими фракциями углерода графитовой среды печи, а остальные уравнения – к взаимодействию с твердым углеродом шихты.

Кинетика восстановления диоксида кремния в заданной области температур 1100-1900 °C изучалась при постоянной скорости нагрева 20 °C/мин. Через каждые 100 °C шихта выдерживалась и извлекалась, определялось изменение массы, анализировался химический состав получаемых остатков (табл.1).

Результаты расчетов приведены на рис.2, а также в табл.2. Протекание реакций в интервале температур 1400-1900 °C по анализу отходящих газов не было зафиксировано.

Кинетические исследования реакций (1) и (2) в условиях полигорячего нагрева (резкого плазменного нагрева) наиболее целесообразно провести на основе обобщенного топокинетического уравнения Колмогорова – Ерофеева [8]:

$$\alpha = 1 - e^{-k\tau^n},$$

где k и n – постоянные скорости и Ерофеева соответственно, причем константа скорости может быть рассчитана по соотношению

$$K = nk^{1/n}.$$

Результаты расчетов и обсуждение.

Поскольку восстановление происходит в более узком температурном интервале при относительно высокой температуре, температуру нагрева T_s правильно выбрать таким образом, чтобы при $T = T_s(\theta = 0)$ $\frac{da}{dT} = \max$ или $\frac{d^2a}{dT^2} = 0$, определив ее для

решения задачи как температуру реакционного максимума для энергоэффективного режима плавки.

Исходя из полученных кинетических зависимостей для реакций (1) и (2), были построены графики $a = f(T)$ и $v_a = f(T)$ и определены a_s , T_s и v_{a_s} , а также рассчитаны кинетические параметры n , E и K_0 , которые доказывают возможность протекания реакции и получения металлического расплава (заэвтектического силумина).

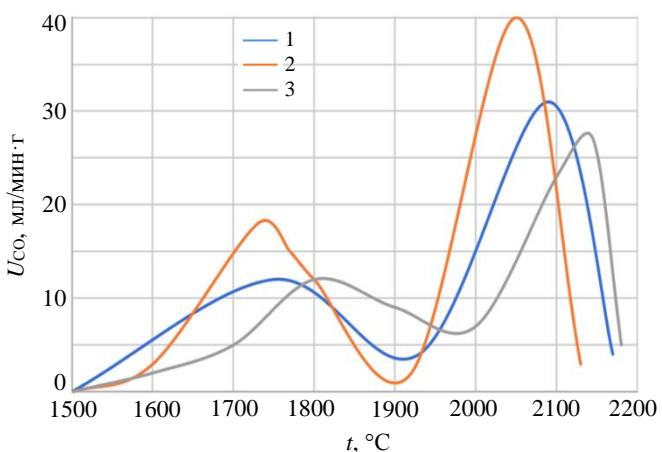


Рис.1. Кинетические кривые восстановления кианитового концентрата в полигорячих условиях

1 – 10 °C/мин; 2 – 20 °C/мин; 3 – 30 °C/мин

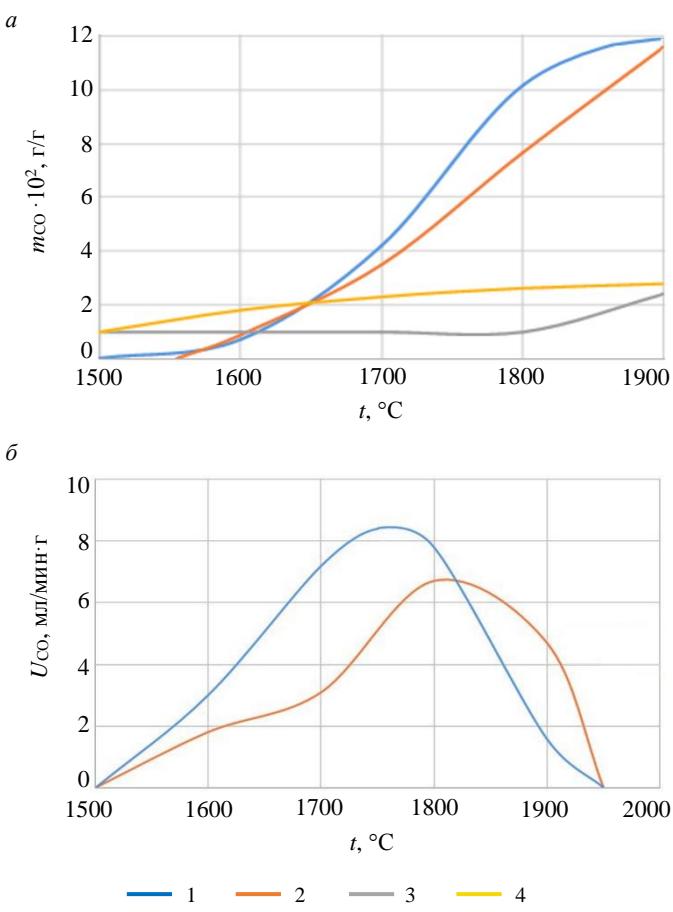


Рис.2. Зависимости количества оксида углерода, выделяющегося по реакциям (1), (2), (4) и (5) (а) и скорости газовыделения для реакций (1) и (2) (б) от температуры при скорости нагрева кианитовой шихты 20 °C/мин

1 – реакция (2); 2 – реакция (1); 3 – реакция (4); 4 – реакция (5)

Таблица 2

Результаты восстановления кианитовой шихты при постоянной скорости нагрева 20 °С/мин

Конечная температура, °С	Масса шихты, г		Масса CO, г	Химический анализ остатков, %				
	До опыта	После опыта		SiO ₂ общ	Al ₂ O ₃ общ	Al ₂ O ₃ раст	SiC	C
1100	—	—	—	25,92	42,32	—	—	28,62
1500	8,85	8,69	0,185	25,98	41,81	1,56	—	28,46
1600	8,93	8,60	0,305	26,29	45,42	1,34	—	28,08
1700	9,05	8,11	0,861	38,73	48,2	0,77	5,33	24,83
1800	8,87	6,96	1,737	30,37	53,50	1,30	1,87	21,04
1900	8,49	6,29	2,081	31,28	58,33	0,56	17,3	18,33

Выполнив подстановку выражения для K_0 , получаем уравнение и зависимость, представленную на рис.3:

$$\ln[-\ln(1-a)] = \frac{nE}{RT_s^2} \theta. \quad (7)$$

Уравнение (7) является уравнением анаморфозы кинетической кривой, которое модифицировано для условий линейного полтермического нагрева в регулируемой плазменной дуге. Уравнение $\ln[-\ln(1-a)]$ зависит от θ или T , поскольку равенство $\theta = T - T_s$ дает линейную зависимость, наклон которой равен $\frac{nE}{RT_s^2}$. Решающим в этом случае является время нагрева и плавления шихты, которое влияет на энергетический режим плавки.

Линейный вид кинетических анаморфоз (рис.3) указывает на возможность описания скорости реакций с помощью модифицированного уравнения Колмогорова – Ерофеева при заданных условиях нагрева и в более узком интервале температур. Это позитивно сказывается на общем энергопотреблении агрегата – наблюдается наиболее эффективное использование полученного тепла как по времени проведения процесса, так и в абсолютных значениях энергопотребления.

Полученный комплекс математической модели позволяет создать алгоритм управления технологическим процессом восстановления кианитового концентратата до металлизированного состояния в заданном интервале температур для полного протекания реакционного обмена, что создает предпосылки для обоснования и разработки современной энергоэффективной технологии.

При помощи полученных зависимостей, учитывая термодинамику процессов и современный уровень техники, можно создать универсальный тепловой агрегат для оптимального процесса карбонтермического восстановления шихты до металлизированного состояния (алюмокремниевого сплава).

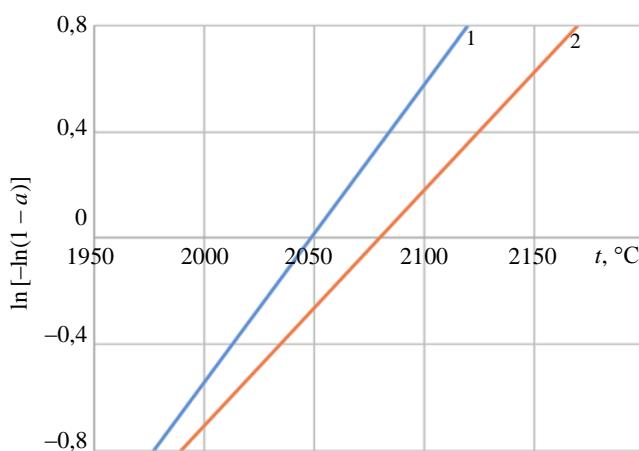


Рис.3. Анаморфозы кинетических кривых для реакций (1) и (2) и скорость нагрева
 1 – реакция (2); 2 – реакция (1)

Описание скорости реакций с помощью модифицированного уравнения Колмогорова – Ерофеева носит углубленный характер повышения эффективности производства алюмокремниевых сплавов. Общие технико-экономические сравнительные характеристики с действующими способами получения силуминов не упомянуты, поскольку отсутствует необходимость получения отдельно алюминия и кремния. Это позволяет значительно снизить энергозатраты на производство силуминов, уменьшить эксплуатационные расходы и капитальные затраты. К достоинствам способа прямой переработки алюмокремниевых руд для производства изделий из силуминов относятся следующие:



• совмещение энергоемких производств алюминия и кремния в одном плавильном агрегате и возможность вовлечения в переработку сырья с высоким содержанием Al и Si (в сумме до 60-70 %), в частности кианитов;

• по сравнению с промышленными электролизерами рудотермические или плазменные печи характеризуются значительно более высокой удельной производительностью, низкими капитальными и эксплуатационными затратами и высокой экологичностью.

Заключение. Для восстановления кианитовой шихты в руднотермической печи был использован неизотермический метод, который основывается на постоянной скорости нагрева шихты, т.е. при линейной зависимости между временем и температурой, что значительно экономит электрическую энергию.

Обоснована целесообразность использования кианитового сырья для энергосберегающего производства сплавов на основе алюминия и кремния, а также силуминов.

Изучение кинетики и механизма взаимодействия в системе Si-Al-O-C, которое проводилось на высокотемпературной установке с углеррафитовым нагревателем при регулируемой дуге, ориентировано на стабилизацию и снижения энергетических потерь. В проведенных опытах была использована проба с мольным отношением $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,73$ и содержанием углерода 90 % от количества, теоретически необходимого на восстановление оксидов минеральной части до металла. В качестве шихтовых материалов использовалась кианитовая руда, подверженная электромагнитной сепарации, комплексный восстановитель. Восстановление проводилось при скорости нагрева 10, 20 и 40 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в интервале температур от 1100 до 2200 $^{\circ}\text{C}$. Расчеты и полученные зависимости указывают на благоприятный режим работы печи при температуре 1450-1650 $^{\circ}\text{C}$.

При восстановлении кианитовой шихты применялся неизотермический метод.

Линейный вид кинетических анаморфоз свидетельствует о возможности описания скорости реакций восстановления в процессе карбонтермического восстановления алюмокремниевого сырья, необходимой для энергосберегающих технологических режимов плавки. Это позволяет снизить удельный расход электроэнергии для восстановительной плавки кианитовой руды на 15-20 % по сравнению с существующими показателями для руднотермических печей. Решение данной задачи особенно важно для повышения энергоэффективности производства основных алюминиевых сплавов.

Перспективным направлением развития алюминиевой отрасли является использование плазменного потока при карбонтермическом восстановлении предварительно обогащенного кианитового концентрата. Большой объем месторождений кианитов в Мурманской области, созданная инфраструктура, избыток дешевой электрической энергии создают благоприятную логистику для организации крупномасштабного производства алюминиевых сплавов.

Положительным фактором является присутствие в этом регионе Кандалакшского алюминиевого завода (ОК «РУСАЛ»), единственного в мире по выпуску первичного алюминия, находящегося за Полярным кругом и полностью сохранившего объемы производства, в отличие от производств западного дивизиона.

Научно-технический интерес представляет разработка технологий глубокой, экологически безопасной и энергоэффективной переработки кианитовой руды в высокотехнологичных производственных плавильных установках и печных аппаратах, обеспечивающих высокую степень извлечения силуминов и получение товарных продуктов многофункционального назначения, которые повысят уровень конкурентоспособности алюминиевой отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lityvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Molodtsov K.V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector // Eurasian Mining. 2020. № 1. P. 36-41. DOI: 10.17580/em.2020.01.07
2. Lityvinenko V., Bowbrick I., Naumov I., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 338. № 130530. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530
3. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В. и др. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95-111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100

4. *Юрак В.В., Душин А.В., Мочалова Л.А.* Против устойчивого развития: сценарии будущего // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 242-247. DOI: [10.31897/PMI.2020.2.242](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.242)
5. *Шклярский Я.Э., Шклярский А.Я., Замятин Е.О.* Анализ потерь электроэнергии алюминиевого производства при наличии искажений в системе электроснабжения // Цветные металлы. 2019. № 4. С. 84-91. DOI: [10.17580/tsm.2019.04.11](https://doi.org/10.17580/tsm.2019.04.11)
6. *Тимонина В.И.* Энергосбережение и энергоэффективность как показатели достижения энергобезопасности в стране // Теоретическая экономика. 2022. № 1. С. 111-119. DOI: [10.52957/22213260_2022_1_111](https://doi.org/10.52957/22213260_2022_1_111)
7. *Turysheva A.V., Gulkov Y.V., Krivenko A.V.* Improving energy performance of the oil and gas industry by applying technologies for the use of associated petroleum gas // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. CRC Press, 2019. Vol. 1. P. 442-447. DOI: [10.1201/9781003014577-56](https://doi.org/10.1201/9781003014577-56)
8. *Kopteva A., Kalimullin L., Tsvetkov P., Soares A.* Prospects and Obstacles for Green Hydrogen Production in Russia // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 3. № 718. DOI: [10.3390/en14030718](https://doi.org/10.3390/en14030718)
9. *Cherepovitsyn A., Solovyova V.* Prospects for the Development of the Russian Rare-Earth Metal Industry in View of the Global Energy Transition – A Review // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 1. № 387. DOI: [10.3390/en15010387](https://doi.org/10.3390/en15010387)
10. *Zhukovskiy Yu.L., Kovalchuk M.S., Batusheva D.E., Senchilo N.D.* Development of an Algorithm for Regulating the Load Schedule of Educational Institutions Based on the Forecast of Electric Consumption within the Framework of Application of the Demand Response // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 24. № 13801. DOI: [10.3390/su132413801](https://doi.org/10.3390/su132413801)
11. *Catalán-Vázquez M., Riojas-Rodríguez H., Cortez-Lugo M. et al.* Social representations of mining activity after an environmental improvement program in the manganese district of Molango, in Mexico, and their implications for risk management // Journal of Environmental Planning and Management. 2019. Vol. 62. Iss. 10. P. 1714-1735. DOI: [10.1080/09640568.2018.1512475](https://doi.org/10.1080/09640568.2018.1512475)
12. *Абрамкин С.Е., Шистеров Г.А., Душин С.Е. и др.* Проблемы разработки комплексных алгоритмов для объектов газовой промышленности // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2019. № 5 (550). С. 27-32. DOI: [10.33285/0132-2222-2019-5\(550\)-27-32](https://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-5(550)-27-32)
13. *Зиновьева О.М., Колесникова Л.А., Меркулова А.М., Смирнова Н.А.* Управление экологическими рисками на горнодобывающих предприятиях // Уголь. 2022. № 3. С. 76-80. DOI: [10.18796/0041-5790-2022-3-76-80](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-3-76-80)
14. *Zgheib H.* Concept of environmental risk management in the system of sustainable environmental economics // Труды БГТУ. Серия 5. Экономика и управление. 2018. № 2. Р. 111-115.
15. *Litvinenko V.S.* Technological Progress Having Impact on Coal Demand Growth // XVIII International Coal Preparation Congress, 28 June – 01 July 2016, Saint-Petersburg, Russia. Cham: Springer, 2016. P. 3-16. DOI: [10.1007/978-3-319-40943-6_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-40943-6_1)
16. *Абрамкин С.Е., Душин С.Е., Ильин И.В. и др.* Автоматизация и управление технологическими процессами: состояние и перспективы. Проблемы подготовки специалистов. Пятигорск: Изд-во Пятигорского института (филиала) Северо-Кавказского федерального университета, 2019. 140 с.
17. *Iakovleva E., Guerra D., Tsvetkov P., Shklyarskiy Ya.* Technical and Economic Analysis of Modernization of Solar Power Plant: A Case Study from the Republic of Cuba // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 2. № 822. DOI: [10.3390/su14020822](https://doi.org/10.3390/su14020822)
18. *Шклярский Я.Э., Батуева Д.Е.* Разработка алгоритма выбора режимов работы комплекса электроснабжения с ветродизельной электростанцией // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 115-126. DOI: [10.31897/PMI.2022.7](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.7)
19. *Пягай И.Н., Кремчев Э.А., Пасечник Л.А., Яценко С.П.* Карбонизационный способ переработки отходов глиноземного производства – альтернативная технология извлечения редких металлов // Цветные металлы. 2020. № 10. С. 56-63. DOI: [10.17580/tsm.2020.10.08](https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.08)
20. *Shklyarskiy Y., Skamyn A., Vladimirov I., Gazizov F.* Distortion Load Identification Based on the Application of Compensating Devices // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 6. № 1430. DOI: [10.3390/en13061430](https://doi.org/10.3390/en13061430)
21. *Бодуэн А.Я., Петров Г.В., Кобылянский А.А., Булаев А.Г.* Сульфидное выщелачивание медного концентратра с высоким содержанием мышьяка // Обогащение руд. 2022. № 1. С. 14-19. DOI: [10.17580/or.2022.01.03](https://doi.org/10.17580/or.2022.01.03)
22. *Сизяков В.М., Кононенко Е.С., Снегурова А.И.* Интенсификация карбоалюминиатной технологии сверхглубокого обескремнивания на основе каталитических свойств гидрогранатового шлама // Записки Горного института. 2013. Т. 202. С. 27-30.
23. *Шепелев И.И., Сахачев А.Ю., Жижкаев А.М. и др.* Извлечение ценных компонентов из алюмосиликатных природных и техногенных материалов при получении глинозема способом спекания // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 203-214. DOI: [10.21285/1814-3520-2018-4-202-214](https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-202-214)
24. *Дубовиков О.А., Яскеляйнен Э.Э.* Переработка низкокачественного бокситового сырья способом термохимия-Байер // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 668-674. DOI: [10.18454/PMI.2016.5.668](https://doi.org/10.18454/PMI.2016.5.668)
25. *Pasechnik L.A., Medyankina I.S., Yatsenko S.P.* Scandium extraction from multicomponent systems by crystallization of complex sulfates // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 848. № 012064. DOI: [10.1088/1757-899x/848/1/012064](https://doi.org/10.1088/1757-899x/848/1/012064)
26. *Koteleva N.I., Zhukovskiy Y.L., Valnev V.* Augmented reality technology as a tool to improve the efficiency of maintenance and analytics of the operation of electromechanical equipment // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1753. № 012058. DOI: [10.1088/1742-6596/1753/1/012058](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012058)
27. *Mann V., Buzunov V., Frantsev Y. et al.* The Development of RUSAL's Prebake Anode Production in Support of the Company's Green Initiatives // Light Metals 2022. Cham: Springer, 2022. P. 890-900. DOI: [10.1007/978-3-030-92529-1_117](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92529-1_117)
28. *Brough D., Jouhara H.* The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery // International Journal of Thermofluids. 2020. Vol. 1-2. № 100007. DOI: [10.1016/j.ijft.2019.100007](https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100007)
29. *Farjana S.H., Huda N., Parvez Mahmud M.A.* Impacts of aluminum production: A cradle to gate investigation using life-cycle assessment // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 663. P. 958-970. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.01.400](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.400)
30. *Nemchinova N.V., Mineev G.G., Tyutrin A.A., Yakovleva A.A.* Utilization of Dust from Silicon Production // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. Iss. 12. P. 763-767. DOI: [10.3103/S0967091217120087](https://doi.org/10.3103/S0967091217120087)
31. *Kuz'min M.P., Ivanov N.A., Kondrat'ev V.V. et al.* Preparation of aluminum-carbon nanotubes composite material by hot pressing // Metallurgist. 2018. Vol. 61. № 9-10. P. 815-821. DOI: [10.1007/s11015-018-0569-2](https://doi.org/10.1007/s11015-018-0569-2)



32. Romanov A.D., Romanova E.A., Vilkov I.V. et al. Technology for Producing Aluminum-Matrix Composite Material Reinforced with Multi-Wall Carbon Nanotubes // Metallurgist. 2022. Vol. 66. P. 681-687. DOI: 10.1007/s11015-022-01376-1
33. Evans K. The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue // Journal of Sustainable Metallurgy. 2016. Vol. 2. P. 316-331. DOI: 10.1007/s40831-016-0060-x
34. Akcil A., Akhmadiyeva N., Abdulvaliyev R. et al. Overview On Extraction and Separation of Rare Earth Elements from Red Mud: Focus on Scandium // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2018. Vol. 39. Iss. 3. P. 145-151. DOI: 10.1080/08827508.2017.1288116
35. Voytyuk I.N., Pantyushin I.V. Automated Measurement of Oil-gas-water Mixture Component Composition in Pipeline // 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 10-12 November 2021, Lipetsk, Russian Federation. IEEE, 2021. P. 935-939. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632165
36. Гришин Н.Н., Иванова А.Г., Нерадовский Ю.Н., Калинников В.Т. Комплексное восстановление кианитовой руды Кейвского месторождения // Технология металлов. 2013. № 7. С. 3-9.
37. Salama E.I., Abbas A., Esawi A.M.K. Preparation and properties of dual-matrix carbon nanotube-reinforced aluminum composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2017. Vol. 99. P. 84-93. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.04.002
38. Kuskov V.B., Lvov V.V., Yushina T.I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing // CIS Iron and Steel Review. 2021. Vol. 21. P. 4-8. DOI: 10.17580/cisir.2021.01.01
39. Qing-chun Yu, Hai-bin Yuan, Fu-long Zhu et al. Carbothermic reduction of alumina with carbon in vacuum // Journal of Central South University. 2012. Vol. 19. Iss. 7. P. 1813-1816. DOI: 10.1007/s11771-012-1213-0
40. Baisong Guo, Xinming Zhang, Xi Cen et al. Enhanced mechanical properties of aluminum based composites reinforced by chemically oxidized carbon nanotubes // Carbon. 2018. Vol. 139. P. 459-471. DOI: 10.1016/j.carbon.2018.07.026
41. Khairul M.A., Zanganeh J., Moghtaderi B. The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud // Resources, Conservation and Recycling. 2019. Vol. 141. P. 483-498. DOI: 10.1016/J.RESCONREC.2018.11.006
42. Vozniakovskii A.A., Kidalov S.V., Kol'tsova T.S. Development of composite material aluminum-carbon nanotubes with high hardness and controlled thermal conductivity // Journal of Composite Materials. 2019. Vol. 53. Iss. 21. P. 2959-2965. DOI: 10.1177/0021998319829894
43. Choate W., Green J. Technoeconomic Assessment of the Carbothermic Reduction Process for Aluminum Production // Essential Readings in Light Metals. Cham: Springer, 2016. P. 1070-1075. DOI: 10.1007/978-3-319-48156-2_156
44. Qingchun Yu, Yong Deng, Yuebin Feng, Ziyong Li. Phase Transformation of Alumina, Silica and Iron Oxide during Carbothermic Reduction of Fly Ash for Ceramics Production // Metals. 2021. Vol. 11. Iss. 8. № 1165. DOI: 10.3390/met11081165
45. Litvinova T., Kashurin R., Lutskiy D. Complex Formation of Rare-Earth Elements in Carbonate-Alkaline Media // Materials. 2023. Vol. 16. Iss. 8. № 3140. DOI: 10.3390/ma16083140
46. Бажин В.Ю., Масько О.Н., Мартынов С.А. Автоматизированный контроль и управление балансом шихты при производстве металлургического кремния // Цветные металлы. 2023. № 4. С. 53-59. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.07

Авторы: В.Ю.Бажин, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-8231-3833> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Я.В.Устинова, канд. техн. наук, доцент, yan.kuskova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4382-3301> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), С.Н.Федоров, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-4654-4364> (Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия), М.Э.Х.Шалаби, д-р техн. наук, профессор (Центральный научно-исследовательский металлургический институт, Каир, Египет).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Прогнозирование планового потребления электроэнергии для объединенной энергосистемы с помощью машинного обучения

Р.В.КЛЮЕВ¹, А.Д.МОРГОЕВА²✉, О.А.ГАВРИНА², И.И.БОСИКОВ², И.Д.МОРГОЕВ²

¹Московский политехнический университет, Москва, Россия

²Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

Как цитировать эту статью: Клюев Р.В., Моргоева А.Д., Гаврина О.А., Босиков И.И., Моргоев И.Д. Прогнозирование планового потребления электроэнергии для объединенной энергосистемы с помощью машинного обучения // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 392-402. EDN FJGZTV

Аннотация. Представлены результаты исследований по разработке прогностических моделей по ретроспективным данным о плановом потреблении электроэнергии в регионе со значительной долей предприятий минерально-сырьевого комплекса. Поскольку энергоемкость промышленности остается довольно высокой, актуальна задача по рационализации потребления электроэнергии. Одним из путей повышения точности управления при планировании расходов на электроэнергию является прогнозирование электрических нагрузок. Несмотря на большое количество научных работ по теме прогнозирования электропотребления, данная проблема остается актуальной из-за изменяющихся требований оптового рынка электроэнергии и мощности к точности прогнозов. Поэтому цель настоящего исследования – поддержка управленческих решений в процессе планирования объемов электропотребления. Для этого необходимо создать прогностическую модель и определить перспективное электропотребление энергосистемы. С этой целью проведен сбор и анализ исходных данных, их предобработка, отбор признаков, создание моделей и их оптимизация. Созданные модели основаны на ретроспективных данных о плановом электропотреблении, показателях работы энергосистемы (частоте), а также метеорологических данных. Методы исследований – ансамблевые методы машинного обучения (алгоритмы случайного леса, градиентного бустинга XGBoost и CatBoost), а также модель рекуррентной нейронной сети долгой краткосрочной памяти (LSTM). Полученные модели позволяют с достаточно высокой точностью создавать краткосрочные прогнозы электропотребления (на период от одних суток до недели). Применение моделей, основанных на алгоритмах градиентного бустинга, и моделей нейронных сетей дали прогноз с погрешностью менее 1 %, что позволяет рекомендовать их для применения при прогнозировании планового электропотребления объединенных энергосистем.

Ключевые слова: электропотребление; прогнозирование; градиентный бустинг; искусственная нейронная сеть; машинное обучение

Поступила: 14.03.2023

Принята: 20.06.2023

Онлайн: 19.07.2023

Опубликована: 19.07.2023

Введение. Энергосберегающие подходы занимают важное место в современном мире. Одним из направлений исследований в области энергосбережения, имеющим высокую практическую и научную значимость, является прогнозирование электропотребления. Это связано прежде всего с тем, что электрическая энергия является ресурсом, необходимым для обеспечения всех сфер жизнедеятельности общества. Особенно большое электропотребление наблюдается в промышленности, в частности на предприятиях минерально-сырьевого комплекса. При этом прогнозирование электропотребления применяется в решении различных задач, каждая из которых непременно подчинена одной цели – оптимальному управлению электропотреблением, т.е. минимизации потребления электроэнергии с сохранением необходимого уровня качества выполнения основных функциональных процессов.

В соответствие с концепцией ценозависимого потребления электроэнергии, известной под термином *demand response* [1, 2], стало возможным создавать экономически выгодные для всех участников рынка электроэнергии условия производства, распределения и потребления электроэнергии: генерирующих и электросетевых компаний, крупных потребителей электроэнергии и др.



Во многих странах на текущий момент функционируют оптовые рынки электроэнергии и мощности (ОРЭМ), на которых предлагаются различные условия покупки электроэнергии. Рынок на сутки вперед и балансирующий рынок являются сегментами ОРЭМ, и основное условие, необходимое для участия в них, – наличие достоверного прогноза электропотребления. В этой связи прогнозирование – актуальная производственная и научная задача, решение которой определяет экономическую эффективность для всех участников ОРЭМ и способствует развитию методов прогнозирования в целом.

Эффективность энергосбережения за счет прогнозирования электропотребления отражена во многих научных работах [3-5]. При этом исследователи применяют различные методы прогнозирования электропотребления, такие как методы классического и глубокого машинного обучения [6-8], математические модели с нечеткой логикой [9], а также модели, учитывающие сезонность временных рядов электропотребления [10] и другие подходы [11, 12]. В обзоре [13] приведены результаты сравнительного анализа методов прогнозирования электропотребления в соответствии с классификацией применяемых методов в зависимости от горизонта прогноза. Стоит отметить, что, несмотря на большое разнообразие методов прогнозирования электропотребления, отсутствуют универсальные подходы, позволяющие для каждой предметной области получать достоверный прогноз электропотребления. Обусловлено это главным образом изменяющимися требованиями к точности прогнозирования, необходимостью учета большого количества факторов, характеризующих специфику предметной области, для которой проводится прогнозирование, а также прогрессом в области технологий интеллектуального анализа данных, позволяющим эффективнее, чем традиционные методы математической статистики (экспоненциальное сглаживание, скользящее среднее и др.), обрабатывать большие массивы данных, и др. причинами. Поэтому было принято решение провести прикладное исследование, заключающееся в прогнозировании электропотребления с помощью современных средств интеллектуального анализа данных для объединенной энергосистемы с большой долей предприятий минерально-сырьевого комплекса. Таким образом, цель данной работы – прогнозирование планового потребления электроэнергии, оценка точности прогнозирования и разработка рекомендаций по практическому применению некоторых из предложенных методов прогнозирования, а также по необходимости учета факторов, характеризующих электропотребление.

Прогнозирование потребления электроэнергии было проведено на примере объединенной энергосистемы Урала – региона с большой концентрацией предприятий минерально-сырьевого комплекса, являющихся на оптовом рынке электроэнергии и мощности крупными потребителями электроэнергии. На рис.1 представлена структура потребления электроэнергии за 2021 г. по данным Единой межведомственной информационно-статистической системы* для Уральского федерального округа (УФО). Из рис.1 видно, что наибольшее потребление электроэнергии приходится на добычу полезных ископаемых (70888,4 ГВт·ч).

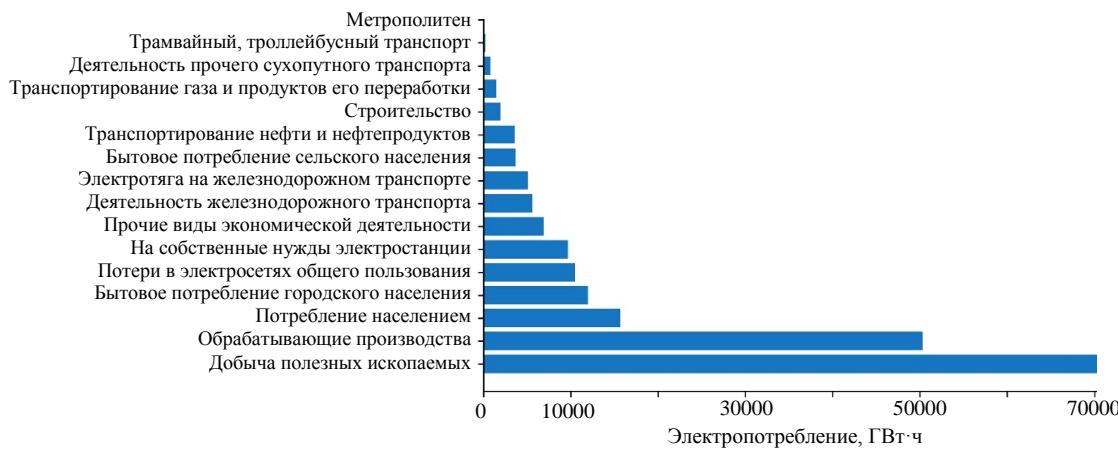


Рис.1. Структура потребления электроэнергии в УФО за 2021 г.

* Единая межведомственная информационно-статистическая система. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/43277> (дата обращения 12.03.2023).



Отклонение фактических значений от плановых ведет к увеличению издержек для всех участников оптового рынка электроэнергии [14-16]. Поэтому цель данного исследования связана с поддержкой управленческих решений в процессе определения оптимальных значений выработки и потребления электроэнергии за счет почасового прогнозирования планового потребления и генерации электроэнергии на период от суток до недели. Поставленная цель была реализована в несколько этапов: проанализирован предшествующий мировой опыт применения различных подходов к прогнозированию электропотребления; получены ретроспективные данные о плановом электропотреблении, погодные данные и данные индикаторов работы рассматриваемой энергосистемы, произведен их анализ; построены прогностические модели и оценена их достоверность, сформулированы основные выводы по исследованию. Научная новизна работы – исследование факторов, влияющих на величину потребления электроэнергии объединенной энергосистемы, а также создание прогностических моделей, основанных на современных алгоритмах градиентного бустинга и искусственных нейронных сетей и их оптимизации. Конечным результатом исследования, представляющим научную ценность, являются рекомендации по применению факторов экономического и метеорологического характера при разработке прогнозных моделей для крупных энергосистем с потребителями – предприятиями минерально-сырьевого комплекса, а также опыт применения конкретных алгоритмов машинного обучения и полученные в результате исследования конфигурационные параметры моделей.

Методы. Перед описанием конкретных методов, примененных в данном исследовании, отметим несколько наиболее современных подходов к прогнозированию электропотребления. С этой целью проведен поиск по базе данных научных публикаций на сайтах ScienceDirect.com и ResearchGate.net по ключевым словам: forecasting, energy power consumption, machine learning, deep learning, modeling, short-term forecasting, mining industry и др. Результаты поиска содержат более 1000 научных публикаций. Была рассмотрена часть из этих работ, наиболее соответствующая целям настоящего исследования, и составлена таблица с результатами анализа некоторых из существующих методов прогнозирования (табл.1), в которой анализируемые исследования сгруппированы по применяемым методам прогнозирования, а также отражены такие количественные и качественные характеристики результатов исследований, как глубина прогноза, входные и выходные данные, краткое описание объекта, прогнозирование электропотребления которого проводится, погрешность прогноза.

Таблица 1

Анализ методов прогнозирования электропотребления

Методы	Объект исследования	Глубина прогноза	Качество прогноза	Входные/выходные данные	Источник
Модель с долгой краткосрочной памятью (LSTM)	Порт Пусан, Южная Корея	1 мес	$R^2 = 0,973$ $RMSE = 107105$	Входные данные: прогноз ежемесячной пропускной способности порта. Прогнозируемая величина: потребление электроэнергии	[17]
Гибридный: сезонная и трендовая декомпозиция с использованием локально-взвешенной регрессии, градиентного бустинга XGBoost и регрессии опорных векторов	Оператор оптового рынка электроэнергии в Австралии	12 ч 24 ч	$sMAPE = 0,75-3,18 \%$ $sMAPE = 1,56-7,72 \%$	Входные данные: временной ряд электрической нагрузки. Прогнозируемая величина: электрическая нагрузка	[18]
Ансамблевая модель: LSTM, GRU и TCN	Данные электросетевой компании Беджая, Алжир	1 мес	$MAPE_{min} = 0,64 \%$ $MAPE_{max} = 10,16 \%$	Входные данные: данные электропотребления за предыдущие 12 мес. Выходные данные: потребление электроэнергии	[19]



В представленных в табл. 1 исследованиях применялись различные подходы при прогнозировании электропотребления. В работах [18, 19] использованы ретроспективные данные электропотребления в качестве предикторов, в статье [17] исследован фактор, значительно влияющий на величину потребления электроэнергии. Однако в указанных работах не исследованы экзогенные факторы, нелинейно влияющие на величину потребления электроэнергии, такие как метеорологические, социальные, экономические и др.

В работе [20] представлены результаты прогнозирования продаж электроэнергии на основе глубокой пространственно-временной остаточной нейронной сети (Deep Spatio-Temporal Residual Network – ST-ResNet). Прогнозирование продаж напрямую связано с планированием выработки электроэнергии, поэтому эта актуальная задача была эффективно решена. Применение искусственной нейронной сети ST-ResNet позволило сократить величину средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования более, чем на 2,5 % по сравнению с применением различных моделей прогнозирования (рекуррентных нейронных сетей, скользящего среднего, экспоненциального сглаживания и др.) при краткосрочном (1 сут) и среднесрочном прогнозировании (1 неделя). При прогнозировании авторы использовали погодные данные, бинарный признак типа дня недели (рабочий/выходной день), данные о продажах, электропотреблении 1 ч назад.

Прогнозирование позволяет оптимально управлять режимами работы накопителей электроэнергии, что способствует ее более рациональному использованию. В исследовании [21] приведены результаты прогнозирования электропотребления с помощью модели деревьев решений при использовании экзогенных переменных. Полученные результаты прогнозирования используются в системе поддержки принятия решений в процессе определения оптимальной емкости накопителя электроэнергии в промышленных масштабах.

Результаты сравнительного анализа методов машинного обучения и традиционных методов прогнозирования электропотребления, проведенного в статье [22], подтверждают значительное превосходство методов машинного обучения по показателям точности прогнозов, что свидетельствует об актуальности разработок прогностических моделей на основе нейронных сетей и алгоритмов классического машинного обучения. Однако, как отмечено в работе [23], основным недостатком применения этих методов является вычислительная сложность, что делает задачу повышения эффективности алгоритмов интеллектуального анализа данных особенно актуальной.

В исследовании [24] были построены модели машинного обучения для прогнозирования электропотребления небольшого промышленного объекта. Наилучшей оказалась модель на основе алгоритма градиентного бустинга библиотеки CatBoost.

В статье [25] разработана гибридная модель, сочетающая применение сингулярного спектрального анализа для разбиения временного ряда электропотребления и полностью связной нейронной сети. Описанная модель позволила улучшить результаты прогнозирования электропотребления горно-металлургического завода по сравнению с применением нейронной сети (без сингулярного спектрального анализа) для прогнозирования. Применение методов интеллектуального анализа данных и передового опыта их внедрения приведены в статье [26]. Перспективным направлением является применение гибридных моделей прогнозирования, использующих комбинацию нескольких методов интеллектуального анализа [27-29]. Однако и при наиболее современных подходах для прогнозирования электропотребления [30] ученые отмечают ограничения в применении некоторых методов [31]. Это лишь подтверждает необходимость проведения исследований для модернизации и расширения методологического арсенала при решении задачи прогнозирования электропотребления. Применительно к предприятиям горной промышленности результаты исследований приведены в работах [32, 33].

Таким образом, целесообразно проведение систематических обзоров, как, например, в статьях [13, 34], отражающих современное состояние исследований в области прогнозирования электропотребления. С учетом неутихающего интереса научного сообщества к вопросам энергосбережения, прогресса средств и методов интеллектуальной обработки данных и высокой практической значимости развития энергосберегающих технологий, необходимо проведение прикладных исследований с целью разработки рекомендаций по возможности применения различных методов прогнозирования.



Исследование было выполнено на языке программирования Python (v. 3.10.0) в среде программирования Jupyter Notebook. Использованы библиотеки NumPy и Pandas для вычислений и манипуляций с данными, Matplotlib, Seaborn – визуализации данных, SKLearn, XGBoost и CatBoost – предобработки данных и загрузки экземпляров моделей регрессии, tensorflow.keras – создания искусственных нейронных сетей. Выбор алгоритмов обоснован рекомендациями в литературе [8, 19, 24] и необходимостью проведения сравнительного анализа применения различных алгоритмов в одинаковых условиях. Достоинствами ансамблевых подходов и нейронных сетей являются высокая обобщающая способность, небольшая переобучаемость моделей. Алгоритмы линейной регрессии и k -ближайших соседей были выбраны для подтверждения нелинейности исходных данных и сравнения результатов с более сложными методами.

Исходными для исследования стали почасовые данные за период с 04.03.2020 по 04.03.2023: о плановом потреблении электроэнергии объединенной энергосистемы Урала, индикатора работы энергосистемы (частота); производственного календаря о типе дня (рабочий/нерабочий/предпраздничный); об отопительном периоде. Все они взяты из открытых источников. Поскольку в исследовании [35] проведен анализ влияния климатических факторов, подтверждающий их существенное влияние на величину электропотребления, было принято решение добавить в качестве исходных фактические метеорологические данные административного центра – Екатеринбурга.

При создании прогнозных моделей были выполнены следующие допущения: использованы фактические метеорологические факторы административного центра, несмотря на то, что округ занимает обширную территорию, относящуюся к различным климатическим поясам; фактические данные о частоте в энергосистеме.

На рис.2 представлен график планового потребления электроэнергии, а на рис.3 приведен пример недельного графика планового электропотребления. На рис.3 по оси абсцисс отложен индекс (порядковый номер) временного интервала, по оси ординат – величина планового электропотребления. Анализ графиков позволяет заключить, что величина электропотребления зависит от времени суток и времени года.

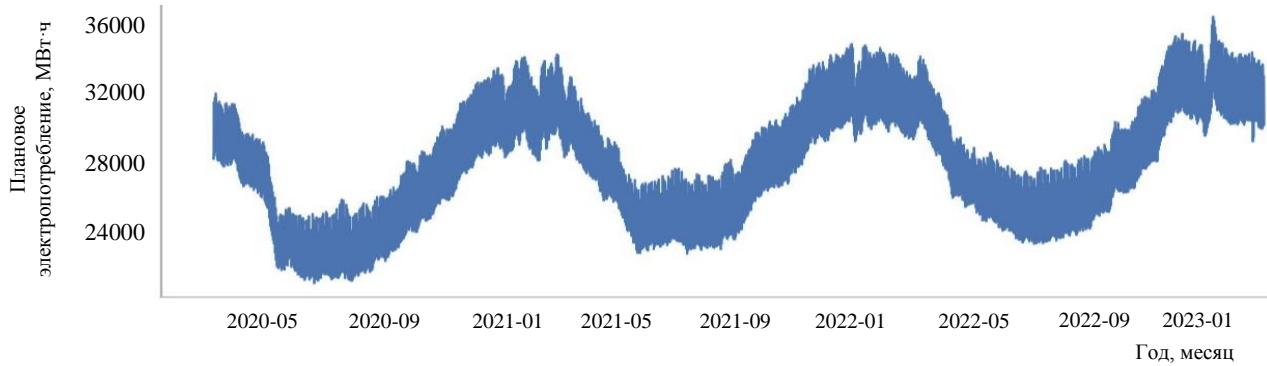


Рис.2. График планового электропотребления

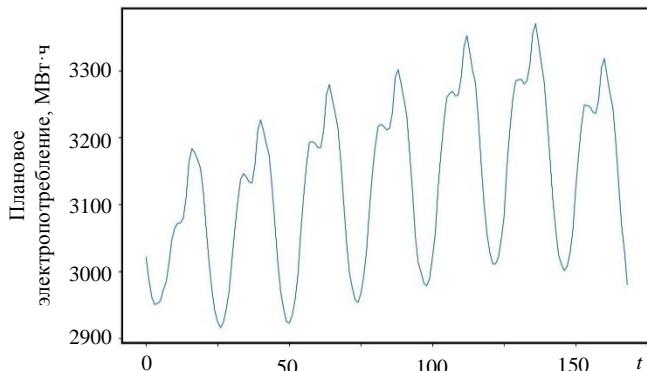


Рис.3. Недельный график планового электропотребления

С целью оценки влияния метеорологических факторов и возможности их дальнейшего использования при создании прогнозистических моделей был проведен корреляционный анализ. По формуле парного коэффициента корреляции Пирсона вычислены коэффициенты корреляции между признаками и целевой переменной. Приведены обозначения и описание факторов и целевой переменной (табл.2), матрица корреляций (рис.4):

$$r_{xy} = \frac{\bar{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\sigma(x)\sigma(y)},$$



где x и y – попарно перебираемые признаки и целевая переменная.

Таблица 2

Описание целевой переменной и факторов

	Название	Единицы измерения	Обозначение
Объем планового потребления электроэнергии	МВт·ч	y	
Частота	Гц	X1	
Индекс равновесных цен на покупку электроэнергии	руб./МВт·ч	X2	
Индекс равновесных цен на продажу электроэнергии	руб./МВт·ч	X3	
Максимальный индекс равновесной цены	руб./МВт·ч	X4	
Минимальный индекс равновесной цены	руб./МВт·ч	X5	
Отопительный сезон в Екатеринбурге (да 1/нет 0)	–	X6	
Тип дня (рабочий 0/нерабочий 1/предпраздничный 2)	–	X7	
Температура	°C	X8	
Относительная влажность	%	X9	
Направление ветра	румбы	X10	
Скорость ветра	м/с	X11	
Общая облачность	%	X12	
Горизонтальная дальность видимости	км	X13	
Температура точки росы	°C	X14	
День	–	X15	
Месяц	–	X16	
Год	–	X17	
Час	–	X18	

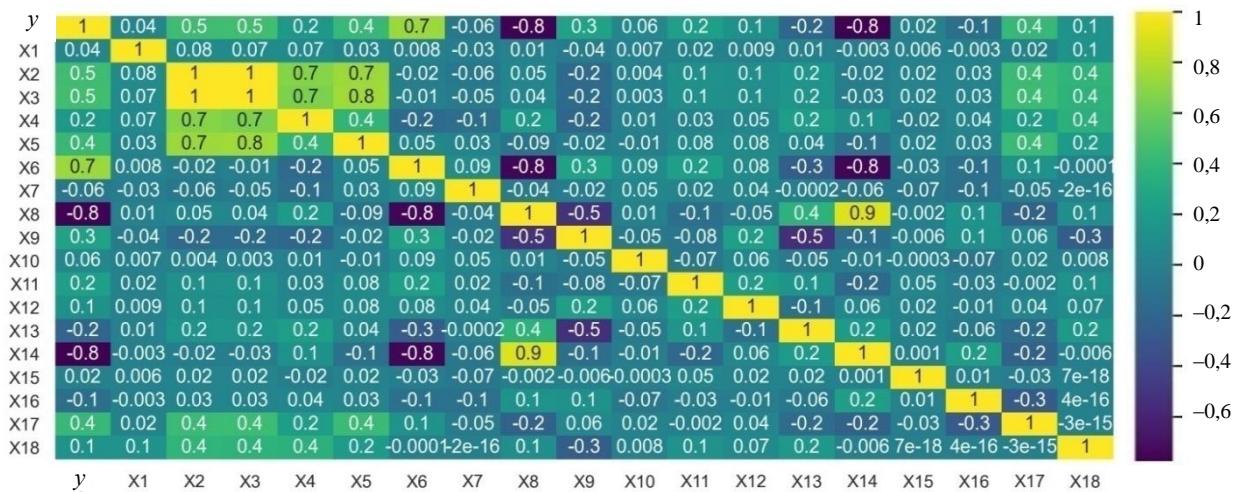


Рис.4. Матрица корреляции признаков и целевой переменной

В результате анализа матрицы корреляции было принято решение исключить из дальнейшего исследования факторы X3-X6, X14 из-за наличия мультиколлинеарности признаков. Все остальные факторы использованы в качестве входных признаков в прогностических моделях.

Следующим этапом была проведена нормализация признаков с помощью функции `MinMaxScaler` библиотеки `SKLearn`. Путем нормализации значения всех признаков были приведены к одинаковому масштабу

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}},$$

где x – фактическое значение признака; x_{\min} и x_{\max} – минимальное и максимальное значения.

Для создания предсказательных моделей были использованы следующие алгоритмы библиотеки `SKLearn`: линейная регрессия `Linear Regression (LR)`, k -ближайших соседей `KNeighborsRegressor (KNN)`, случайный лес `RandomForestRegressor (RFR)`. Также применены ансамблевые методы (экстремальный градиентный бустинг `XGBRegressor` и градиентный бустинг `CatBoostRegressor`)



и создана модель рекуррентной нейронной сети долгой краткосрочной памяти LSTM в tensorflow.keras. Использованы различные по сложности алгоритмы: от линейной регрессии до ансамблевых методов и нейронных сетей. Выбор указанных алгоритмов машинного обучения обусловлен необходимостью проведения их сравнительного анализа, примененного при одних и тех же условиях. Достоверность некоторых из использованных методов находит подтверждение в работах [12, 24, 36].

Модель нейронной сети была создана путем выполнения серии экспериментов по подбору параметров и выбору оптимальной структуры сети. Наилучшая из подобранных конфигураций сети следующая: два слоя LSTM по 30 и 25 нейронов соответственно с функцией активации гиперболический тангенс (tanh), один линейный слой, включающий 25 нейронов, выходной слой. В качестве оптимизатора использован алгоритм оптимизации Adam, в качестве функции потерь – среднеквадратичная ошибка. Обучение модели нейронной сети происходило с разбиением на батчи, оптимальный размер которого оказался равным 5, сходимость результата наблюдается при 1000 итерациях.

В качестве метрик качества прогнозов были выбраны средняя абсолютная ошибка в процентах (MAPE) и коэффициент детерминации (R^2):

$$MAPE(y, \hat{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \cdot 100 \%;$$

$$R^2(y, \hat{y}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

где y и \hat{y} – фактические и прогнозные значения объема планового электропотребления; n – длина временного ряда.

Обучающая и тестовая выборки (датасеты) были разделены в соотношении 80:20. В табл.3 приведены соответствующие значения качества прогнозных моделей. Подбор параметров для моделей RFR, KNN, XGBoost и CatBoost осуществлялся с помощью инструмента перекрестной проверки GridSearchCV.

Таблица 3

Оценка качества прогнозных моделей

Модель	Метрики качества прогноза											
	Обучающий датасет		Тестовый датасет		MAPE прогноза на n дней, % ($n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$)							
	MAPE, %	R^2	MAPE, %	R^2	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$	$n = 7$	
LR	3,37	0,86	3,39	0,86	2,08	2,09	1,93	1,79	1,89	2,16	2,22	
KNN	1,26	0,97	1,66	0,96	1,10	1,25	1,50	1,55	1,79	1,93	1,84	
RFR	0,41	0,99	0,78	0,99	1,39	1,31	1,41	1,37	1,59	1,64	1,59	
XGBoost	0,73	0,99	0,82	0,99	0,47	0,63	0,71	0,74	1,07	1,20	1,17	
CatBoost	0,17	0,99	0,36	0,99	0,42	0,86	0,75	0,71	0,71	0,68	0,64	
LSTM	0,36	0,99	0,40	0,99	0,36	0,74	0,64	0,62	0,59	0,59	0,55	

Для указанных моделей было проведено прогнозирование на период от одного дня до недели. Значения ошибок прогноза для каждого периода (n) прогнозирования указаны в табл.3. Так, при $n = 1$ получены 24 прогнозных значения (1 сут), при $n = 2$ прогноз выполнен на 48 точек (2 сут) и т.д. до 7 сут. Как видно из табл.3, с увеличением горизонта прогнозирования точность прогноза уменьшается, но при этом ошибка не превышает 1-2 %. Наилучшую точность показала модель рекуррентной нейронной сети LSTM, MAPE которой менее 1 % для недельного периода упреждения. Полученные результаты позволяют считать модель достоверной.

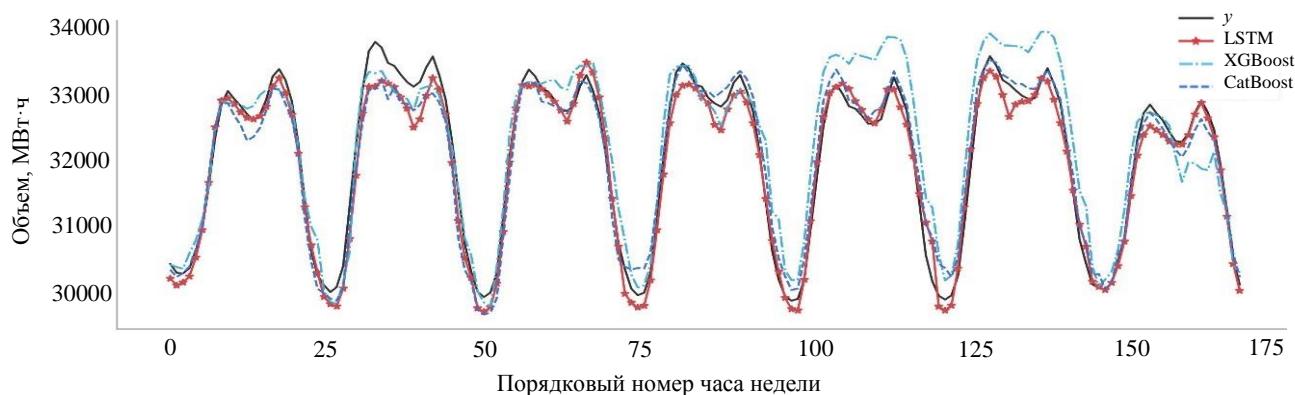


Рис.5. Фактические и прогнозные значения

На рис.5. приведены графики объемов планового электропотребления (y) и его прогнозные значения, полученные разными моделями на неделю вперед. Наибольшие отклонения прогнозных значений от фактических наблюдаются у модели XGBoost при прогнозе на период от 4 до 7 дней. При горизонте прогноза до 4 дней величина ошибки сопоставима с другими методами. Поэтому можно предположить, что на недельный период лучше использовать модели нейронных сетей LSTM и ансамблевый алгоритм CatBoost. Возможно, что объединение анализируемых моделей по технологии стекинга позволит получать наименьшую погрешность прогноза.

В работе [33] приведены результаты прогнозирования электропотребления с помощью метода Холта – Уинтерса на два дня вперед. При этом MAPE составила 1,08 %. При математическом моделировании электропотребления на основе выборки максимального правдоподобия, описанном в статье [14], величина погрешности прогноза 2,19 %. А при прогнозировании электропотребления с помощью многофакторной регрессионной модели ошибка прогнозирования оказалась равной 3,32 % [37].

С помощью рассмотренных моделей можно уменьшить погрешность прогноза (при прогнозировании на два дня вперед при применении модели XGBoost значение MAPE составило 0,63 %, модели на основе алгоритма CatBoost – 0,86 %, модели нейронной сети LSTM – 0,74 %), что подтверждает эффективность применения ансамблевых методов и методов глубокого машинного обучения при проведении прогнозирования электропотребления.

Обсуждение результатов. В процессе проведенного исследования были созданы модели машинного обучения, позволяющие получить краткосрочный прогноз планового электропотребления (от суток до недели) с погрешностью 0,63 %. Полученные результаты позволяют в процессе принятия управлеченческих решений при формировании заявок на производство и потребление электроэнергии учитывать прогнозные данные, полученные с помощью описанных в данном исследовании моделей, что позволит принимать более обоснованные решения при планировании объемов потребления электроэнергии. Таким образом, наличие достоверного прогноза должно способствовать сокращению величины отклонения фактических объемов электропотребления от плановых за счет интеллектуального анализа ретроспективных данных и учета большого числа факторов погодного (X8-X13), технического (X1, X7), экономического (X2) характера и др. Отметим, что без допущения, принятого в данном исследовании относительно погодных факторов, погрешность прогноза может измениться. С одной стороны, при использовании более детальных климатических данных, например нескольких населенных пунктов с разными климатическими условиями, ошибка прогноза, вероятно, должна уменьшиться. С другой стороны, в исследовании были использованы фактические климатические данные, а не прогнозные. Следовательно, при наличии прогнозных данных величина погрешности прогноза электропотребления увеличится за счет погрешности прогноза погоды. Поэтому одним из перспективных направлений является дальнейшее исследование метеофакторов и их влияния на целевой результат.

Факторы экономического характера подвержены влиянию макро- и микроэкономических показателей. В том числе стоит оценивать риски возникновения непредвиденных ситуаций, относящихся



к понятию так называемого черного лебедя (аварии, санкции и т.д.). С учетом того, что в данном исследовании прогнозирование электропотребления происходит на основе прошедших событий и установившихся корреляций между факторами, новые события могут быть учтены на основе обнаружения большой ошибки рассогласования в моменте, когда появится «черный лебедь». В таком случае ошибка возникнет сразу и, обнаружив ее, можно исследовать влияние нового фактора, вызванного непредвиденной ситуацией, и оценить его проявляющуюся связь на прогноз электропотребления напрямую. Затем с учетом нового фактора провести перестроение модели. Если же происходит изменение экономического фактора (Х2) или какого-либо другого, уже существующего в модели, вызванное резкими изменениями экономической ситуации, то необходимо обновление весов в моделях, подбор оптимальных гиперпараметров и переобучение моделей.

Так как одна из проблем при прогнозировании электропотребления – отсутствие универсальных моделей, подходящих для всех предметных областей и различных периодов упреждения прогнозов, перспективным направлением исследования является поиск универсальных подходов к созданию прогнозных моделей. Таким образом, результаты настоящего исследования, в частности структура входных переменных-предикторов, могут быть использованы в аналогичных исследованиях. К рекомендациям, полученным в настоящем исследовании, можно отнести эффективность применения моделей градиентного бустинга и нейронных сетей при прогнозировании электропотребления.

Заключение. Получены выводы практического и теоретического характера. Разработаны прогностические модели, проведен их сравнительный анализ по метрикам качества прогнозных значений. Можно утверждать, что применение ансамблевых (алгоритмов градиентного бустинга CatBoost и XGBoost) и модели нейронной сети LSTM показали близкие результаты. Однако при лучшей обобщающей способности нейронной сети и, как следствие, более точных результатов, недостатком этого метода по сравнению с ансамблевыми является большая вычислительная сложность и большие временные затраты на обучение модели. Направление будущих исследований – увеличение горизонта прогнозирования, сравнение методов прогнозирования по величине времени выполнения прогноза, оптимизация параметров моделей. Практическая значимость исследования состоит в использовании результатов прогнозирования при принятии управленческих решений в процессе составления заявок на ОРЭМ. Разработанные в настоящем исследовании модели могут быть внедрены в систему поддержки принятия решений участников оптовых рынков электроэнергии, в частности АО «Администратор торговой системы», занимающихся расчетом объема полного планового потребления электроэнергии. Также результаты исследования могут быть использованы при разработке подсистем поддержки принятия решений генерирующими компаниями при прогнозировании спроса на электроэнергию и крупными промышленными предприятиями при расчете планового потребления электроэнергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Faria P., Vale Z. Demand Response in Smart Grids // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 2. № 863. DOI: [10.3390/en16020863](https://doi.org/10.3390/en16020863)
2. Zhukovskiy Yu.L., Kovalchuk M.S., Batueva D.E., Senchilo N.D. Development of an Algorithm for Regulating the Load Schedule of Educational Institutions Based on the Forecast of Electric Consumption within the Framework of Application of the Demand Response // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 24. № 13801. DOI: [10.3390/su132413801](https://doi.org/10.3390/su132413801)
3. Iftikhar H., Bibi N., Canas Rodrigues P., López-Gonzales J.L. Multiple Novel Decomposition Techniques for Time Series Forecasting: Application to Monthly Forecasting of Electricity Consumption in Pakistan // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 6. № 2579. DOI: [10.3390/en16062579](https://doi.org/10.3390/en16062579)
4. Almuhami S.H., Sultana N. Forecasting Long-Term Electricity Consumption in Saudi Arabia Based on Statistical and Machine Learning Algorithms to Enhance Electric Power Supply Management // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 4. № 2035. DOI: [10.3390/en16042035](https://doi.org/10.3390/en16042035)
5. Weijie Zhou, Huihui Tao, Jiaxin Chang et al. Forecasting Chinese Electricity Consumption Based on Grey Seasonal Model with New Information Priority // Sustainability. 2023. Vol. 15. Iss. 4. № 3521. DOI: [10.3390/su15043521](https://doi.org/10.3390/su15043521)
6. Sayed H.A., William A., Said A.M. Smart Electricity Meter Load Prediction in Dubai Using MLR, ANN, RF, and ARIMA // Electronics. 2023. Vol. 12. Iss. 2. № 389. DOI: [10.3390/electronics12020389](https://doi.org/10.3390/electronics12020389)



7. Lin Pan, Sheng Wang, Jiying Wang *et al.* Research on Central Air Conditioning Systems and an Intelligent Prediction Model of Building Energy Load // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 24. № 9295. DOI: [10.3390/en15249295](https://doi.org/10.3390/en15249295)
8. Alsharekh M.F., Habib S., Dewi D.A. *et al.* Improving the Efficiency of Multistep Short-Term Electricity Load Forecasting via R-CNN with ML-LSTM // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 18. № 6913. DOI: [10.3390/s22186913](https://doi.org/10.3390/s22186913)
9. Poczeta K., Papageorgiou E.I. Energy Use Forecasting with the Use of a Nested Structure Based on Fuzzy Cognitive Maps and Artificial Neural Networks // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 20. № 7542. DOI: [10.3390/en15207542](https://doi.org/10.3390/en15207542)
10. Вялкова С.А., Надточка И.И. Анализ шумовой составляющей суточных графиков активной мощности энергосистемы и метеофакторов при краткосрочном прогнозировании // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 4. С. 25-34. DOI: [10.46960/2658-6754_2018_4_25](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2018_4_25)
11. Yotov K., Hadzhikolev E., Hadzhikoleva S., Cheresharov S. Neuro-Cybernetic System for Forecasting Electricity Consumption in the Bulgarian National Power System // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 17. № 11074. DOI: [10.3390/su141711074](https://doi.org/10.3390/su141711074)
12. Xin Hu, Keyi Li, Jingfu Li *et al.* Load forecasting model consisting of data mining based orthogonal greedy algorithm and long short-term memory network // Energy Reports. 2022. Vol. 8. S. 5. P. 235-242. DOI: [10.1016/j.egyr.2022.02.110](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.110)
13. Klyuev R.V., Morgoev I.D., Morgoeva A.D. *et al.* Methods of Forecasting Electric Energy Consumption: A Literature Review // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 23. № 8919. DOI: [10.3390/en15238919](https://doi.org/10.3390/en15238919)
14. Мохов В.Г., Демьяненко Т.С. Прогнозирование потребления электрической энергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2014. Т. 8. № 2. С. 86-92.
15. Карпенко С.М., Карпенко Н.В., Безгинов Г.Ю. Прогнозирование электропотребления на горнопромышленных предприятиях с использованием статистических методов // Горная промышленность. 2022. № 1. С. 82-88. DOI: [10.30686/1609-9192-2022-1-82-88](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-82-88)
16. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Оценка действующих факторов и прогнозирование электропотребления в региональной энергосистеме с учетом режима ее эксплуатации // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 2. С. 31-46. DOI: [10.18522/2311-3103-2022-2-31-46](https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-2-31-46)
17. Geunsub Kim, Gunwoo Lee, Seunghyun An, Joowon Lee. Forecasting future electric power consumption in Busan New Port using a deep learning model // The Asian Journal of Shipping and Logistics. 2023. Vol. 39. Iss. 2. P. 78-93. DOI: [10.1016/j.ajsl.2023.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2023.04.001)
18. Ribeiro M.H.D.M., Gomes da Silva R., Ribeiro G.T. *et al.* Cooperative ensemble learning model improves electric short-term load forecasting // Chaos, Solitons & Fractals. 2023. Vol. 166. № 112982. DOI: [10.1016/j.chaos.2022.112982](https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112982)
19. Hadjout D., Torres J.F., Troncoso A. *et al.* Electricity consumption forecasting based on ensemble deep learning with application to the Algerian market // Energy. 2022. Vol. 243. № 123060. DOI: [10.1016/j.energy.2021.123060](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123060)
20. Min Cao, Jinfeng Wang, Xiaochen Sun *et al.* Short-Term and Medium-Term Electricity Sales Forecasting Method Based on Deep Spatio-Temporal Residual Network // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 23. № 8844. DOI: [10.3390/en15238844](https://doi.org/10.3390/en15238844)
21. Senchilo N.D., Ustinov D.A. Method for Determining the Optimal Capacity of Energy Storage Systems with a Long-Term Forecast of Power Consumption // Energies. 2021. Vol. 14. № 21. № 7098. DOI: [10.3390/en14217098](https://doi.org/10.3390/en14217098)
22. Habbak H., Mahmoud M., Metwally K. *et al.* Load Forecasting Techniques and Their Applications in Smart Grids // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 3. № 1480. DOI: [10.3390/en16031480](https://doi.org/10.3390/en16031480)
23. Szczepaniuk H., Szczepaniuk E.K. Applications of Artificial Intelligence Algorithms in the Energy Sector // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 1. № 347. DOI: [10.3390/en16010347](https://doi.org/10.3390/en16010347)
24. Моргоева А.Д., Моргоев И.Д., Клюев Р.В., Гаврина О.А. Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 7. С. 115-125. DOI: [10.18799/24131830/2022/7/3527](https://doi.org/10.18799/24131830/2022/7/3527)
25. Вялкова С.А., Моргоева А.Д., Гаврина О.А. Разработка гибридной модели прогнозирования потребления электрической энергии для горно-металлургического предприятия // Устойчивое развитие горных территорий. 2022. Т. 14. № 3 (53). С. 486-493. DOI: [10.21177/1998-4502-2022-14-3-486-493](https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-3-486-493)
26. Yuhua Xie, Yunfei Yang, Lifeng Wu. Power Consumption Forecast of Three Major Industries in China Based on Fractional Grey Model // Axioms. 2022. Vol. 11. Iss. 8. № 407. DOI: [10.3390/axioms11080407](https://doi.org/10.3390/axioms11080407)
27. Qingyong Zhang, Changwu Li, Conghui Yin *et al.* A Hybrid Framework Model Based on Wavelet Neural Network with Improved Fruit Fly Optimization Algorithm for Traffic Flow Prediction // Symmetry. 2022. Vol. 14. Iss. 7. № 1333. DOI: [10.3390/sym14071333](https://doi.org/10.3390/sym14071333)
28. Zichao He, Chunna Zhao, Yaqun Huang. Multivariate Time Series Deep Spatiotemporal Forecasting with Graph Neural Network // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 11. № 5731. DOI: [10.3390/app12115731](https://doi.org/10.3390/app12115731)
29. Qiang Xiao, Hongshuang Wang. Prediction of WEEE Recycling in China Based on an Improved Grey Prediction Model // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 11. № 6789. DOI: [10.3390/su14116789](https://doi.org/10.3390/su14116789)
30. Narwariya J., Verma C., Malhotra P. *et al.* Electricity Consumption Forecasting for Out-of-Distribution Time-of-Use Tariffs // Computer Sciences & Mathematics Forum. 2022. Vol. 3. Iss. 1. № 1. DOI: [10.3390/cmsf2022003001](https://doi.org/10.3390/cmsf2022003001)
31. Frikha M., Taouil K., Fakhfakh A., Derbel F. Limitation of Deep-Learning Algorithm for Prediction of Power Consumption // Engineering Proceedings. 2022. Vol. 18. Iss. 1. № 26. DOI: [10.3390/engproc2022018026](https://doi.org/10.3390/engproc2022018026)
32. Жуковский Ю.Л., Семенюк А.В., Алиева Л.З., Арапова Е.Г. Цифровые платформы на основе блокчейн для снижения углеродного следа горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-1. С. 361-378. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_61_0_361](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_361)
33. Senchilo N., Babanova I. Improving the Energy Efficiency of Electricity Distribution in the Mining Industry Using Distributed Generation by Forecasting Energy Consumption Using Machine Learning // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (Far East Con), 06-09 October 2020, Vladivostok, Russia. IEEE, 2020. P. 1-7. DOI: [10.1109/FarEastCon50210.2020.9271335](https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271335)



34. Aguiar-Pérez J.M., Pérez-Juárez M.Á. An Insight of Deep Learning Based Demand Forecasting in Smart Grids // Sensors. 2023. Vol. 23. Iss. 3. № 1467. DOI: [10.3390/s23031467](https://doi.org/10.3390/s23031467)

35. Shklyarskiy J.E., Batueva D.E. The influence of external climatic factors on the accuracy of the forecast of energy consumption // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 140. № 04014. DOI: [10.1051/e3sconf/201914004014](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914004014)

36. Aseeri A.O. Effective RNN-Based Forecasting Methodology Design for Improving Short-Term Power Load Forecasts: Application to Large-Scale Power-Grid Time Series // Journal of Computational Science. 2023. Vol. 68. № 101984. DOI: [10.1016/j.jocs.2023.101984](https://doi.org/10.1016/j.jocs.2023.101984)

37. Мохов В.Г., Демьяненко Т.С. Определение значимых факторов при прогнозировании объема потребления электроэнергии по объединенной энергосистеме Урала на основе регрессионного анализа // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. 2017. Т. 16. № 4. С. 642-662. DOI: [10.15826/vestnik.2017.16.4.031](https://doi.org/10.15826/vestnik.2017.16.4.031)

Авторы: Р.В.Клюев, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-3777-7203> (Московский политехнический университет, Москва, Россия), А.Д.Моргоева, аспирант, m.angelika-m@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2949-1993> (Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия), О.А.Гаврина, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-9712-9075> (Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия), И.И.Босиков, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0001-8930-4112> (Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия), И.Д.Моргоев, аспирант, <https://orcid.org/0000-0003-4390-5662> (Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Использование кибернетического подхода к ценозависимому управлению спросом на потребляемую подземным горно-добывающим предприятием электроэнергию

А.В.НИКОЛАЕВ¹✉, Ш.ФЁТ², А.В.КЫЧКИН³

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Высшая школа технических наук Георга Агреколы, Бохум, Германия

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», филиал в г. Пермь, Пермь, Россия

Как цитировать эту статью: Николаев А.В., Фёт Ш., Кычkin А.В. Использование кибернетического подхода к ценозависимому управлению спросом на потребляемую подземным горно-добывающим предприятием электроэнергию // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 403-414. EDN CJGQKP. DOI: 10.31897/PMI.2022.33

Аннотация. В статье рассматривается кибернетическая модель ценозависимого управления спросом на электроэнергию (Demand Response, DR), потребляемую подземным горно-добывающим предприятием (ПГДП), в частности главной вентиляторной установкой (ГВУ). Предложены схема модели управления энергопотреблением ГВУ в режиме DR и имплементации кибернетического подхода к DR на базе платформы Интернета вещей. Описаны основные функциональные требования и алгоритм работы платформы, показано взаимодействие платформы с симулятором цифровой модели ПГДП, на которой будут заранее имитироваться процессы, связанные с осуществлением технологического процесса проветривания и управления спросом на электроэнергию. Приведены результаты моделирования снижения нагрузки на ГВУ горно-добывающего предприятия на сутки вперед. Представленное решение позволяет заблаговременно определять требуемые затраты электроэнергии на работу ГВУ, управлять ее работой в энергосберегающем режиме, учитывать прогнозируемые изменения в плановом (например, при спуске-подъеме рабочих по вентиляционному стволу) и внеплановом (например, при изменении параметров наружного воздуха) режимах. Результаты исследования могут быть использованы для снижения себестоимости добычи полезного ископаемого ПГДП без ущерба для безопасности технологических процессов, как за счет реализации энергосберегающих технических, технологических или иных мероприятий, так и при участии предприятий в рынке DR. Предложенная модель дает ПГДП гарантированное получение финансовой компенсации за счет обоснованного изменения профиля энергопотребления ГВУ в часы высокого спроса на электроэнергию, устанавливаемые системным оператором Единой энергетической системы.

Ключевые слова: управление спросом на электроэнергию; кибернетический подход; системная архитектура; платформа Интернета вещей; подземное горно-добывающее предприятие; краткосрочное прогнозирование нагрузки; цифровой двойник

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке правительства Пермского края в рамках проекта Международной исследовательской группы «Разработка цифровой модели прогнозирования и ценозависимого управления спросом на электроэнергию, потребляемую подземными горнодобывающими предприятиями», 2020 г. (соглашение № С-26/506 от 09.03.2021).

Поступила: 12.05.2021

Принята: 11.05.2022

Онлайн: 13.07.2022

Опубликована: 19.07.2023

Введение. Добыча полезных ископаемых подземным способом связана со значительными затратами электроэнергии на производство, почти половина которой (по некоторым данным до 70 %) расходуется на проветривание подземного горно-добывающего предприятия [1-3]. Наибольшей энергоемкостью в системе проветривания обладает главная вентиляторная установка (ГВУ). В связи с этим подземные горно-добывающие предприятия с целью снижения себестоимости добываемой и перерабатываемой продукции активно внедряют в производство различные технические и технологические решения, позволяющие снизить затраты электроэнергии на работу ГВУ

и систему проветривания в целом. К этим решениям относятся следующие: борьба с внешними утечками воздуха [4, 5], использование рециркуляции воздуха [6, 7], применение энергоэффективных технологий кондиционирования воздуха [8-10] и т.д.

Однако в области электроэнергетики, помимо затрат на электроэнергию, существует проблема баланса мощности в виде сопоставления генерируемой и потребляемой электроэнергии, поскольку большинство электростанций в промышленных районах производят ее непрерывно в течение суток, в то время как энергопотребление носит ярко выраженный циклический характер, привязанный к 24-часовому интервалу времени. Это приводит к тому, что электрическая мощность, производимая в часы низкого спроса, не востребована, в то время как в часы пикового спроса наблюдается нехватка [11]. Неспособность автоматического реагирования на динамику спроса приводит к снижению гибкости энергосистемы и, как следствие, высоким эксплуатационным затратам [12-14].

Мировая практика создания гибких энергосистем показывает высокую эффективность методов ценозависимого управления спросом на электроэнергию в режиме планирования нагрузки на сутки вперед. Метод предусматривает анализ исторических данных об энергопотреблении, выявление наиболее повторяемых (прогнозируемых с высокой точностью) энергопотребителей, оценку предполагаемого спроса на сутки вперед и на их основе формирование плана выработки электрической мощности [15-17].

Российские технологии управления спросом в теоретическом отношении хорошо проработаны и представлены рядом публикаций российских ученых, в работах приведены алгоритмы регулирования графика нагрузки образовательных учреждений на основе прогноза энергопотребления [18-20]; в статьях [21, 22] описаны предлагаемые способы накопления электроэнергии в часы низкого спроса (гибкие системы). Несмотря на это, научно-практический опыт их использования в условиях реального рынка сформирован не в полной мере. Во многом это связано с тем, что рынок управления спросом является новым для России, регламентируется нормативной документацией, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 20.03.2019 № 287. Для реализации данных мероприятий введен Агрегатор управления спросом на электрическую энергию – субъект электроэнергетики, объединяющий ресурсы розничных потребителей для предоставления услуги по управлению спросом на электрическую энергию. Агрегатор является участником оптового рынка электроэнергии, управляющим изменением нагрузки группы потребителей (например, на руднике или шахте), с целью продажи совокупности регулировочных способностей как единого объекта в качестве товара/услуги на оптовом рынке и/или на рынке системных услуг.

Несмотря на открытие рынка, процессы, связанные с автоматизацией участия подземного горно-добывающего предприятия, не исследованы в полной мере и являются перспективными для снижения себестоимости на добычу сырья.

Постановка проблемы. Кибернетический подход к ценозависимому управлению спросом для рудников и шахт подразумевает использование расчетной модели для анализа энергопотребления и автоматического снижения в часы, установленные системным оператором (СО) Единой энергетической системы (ЕЭС) России. Снижение достигается путем сокращения производительности ГВУ, которое, в свою очередь, может быть плановым и внеплановым. Так, производительность ГВУ может быть снижена при спуске или подъеме рабочих по вентиляционному стволу. Эти действия известны заранее, и результаты снижения производительности в такие моменты могут быть использованы при энергетическом планировании в режиме на сутки вперед [23].

Сложнее сократить производительность, а значит и энергопотребление ГВУ, вне запланированных технологических процессов. Это связано с тем, что на процесс проветривания влияет большое число случайных факторов [24]. Например, в процессе вентиляции между шахтными стволами действует так называемая общерудничная естественная тяга – явление конвективного теплобмена, когда теплый воздух стремится вверх, а холодный – вниз [25]. В связи с этим величина и направление общерудничной естественной тяги будут зависеть от параметров наружного воздуха. При этом возникающая тяга может быть устремлена по направлению движения воздуха, т.е. будет способствовать проветриванию (так называемая положительная естественная тяга), а может, наоборот, действовать встречно – препятствовать работе ГВУ («отрицательная» естественная



тяга). Следовательно, от параметров воздуха, поступающего в шахтные стволы, будет зависеть режим проветривания.

В работе [26] представлена методика расчета прогнозируемой общерудничной естественной тяги при возможных изменениях параметров наружного воздуха. Поскольку метеорологический прогноз в краткосрочной перспективе имеет точность 85-90 % [25, 27], то можно на сутки вперед определить величину общерудничной естественной тяги и задать требуемый режим работы ГВУ. В период воздухоподготовки, помимо ГВУ, необходимо осуществлять управление режимами шахтных калориферных установок (ШКУ), что усложняет процесс. Но, принимая во внимание зависимость работы ШКУ от параметров наружного воздуха, и с учетом теплопроизводительности калориферов можно определять параметры воздуха в шахтных стволах и прогнозировать величину и направление общерудничной естественной тяги. От величины и направления общерудничной естественной тяги зависит режим работы ГВУ. При действии положительной общерудничной естественной тяги можно снизить производительность ГВУ, уменьшив затраты электроэнергии на проветривание.

Потенциальная возможность разгрузки системы электроснабжения подземного горно-добывающего предприятия в результате снижения потребления электроэнергии во время действия общерудничной естественной тяги может быть использована на практике после имплементации кибернетической модели управления спросом на электроэнергию в состав платформы Интернета вещей. Существуют ограничения использования такой платформы на объектах, поскольку по правилам безопасности невозможно контролировать работу ГВУ в автоматическом режиме. В данном случае необходимым условием обеспечения работоспособности предложенного решения является использование цифрового двойника процесса проветривания шахты (рудника), в котором будут накапливаться измерительная информация, проводиться имитационное моделирование технологических процессов, строиться прогнозы производительности ГВУ при изменении внешних факторов [28]. Архитектура платформы Интернета вещей (Internet of things – IoT) и ее взаимодействие с цифровым двойником процесса проветривания приведены в работе [26].

Методология. В основе методологии исследования лежит структурно-алгоритмическая организация процесса управления спросом на электроэнергию для подземных горно-добывающих предприятий.

В общем виде под управлением спросом на электроэнергию (Demand Response (DR) понимается процесс снижения энергопотребления объектом относительно некоторого базового уровня в моменты времени, устанавливаемые оператором энергетической системы, с последующим получением денежного вознаграждения за успешно реализованные события разгрузок.

С точки зрения технического эффекта энергосистема региона, где работают подземные горно-добывающие предприятия, получает инструмент балансировки, заменяющий ввод в эксплуатацию дорогостоящих источников электроэнергии с равнозначной по объему разгрузкой, т.е. в случае участия подземного горно-добывающего предприятия в мероприятиях DR профиль нагрузки в данном промышленном районе и частично за его пределами будет более сглаженным. Эффект участия предприятия в процессе управления спросом на электроэнергию показан на рис.1 [29].

Кривая предложения электроэнергии S в регионе резко возрастает в правой части (рис.1), что обусловлено подключением резервных источников энергии, дополнительными расходами на планирование, обслуживание и т.д. Снижение потребления в часы максимума со значения P_1 до P_2 приводит к смещению кривой спроса D_1 в кривую D_2 и снижению цены на электроэнергию на величину ΔC_{12} . Аналогично снижение потребления в часы максимума со значения P_2 до P_3 приводит к смещению кривой спроса D_2 в кривую D_3 и снижению цены на электроэнергию на величину ΔC_{23} .

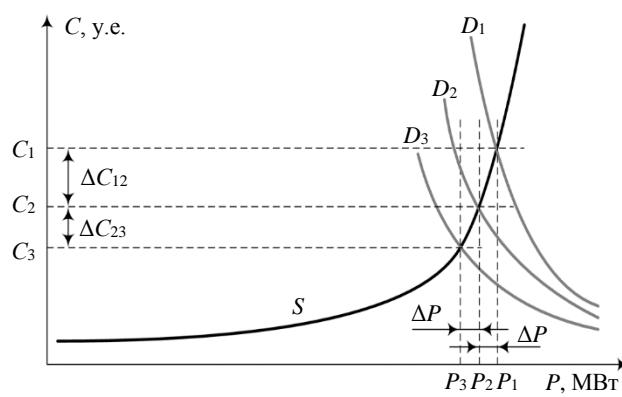


Рис.1. Зависимость цены от спроса на электроэнергию

Важно отметить, что при равнозначном снижении нагрузки подземного горно-добывающего предприятия $D_1 \rightarrow D_2$ и $D_2 \rightarrow D_3$ стоимостный эффект будет различаться. Это говорит о целесообразности строгого соблюдения времени разгрузки. Для того, чтобы обеспечить своевременность разгрузки в рамках мероприятий DR, необходимо заблаговременно, в режиме на сутки вперед, составить план энергопотребления, этот план согласовать с оператором услуги DR, а в день реализации события разгрузки точно вовремя реализовать снижение энергопотребления в соответствии с ранее принятым планом (рис.2).

В представленной модели процесса управления спросом на электроэнергию подземного горно-добывающего предприятия, адаптированного для российского рынка, выделяются следующие элементы:

- Системный оператор – орган оперативно-диспетчерского управления, который в рамках предложенной DR-модели формирует команду на разгрузку для заранее отобранных агрегаторов и контролирует выполнение обязательств и оплачивает разгрузки.
- Агрегатор – субъект электроэнергетики, который работает посредником между системным оператором и ПГДП, выдает команды на снижение энергопотребления ПГДП после получения команд на разгрузку от СО при готовности ГВУ к разгрузке.
- Платформа Интернета вещей – информационный продукт [30, 31], который осуществляет мониторинг и управление энергопотреблением технологических машин и оборудования, в частности ГВУ, формирует уведомления о готовности разгрузки ПГДП.
- Потребитель – участок ПГДП, который принимает участие в мероприятиях DR, для чего снижает энергопотребление в определенные часы суток с помощью ручного, автоматизированного или автоматического переключения режимов работы ГВУ.
- Контроллер управления – прибор для измерений энергопотребления на входе энергопринимающего устройства системы проветривания, в частности ГВУ, а также осуществления управляемых воздействий (в случае получения команды управления от платформы Интернета вещей) при необходимости автоматических переключений режимов работы ГВУ.
- Нагрузка – энергопринимающее устройство, которое задействовано в технологических процессах проветривания ПГДП, управляемое с помощью контроллера управления.

На рис.2 представлено несколько нагрузок, поскольку в самой системе управления спросом, помимо ГВУ, задействованы и другие потребители. Если на руднике (шахте) несколько ГВУ, то их работа будет согласовываться. Механизм управления энергопотреблением ГВУ в режиме DR с использованием платформы Интернета вещей подробно представлен на рис.2.



Рис.2. Модель управления энергопотреблением ГВУ в режиме DR с использованием платформы Интернета вещей



Подземное горно-добывающее предприятие заключает договор с агрегатором спроса на услугу DR. Договор заключается на фиксированный промежуток времени, например один квартал. Агрегатор рассчитывает объем разгрузки для каждого потребителя внутри организационной структуры предприятия. В рамках договора указывается суммарный объем разгрузки, который должен реализовать потребитель. Каждые сутки потребитель подземного горно-добывающего предприятия оповещает агрегатора или системного оператора, с которым заключил договор на DR, о готовности разгрузки на следующие сутки.

Как только системный оператор идентифицирует возможность (прогноз) перегрузки энергосистемы, он определяет необходимость снизить нагрузку в регионе. После этого системный оператор отправляет это требование агрегаторам, с которыми имеется договоренность. Агрегаторы должны распределить необходимый объем сокращения потребления электроэнергии между потребителями ПГДП, с которыми у них заключен договор, и уведомить их за день до снижения нагрузки системы. Они могут сделать это вручную или с помощью платформы Интернета вещей, которая подключается через управляющие контроллеры к потребителям энергии [32, 33].

Агрегатор, в свою очередь, в момент наступления события снижения нагрузки обязуется уменьшить энергопотребление на заявленный объем электроэнергии и, в случае успешного выполнения условий, получить установленное договором вознаграждение.

Потребитель, получая соответствующий сигнал, реализует разгрузку, например, снижая потребляемую мощность ГВУ. Допускается не более пяти сигналов на разгрузку в месяц. Сигнал содержит информацию о времени разгрузки мощности и ее величине в кВт (МВт). Длительность периода разгрузки составляет два или четыре часа. В это время потребитель должен снизить свое энергопотребление (электрическую мощность) на указанную величину. Потребитель может это реализовать как вручную, так и при помощи контроллера управления и имеющихся на предприятии средств автоматизации.

Обсуждение. В рамках обсуждения предложены следующие результаты непосредственных исследований авторов:

1. Кибернетическая схема ценозависимого управления спросом на подземном горно-добывающем предприятии с прогнозированием энергопотребления.

2. Результаты имплементации кибернетического подхода к ценозависимому управлению спросом для подземного горно-добывающего предприятия на базе платформы Интернета вещей.

При реализации стратегии управления спросом на стороне агрегатора возникает необходимость планирования сокращения энергопотребления между нагрузками ПГДП за сутки до фактического снижения нагрузки. В то же время и потребителям необходимо заранее готовиться к разгрузке и знать, в какое время можно будет снизить мощность. Величина и направление общерудничной естественной тяги, зависит от параметров наружного воздуха, которые в требуемый период могут существенно не меняться. В этом случае снижения потребляемой ГВУ электроэнергии с учетом общерудничной естественной тяги добиться не получится. Решением проблемы является краткосрочное прогнозирование энергопотребления, которое в условиях отсутствия фактических данных позволяет определить нагрузку по показателям, основанным на данных прошлых дней, влияющих на ценообразование и спрос.

На рис.3 рассмотрен алгоритм построения графика снижения нагрузки в процессе управления спросом на электроэнергию для подземного горно-добывающего предприятия на основе расчета графиков базовой нагрузки, предлагаемых АО «Системный оператор Единой энергетической системы» России. Схема иллюстрирует алгоритм определения возможного объема снижения нагрузки в течение часов, указанных СО, и последующего построения графика снижения нагрузки за один расчетный день на основании профилей фактического энергопотребления подземного горно-добывающего предприятия за предыдущие расчетные периоды.

Алгоритм составления графика разгрузки в рамках мероприятий DR подземного горно-добывающего предприятия следующий:

1. Построение графиков базовой нагрузки для потребителей, включая ГВУ.
2. Построение фактических графиков нагрузки для потребителей.

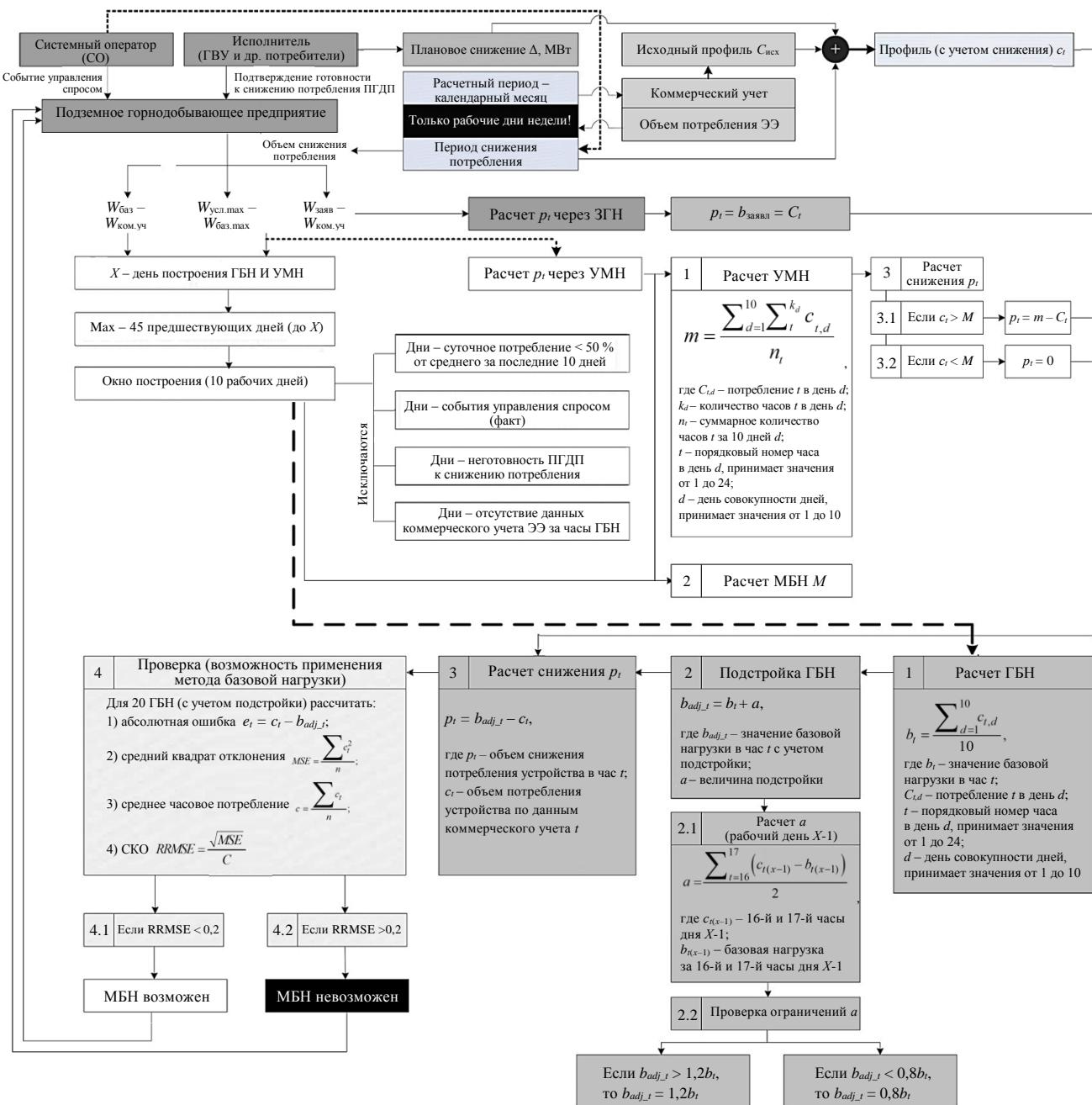


Рис.3. Схема ценозависимого управления спросом на потребляемую электроэнергию с прогнозированием энергопотребления ПГДП

ГБН – график базовой нагрузки; УМН – условная максимальная нагрузка; МБН – максимальная базовая нагрузка;
 ЗГН – заявленный график нагрузки; СО – системный оператор; И – исполнитель;
 ПГДП – подземное горно-добывающее предприятие; СКО – среднестатистическое отклонение; ЭЭ – электрическая энергия

3. Расчет планируемого отклонения фактической от базовой нагрузки с определением периодов избытка/дефицита энергии для каждого потребителя (как плановый, так и внеплановый).

4. Распределение потребителей с избыточной производительностью в разбивке по часам расчетного дня.

5. Наложение (суммирование значений) графиков базовой нагрузки и графиков фактической нагрузки для потребителей с избыточной мощностью.

6. Расчет избытка производительности для группы энергопотребителей предприятия в разбивке по часам расчетного дня: расчет разницы между агрегированным значением базового плана нагрузки и агрегированным планом фактической нагрузки (с профицитом);



- расчет суммы отклонений фактической нагрузки от базовой с избыточной производительностью за каждый час расчетного дня (шаг 3-4).

7. Оценка количества случаев снижения нагрузки N_d для каждого за текущий месяц (текущий расчетный день); должна быть $N_d \leq 5$ за весь месяц.

8. Выбор конкретного потребителя в рамках энергосистемы подземного горно-добывающего предприятия для снижения нагрузки с целью выполнения объема разгрузки, установленного агрегатором в указанные часы, производится на основе расчета избыточной производительности (шаг 6) с акцентом на те технологические объекты, которые соответствуют установленным ограничениям снижения нагрузки (количество снижений нагрузки за расчетный месяц $N_d \leq 5$).

Сервис-ориентированная имплементация кибернетического подхода к DR на базе платформы Интернета вещей требует соблюдения ряда функциональных требований:

- формирование детализированной структуры потребления на горном предприятии; классификация энергоприемников, установленных на объектах предприятия по виду деятельности и режимам функционирования;
- контроль динамики энергопотребления технологического оборудования подземного горно-добывающего предприятия, включая ГВУ, с фиксацией критических отклонений и регистрацией показателей электрической мощности в режиме реального времени;
- описание и подготовка исходных данных для анализа энергопотребления с детализацией признаков для классов энергоприемников;
- дифференцированный анализ с кластеризацией потребителей в составе энергосистемы горного предприятия по уровню и режиму энергопотребления с выявлением типовых закономерностей (паттернов) с учетом дней недели и сезонности;
- интеллектуальный анализ данных об энергопотреблении с идентификацией зон пиковой нагрузки как потенциальных с точки зрения DR интервалов времени;
- обеспечение повторяемости профилей нагрузки и снижение избыточных (пиковых) энергоперетоков, разработка сценариев типовых управляющих воздействий на переключения (отключения) нагрузок для сглаживания суточного профиля;
- статистика по эксплуатации и обслуживанию, в том числе выводу в ремонт энергопринимающих устройств горного предприятия, ведение отчетов по снижению энергопотребления в часы DR;
- прогнозирование энергопотребления для отдельных категорий энергопринимающих устройств энергосистемы подземного горно-добывающего предприятия;
- стабилизация соотношения спроса и потребления с учетом спрогнозированных величин (DR-моделирование);
- выработка альтернативных и комплексных решений для управления энергопотреблением технологических единиц, включая ГВУ, с определением продолжительности снижения, очередности автоматического отключения/переключения энергоприемников.

Представленные требования реализуются программным путем за счет развития типовой платформы Интернета вещей, например Tibbo Aggregate, InfluxData, Siemens MindSphere, GE Predix и др. Такие платформы разработаны специально для реализации различных сервисов, основанных на IoT-технологиях, с подключением множества источников данных, использования аналитики, в том числе машинного обучения, баз данных временных рядов. Архитектура основана на стеке технологий IoT, позволяющем разрабатывать различные приложения с использованием инструментов для сбора, хранения, визуализации и анализа данных (рис.4). Платформа обеспечивает объединение всех элементов системы управления спросом на горно-добывающем предприятии в единую киберфизическую систему [11, 34], включающую различные типы контроллеров, веб-серверов и серверов приложений, которые собирают данные о потреблении энергии и реализуют логику DR. Все коммуникации подземного горно-добывающего предприятия с СО могут быть обработаны блоком сбора и передачи данных, который также позволяет получать данные от агрегатора спроса. Такая реализация способна обрабатывать до 1000000 подключений контроллеров. Информация об энергопотреблении и платформе DR доступна конечным пользователям в личных кабинетах сайта платформы.

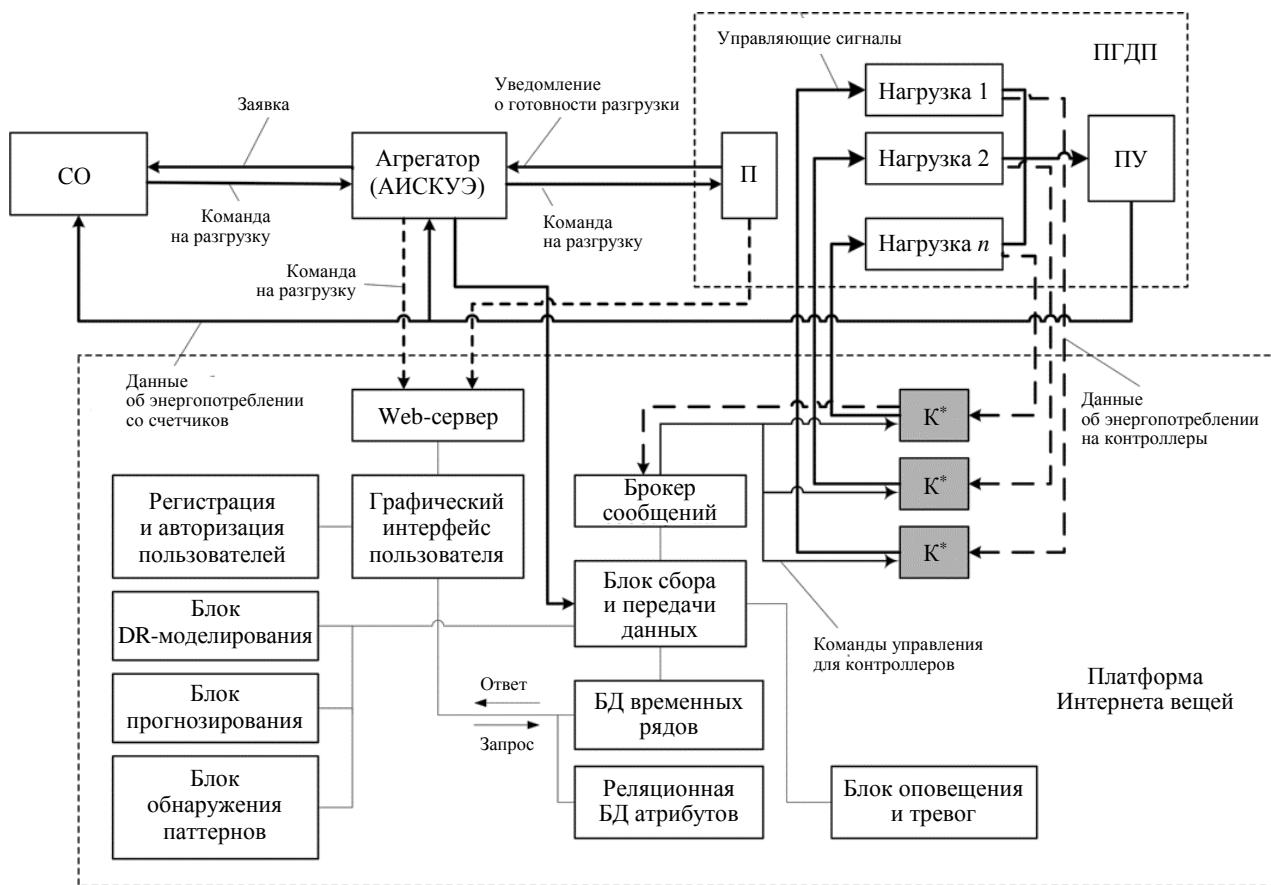


Рис.4. Схема имплементации кибернетического подхода к DR ПГДП на базе платформы Интернета вещей

Платформа работает следующим образом. Источником данных выступают управляющие контроллеры K^* , которые фиксируют потребление энергии горно-добывающим предприятием в течение нескольких расчетных периодов (не менее 45 дней, предшествующих расчетному дню, для которого будет строиться анализируемый график нагрузки). При этом подразумевается, что предприятие включает в себя один или несколько крупных нагрузок в виде локальных потребителей (в нашем случае ГВУ). Профиль нагрузки формируется на основе показателей потребления электроэнергии с 30-минутным интервалом и сохраняется в процессе энергомониторинга [35]. Для упрощения задачи управления спросом представленная схема при расчете показателей энергопотребления оборудования горного предприятия не учитывает перетоки реактивной мощности.

Для информационного взаимодействия платформы и реального оборудования используется брокер сообщений, который поддерживает типовой протокол Интернета вещей, например MQTT. Данные с брокера, а также с автоматизированной информационной системы коммерческого учета электроэнергии (АИСКУЭ) агрегатора спроса поступают в блок сбора и передачи данных и далее в базу данных временных рядов. В онлайн-режиме эти данные обрабатываются с помощью блока оповещения и тревог, в случае выхода параметров за требуемые диапазоны пользователи информируются.

Расчет энергопотребления с извлечением зон пиковой нагрузки производится по типовым дням (рабочие/выходные дни каждого месяца) в блоке обнаружения паттернов. Блок DR-моделирования реализует расчет почасовой статистики потребления по объектам подземного горно-добывающего предприятия; анализ почасовой статистики о составе и режимах работы включенного оборудования; расчет коэффициентов соотношения дефицита и профицита электроэнергии (мощности) в случае реализации разгрузок; величины ожидаемых (предпочтительных) ограничений на потребляемую электроэнергию в случае участия в мероприятиях DR.



Блок прогнозирования реализует построение графиков базовых нагрузок для типовых дней. Спрогнозированные величины энергопотребления по объектам горного предприятия сохраняются в реляционную БД атрибутов за каждый расчетный месяц (квартал). Там же хранятся результаты разгрузок, дополнительно рассчитываются отклонения фактических объемов разгрузок от значений, заданных в рамках договорных обязательств.

Визуализация сводного графика снижения нагрузки для горно-добывающего предприятия реализуется с помощью графического интерфейса пользователя платформы Интернета вещей, доступного в локальной сети компании в виде web-сервера [36].

Представленный кибернетический подход подразумевает возможность введения новых аналитических функций, способствующих повышению эффективности оценки общих затрат на электроэнергию на горно-добывающем предприятии [37]. Однако, прежде чем использовать приведенную схему архитектуры на практике, необходимо адаптировать БД и блоки прогнозирования с учетом особенностей конкретных предприятий. В том числе должны быть дополнительно рассмотрены вопросы информационной безопасности, которые на схеме вынесены в блок регистрации и авторизации пользователей.

Заключение. Кибернетический подход к ценозависимому управлению спросом на электроэнергию, потребляемую подземным горно-добывающим предприятием, подразумевает предоставление пользователю следующих графических экранных форм:

- сводная информация по энергопотреблению (включая базовую нагрузку);
- отчет по выполнению запросов на разгрузки, журналы инфообмена между агрегатором и потребителями (статистика запросов, подтверждение готовности выполнения запросов);
- информация по расчетным моделям распределения команд СО по нагрузкам;
- прогнозы базовой нагрузки, результаты выполнения разгрузок ГВУ, расчеты профиля энергопотребления ожидаемой нагрузки с помощью цифрового двойника Modelica [38, 39].

Пример экранной формы с отображением реального энергопотребления ГВУ без разгрузки (*Active_power_Power_Station*) графиков базовой линии (*demand response baseline*), базовой линии с разгрузкой (*demand response discharge*), прогнозного профиля разгрузки (*demand response expected*) в режиме на сутки вперед приведен на рис.5.

Предлагается построение двух типов отчетов для конечных пользователей платформы:

• Отчет PLAN с прогнозируемым графиком совокупного снижения нагрузки в соответствии с алгоритмом, где представлены базовый, прогнозируемый и ожидаемый графики нагрузок, показатель RRMSE в качестве метрики точности прогнозов, дефицит и избыток энергии. Используются следующие параметры: целевой день, время и продолжительность снижения нагрузки, общий объем снижения нагрузки (МВт).

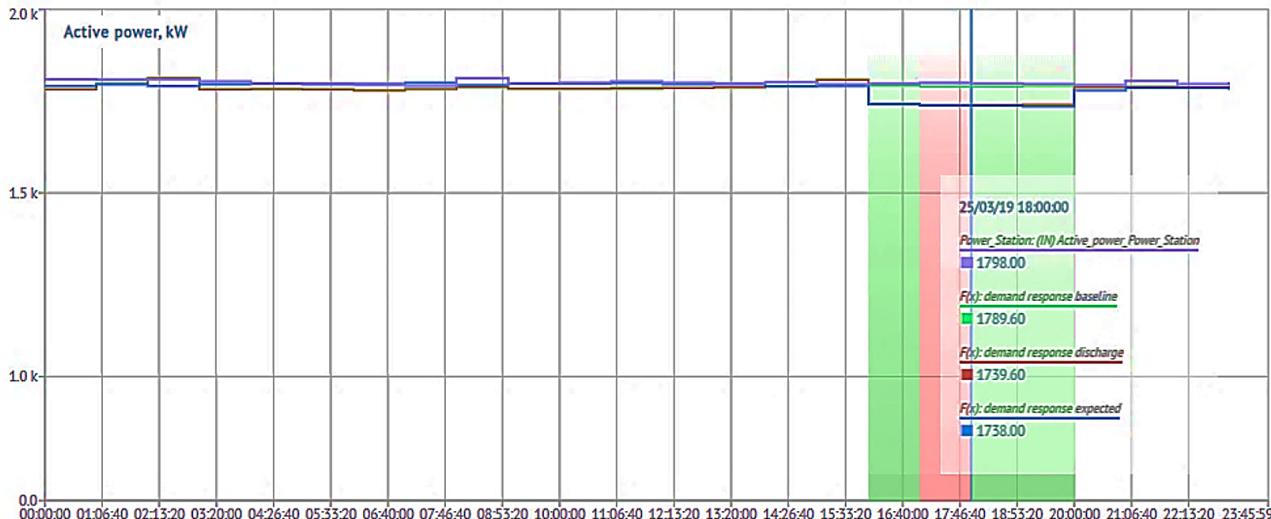


Рис.5. Моделирование снижения нагрузки на ГВУ горно-добывающего предприятия на сутки вперед

• Отчет FACT, который показывает фактический график совокупного снижения нагрузки. Представлены график базовой нагрузки, фактическое потребление энергии, установленные обязательства по снижению нагрузки, параметр RRMSE в качестве метрики точности прогнозов, результат разгрузки (успех/неудача) в разбивке по часам. Используются следующие параметры: целевой день, время и продолжительность разгрузки, общий объем снижения нагрузки (МВт), индикатор готовности к снижению нагрузки, индикатор наличия события управления спросом на электроэнергию.

Потребители горно-добывающего предприятия могут быть подключены к платформе Интернета вещей с имплементированным сервисом ценозависимого управления спросом следующими способами:

• Путем установки аппаратных средств (управляющих контроллеров) в инфраструктуре горно-добывающего предприятия. Управляющие контроллеры позволяют получать данные по энергопотреблению, а также осуществлять автоматический контроль нагрузки потребителя на основе предустановленных сценариев или команд через пользовательское приложение.

• Предполагается наличие у потребителя высокого уровня автоматизации управления энергопотреблением (EMS). Тогда интеграция платформы может быть реализована программным путем (без установки дополнительных аппаратных средств) – подключение платформы Интернета вещей к EMS потребителя и получение от нее данных о потреблении энергии.

Представленная кибернетическая модель управления спросом на электроэнергию может быть встроена в киберфизическую вентиляционную систему подземного горно-добывающего предприятия, в которой будут выполняться всевозможные сценарии изменения технологических процессов и параметров задействованного электрооборудования.

Анализ полученной информации будет осуществляться платформой Интернета вещей, в результате которого будет разработано минимум два возможных сценария снижения потребления нагрузки:

- на основе анализа режимов работы всех потребителей энергии, полученных с показаний счетчиков электроэнергии;
- на основе анализа внешних факторов (снижение незапланированной нагрузки), например, на основе фактора изменения параметров наружного воздуха, который поступает в шахтные стволы и влияет на распределение воздуха между ними (объемный расход поступающего воздуха изменяется за счет смены значения общерудничной естественной тяги), а значит, и на работу ГВУ.

При анализе внешних факторов в результате моделирования технологических процессов в цифровом двойнике можно предсказать заранее (например, в течение суток) варианты возможного снижения производительности ГВУ и, следовательно, потребляемой электроэнергии.

Рассмотренная в работе архитектура позволит подземным горно-добывающим предприятиям занимать нишу на рынке ценозависимого управления спросом на электроэнергию DR, тем самым достигая устойчивого развития и придерживаясь политики в области энергосбережения. С точки зрения достижения финансового результата предприятие может снизить стоимость технологического процесса добычи полезного ископаемого до 700 тыс. руб. за 1 МВт в результате снижения электрической мощности в часы, установленные СО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев А.В. Способ проветривания уклонных блоков нефтешахт, повышающий энергоэффективность подземной добычи нефти // Нефтяное хозяйство. 2016. № 11. С. 133-136.
2. Vilhena Costa de L., Silva da J.M. Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand // Mining Technology. 2020. Vol. 129. Iss. 1. P. 1-8. DOI: 10.1080/25726668.2019.1651581
3. Wallace K., Prosser B., Stinnette J.D. The practice of mine ventilation engineering // International Journal of Mining Science and Technology. 2015. Vol. 25. Iss. 2. P. 165-169. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.02.001
4. Каменских А.А. Разработка методов контроля и снижения поверхностных утечек воздуха на рудниках: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь: Горный институт Уральского отделения РАН, 2011. 20 с.
5. Николаев А.В., Альменко Н.И., Садыков Р.И. Расчет величины поверхностных утечек воздуха на калийных рудниках // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2012. № 5. С. 115-121.



6. Головатый И.И., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю. Шахтная вентиляторная установка с системой автоматического управления для рециркуляционного проветривания калийных рудников // Горный журнал. 2010. № 8. С. 78-80.
7. Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Моделирование переходных процессов в вентиляционных сетях подземных рудников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. № 5. С. 101-109.
8. Зайцев А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2019. 44 с.
9. Gandler S.G., Kovshov S.V. Estimation and reduction of mining-induced damage of the environment and work area air in mining and processing of mineral stuff for the building industry // Eurasian mining. 2016. № 1. С. 45-49. DOI: 10.17580/em.2016.01.08
10. Николаев А.В. Энергоэффективное кондиционирование шахтного воздуха в неглубоких рудниках // Горный журнал. 2017. № 3. С. 71-74. DOI: 10.17580/gzh.2017.03.13
11. Кудж С.А., Цветков В.Я. Сетевентрическое управление и кибер-физические системы // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 2(19). С. 86-92. DOI: 10.21777/2500-2112-2017-2-86-92
12. Piette M., Sezgen O., Watson D. et al. Development and evaluation of fully automated demand response in large facilities // Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.
13. Sezgen O., Goldman C.A., Krishnarao P. Option value of electricity demand response // Energy. 2007. Vol. 32. Iss. 2. P. 108-119. DOI: 10.1016/j.energy.2006.03.024
14. Valero S., Ortiz M., Senabre C. et al. Methods for customer and demand response policies selection in new electricity markets // IET Generation, Transmission & Distribution. 2007. Vol. 1. Iss. 1. P. 104-110. DOI: 10.1049/iet-gtd:20060183
15. Chasparis G.C., Pichler M., Spreitzhofer J., Esterl T. A cooperative demand-response framework for day-ahead optimization in battery pools // Energy Informatics. 2019. Vol. 2. P. 1-17. DOI: 10.1186/s42162-019-0087-x
16. Soares L.J., Medeiros M.C. Modeling and forecasting short-term electricity load: A comparison of methods with an application to Brazilian data // International Journal of Forecasting. 2008. Vol. 24. Iss. 4. P. 630-644. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2008.08.003
17. Xu Y., Li N., Low S.H. Demand Response With Capacity Constrained Supply Function Bidding // IEEE Transactions on Power Systems. 2016. Vol. 31. № 2. P. 1377-1394. DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2421932
18. Boikov A., Payor V., Savelev R., Kolesnikov A. Synthetic Data Generation for Steel Defect Detection and Classification Using Deep Learning. Symmetry. 2021. Vol. 13. Iss. 7. № 1176. DOI: 10.3390/sym13071176
19. Zhukovskiy Y.L., Kovalchuk M.S., Batueva D.E., Senchilo N.D. Development of an Algorithm for Regulating the Load Schedule of Educational Institutions Based on the Forecast of Electric Consumption within the Framework of Application of the Demand Response // Sustainability. 2021. Vol. 13 (24). № 13801. DOI: 10.3390/su132413801
20. Shabalov M.Yu., Zhukovskiy Yu.L., Buldysko A.D. et al. The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 2664-2680. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.05.001
21. Savard C., Iakovleva E., Ivanchenko D., Rassolkin A. Accessible battery model with aging dependency // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 12. № 3493. DOI: 10.3390/en14123493
22. Senchilo N.D., Ustinov D.A. Method for determining the optimal capacity of energy storage systems with a long-term forecast of power consumption // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 21. № 7098. DOI: 10.3390/en14217098
23. Dicks F., Clausen E. Ventilation on Demand // Mining Report. 2017. Vol. 153. № 4. P. 334-341.
24. Nikolaev A.V., Alymenko N.I., Kamenskikh A.A. et al. Factors defining value and direction of thermal pressure between the mine shafts and impact of the general mine natural draught on ventilation process of underground mining companies // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. № 052020. P. 561-566. DOI: 10.2991/aiime-17.2017.91
25. Rogers D.P., Tsirkunov V.V. Weather and Climate Resilience: Effective Preparedness through National Meteorological and Hydrological Services // World Bank Publications. Washington, DC: Directions in Development – Environment and Sustainable Development, 2013. 152 p.
26. Kychkin A., Nikolaev A. IoT-based Mine Ventilation Control System Architecture with Digital Twin // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2020. № 9111995. 5 p. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111995
27. Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Хандожко Л.А., Шаймарданов М.З. Гидрометеорологическая безопасность и устойчивое развитие России // Право и безопасность. 2007. № 1-2 (22-23). С. 7-13.
28. Nikolaev A., Alymenko N., Kamenskikh A., Nikolaev V. The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts // E3S Web of Conferences. 2017. Vol. 15. № 02004. 7 p. DOI: 10.1051/e3sconf/20171502004
29. Andersen F.M., JENSEN S.G., Larsen H.V. et al. Analyses of Demand Response in Denmark. Denmark. Roskilde: Riso National Laboratory Information Service Department, 2006. 100 p.
30. Xu B., Zheng J., Wang Q. Analysis and Design of Real-Time Micro-Environment Parameter Monitoring System Based on Internet of Things // IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData). 15-18 December, 2016. Chengdu, China. 2016. P. 368-371. DOI: 10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2016.87
31. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswamia M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions // Future Generation Computer Systems. 2013. Vol. 29. Iss. 7. P. 1645-1660. DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010
32. Kychkin A., Deryabin A.S., Neganova E., Markvirev V. IoT-Based Energy Management Assistant Architecture Design // 2019 IEEE 21st Conference on Business Informatics (CBI). IEEE Computer Society. 2019. Vol. 1. P. 522-530. DOI: 10.1109/CBI.2019.00067
33. Mijić D., Varga E. Unified IoT Platform Architecture Platforms as Major IoT Building Blocks // International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet). 2018. P. 6-13. DOI: 10.1109/CoCoNet.2018.8476881
34. Lu Hou, Shaohang Zhao, Xiong Xiong et al. Internet of Things Cloud: Architecture and Implementation // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54. Iss.12. P. 32-39. DOI: 10.1109/MCOM.2016.1600398CM
35. Kychkin A.V. Synthesizing a system for remote energy monitoring in manufacturing // Metallurgist. 2016. Vol. 59. № 9-10. P. 752-760. DOI: 10.1007/s11015-016-0170-5

36. Lyakhomskiy A., Perfileva E., Kychkin A., Genrikh N. A software- hardware system of remote monitoring and analysis of the energy data // Russian Electrical Engineering. 2015. Vol. 86 (6). P. 314-319. DOI: 10.3103/S1068371215060103
37. Faizrakhmanov R.A., Frank T., Kychkin A.V., Fedorov A.B. Sustainable energy consumption control using the MY-JEVIS energy management data system // Russian Electrical Engineering. 2011. Vol. 82 (11). P. 607-611. DOI: 10.3103/S1068371211110022
38. Vöth S., Vasilyeva M. Potential of Modelica for the creation of digital twins // Advances in raw material industries for sustainable development goals. London: Taylor & Francis Group, 2020. P. 386-389. DOI: 10.1201/9781003164395
39. Vöth S., Bogdanov V., Pomazov D. Modeling of Efficiencies on Basis of Power Flow Directions using Modelica on the Example of Hoisting Systems // Project: Safety and Availability of Cranes. 2020. 6 p.

Авторы: А.В.Николаев, д-р техн. наук, доцент, nikolaev0811@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4601-5780> (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), Ш.Фёт, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0002-0705-973X> (Высшая школа технических наук Георга Агреколы, Бохум, Германия), А.В.Кычкян, канд. техн. наук, доцент, заведующий научно-учебной лабораторией, <https://orcid.org/0000-0003-0626-5803> (Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», филиал в г. Пермь, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Повышение энергоэффективности вакуумной установки перегонки мазута с помощью пинч-анализа

Е.А.ЮШКОВА✉, В.А.ЛЕБЕДЕВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Юшкова Е.А., Лебедев В.А. Повышение энергоэффективности вакуумной установки перегонки мазута с помощью пинч-анализа // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 415-427. EDN LXDVDP

Аннотация. Повышение энергоэффективности нефтеперерабатывающего предприятия – актуальная задача государства. Объектом исследования является вакуумная установка перегонки мазута, включающая блок предварительного нагрева сырья и печь подогрева мазута перед колонной. Пинч-анализ позволяет проанализировать и оптимизировать большое количество тепловых потоков. Анализ и повышение энергоэффективности объекта исследования проводится энталпийным пинч-анализом. С целью снижения тепловой нагрузки печи введены дополнительные потоки в систему теплообмена блока подогрева нефти. Проведена параметрическая оптимизация новой системы теплообмена, определены минимальные потребности системы теплообмена во внешних энергоносителях. Построен энталпийный каскад системы теплообмена, который наглядно показывает распределение тепла между каждым тепловым потоком системы. Поиск оптимальной потоковой теплоемкости продуктов сгорания печи – важный пункт в анализе энергоэффективности печи. Выявлена оптимальная потоковая теплоемкость, при которой потери тепла с уходящими газами минимальны. В результате проведенных исследований повышена эффективность блока предварительного нагрева мазута за счет доведения рекуперации тепла до максимума, а затраты на внешние энергоносители минимизированы. Уменьшением потерь тепла с уходящими газами удалось увеличить КПД печи.

Ключевые слова: вакуумная установка перегонки мазута; повышение энергоэффективности; пинч-анализ; тепловой каскад; энталпия

Поступила: 10.03.2023

Принята: 20.06.2023

Онлайн: 19.07.2023

Опубликована: 19.07.2023

Введение. Повышение энергоэффективности является главным фактором экономического роста предприятия и государства [1-3]. Энергоэффективные технологии могут сократить потребление природных ресурсов и уменьшить ущерб окружающей среде [4-6]. Федеральный закон от 2 июля 2021 г. № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» подтверждает актуальность уменьшения выбросов в окружающую среду.

Ученые всего мира создают энергоэффективные технологии [7-9]. Современные исследования включают в себя компьютерные технологии [10-12]. Существует множество различных методов оценки энергоэффективности [13-15]. Актуальными направлениями исследований являются 4-Э [16]: энталпия; эксергетика; эксэргоэкономика; экономический анализ. Исследования продвигаются вперед, и 4-Э можно дополнить анализом окружающей среды [17-20].

Одним из эффективных методов оптимизации тепловых потоков является пинч-анализ [21]. Теоретические основы в области интеграции тепловых процессов и пинч-анализа представлены в работе Р.Смита и др. [22, 23]. Пинч-анализ позволяет работать с большим количеством тепловых потоков и провести параметрическую и структурную оптимизацию системы теплообмена.

Нефтеперерабатывающая промышленность является энергоемкой [20] – у заводов много тепловых потоков с большими потенциалами тепловой энергии, что делает использование пинч-анализа целесообразным [24-26].



В исследовании [27] подробно представлен метод повышения энергетической эффективности установок первичной перегонки сырой нефти без внесения изменений в структуру теплообменной сети. Повышение экономической эффективности технологических установок достигается за счет применения методов математического программирования. Также удается достичь снижения выбросов углекислого газа в окружающую среду.

Распространенным методом проектирования теплообменных сетей является графический метод интеграции процессов [28]. Данный метод имеет ряд существенных преимуществ, в частности обеспечивается интерактивная визуализация анализа теплообменной сети, что может заменить использование различных программных продуктов (Aspen Energy Analyser и др.). Практическое применение метода имеет место в рамках модернизации нефтеперерабатывающего завода в Кувейте [29], однако он применим только к теплообменным сетям с одной минимальной разностью температур.

Одним из главных результатов исследования [30] является получение графического инструмента для проектирования теплообменных сетей при одновременном присутствии нескольких минимальных температурных перепадов.

В работе [31] приводится пример оптимизации теплообменной сети установки первичной перегонки сырой нефти на примере нефтеперерабатывающего завода, расположенного в Бахрейне. Особое внимание обращается на сокращение выбросов углекислого газа.

Пинч-анализ включает в себя различные инструменты: параметрическую и структурную оптимизацию; большую составную кривую и тепловые каскады. Существуют различные варианты использования пинч-анализа – энталпийный, эксергетический и т.д. [32-34]. Метод структурной и параметрической оптимизации на основе эксергетического пинч-анализа описан в исследованиях [35]. Новизной данного исследования является использование технологии пинч-анализа с целью разработки мер для повышения энергоэффективности вакуумной установки по перегонке мазута.

Методы. Вакуумная трубчатая установка перегонки мазута топливного профиля предназначена для переработки мазутной фракции и фракции атмосферного газойля с атмосферной трубчатой установки АТ-5 с целью получения вакуумного дизельного топлива, легкого и тяжелого вакуумного газойля. Общая схема исследуемых блоков вакуумной установки ВТ-1 представлена на рис.1.

Объектами исследования являются блок предварительного нагрева сырья вакуумной установки по перегонке мазута ВТ-1 и печь подогрева мазута перед колонной. Основные этапы исследования:

- анализ существующей системы теплообмена блока предварительного нагрева сырья с помощью энталпийного пинч-анализа;
- пинч-анализ установки вакуумной перегонки мазута:

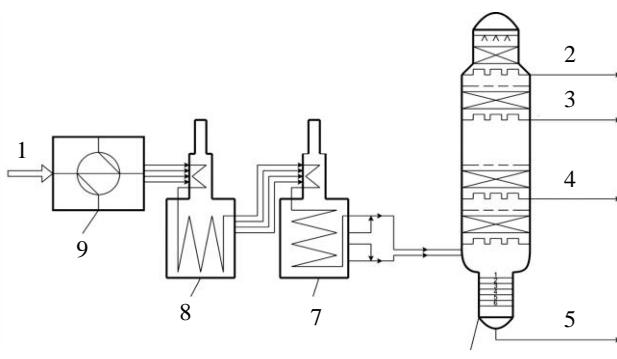


Рис.1. Схема исследуемых блоков вакуумной установки ВТ-1

- 1 – мазут в Т-27/1,2; 2 – вакуумный компонент дизельного топлива (КДТВ) и первое циркуляционное орошение (ЦО) из К-4 в ВХ-10/1,2;
3 – фракция легкого вакуумного газойля (ЛВГ) из К-4 в Т-22/1,2;
4 – фракция тяжелого вакуумного газойля (ТВГ) + II ЦО К-4 в Т-26/3,4;
5 – гудрон + квенин в Т-31/3,4; 6 – вакуумная колонна К-4;
7 – печь вакуумной колонны П-3; 8 – печь вакуумной колонны П-3Н;
9 – блок предварительного нагрева сырья

– параметрическая оптимизация новой системы теплообмена блока предварительного нагрева;

– построение и исследование энталпийного каскада, который показывает долю энталпии на каждом интервале температур;

– анализ системы теплообмена с помощью большой составной кривой, который позволит оптимизировать работу печи подогрева мазута.

Анализ существующей системы теплообмена блока предварительного нагрева сырья. Перед тем как перейти к преобразованию тепловых потоков, их интеграции, необходимо понять общее устройство блока предварительного подогрева мазута. Теплообменная система вакуумной установки перегонки мазута топливного профиля ВТ-1 представлена

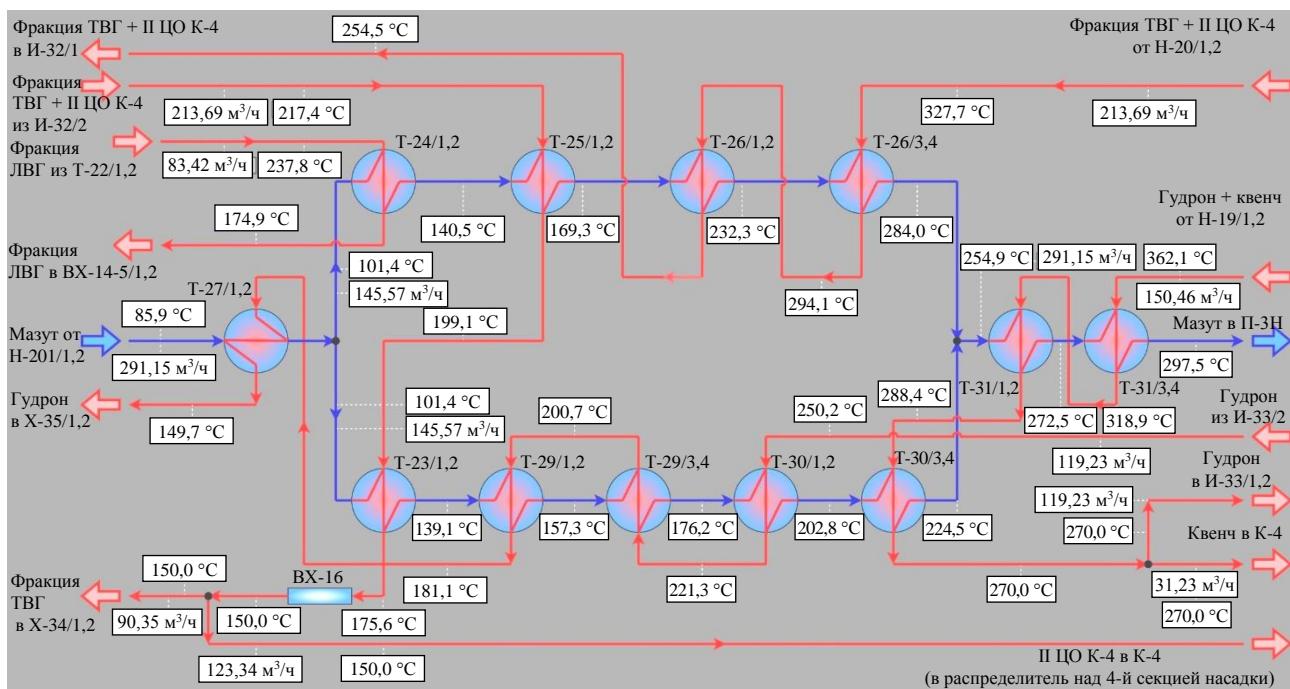


Рис.2. Система теплообмена блока предварительного нагрева мазута установки ВТ-1

на рис.2. Сырьем установки является мазут или близкий по физико-химическим свойствам нефтепродукт.

Согласно заданному режиму работы вакуумной колонны К-4, температура мазута, поступающего в ректификационную колонну, должна быть равна 393 °C. Для достижения данной температуры мазут после теплообменника T-31/3,4 поступает в блок огневого нагрева сырья (мазута), который состоит из трубчатых печей нагрева мазута П-3Н и П-3. В первую очередь мазут проходит конвекционную и радиантную секции печи П-3Н, где нагревается до температуры, равной 320 °C. При этом печь П-3Н четырехпоточная – мазут поступает в нее четырьмя потоками и выводится так же. Далее мазут поступает в печь вакуумной колонны П-3, где при прохождении через конвекционную и радиантную секции нагревается до 393 °C.

После прохождения через блок огневого нагрева сырья мазут с температурой 393 °C поступает двумя потоками в вакуумную колонну К-4, которая предназначена для разделения под вакуумом мазута на фракции по следующей топливной схеме: вакуумная дизельная фракция; легкий и тяжелый вакуумные газоили; гудрон.

Холодным потоком установки ВТ-1 является мазут. Но для построения составной кривой холодных потоков данный поток будет представлен как четыре отдельных холодных потока. Горячими потоками для данной технологической схемы являются фракции мазута, выводимые из соответствующих отборов ректификационной колонны. Опираясь на состав технологической схемы установки ВТ-1, могут быть выделены пять горячих потоков, которые используются для нагрева мазута (холодные потоки) в блоке предварительного нагрева сырья. Определены тепловые потоки, данные которых представлены в табл.1.

Изменение теплосодержания технологического потока при изменении его температуры (при постоянном значении теплоемкости в пределах данного температурного интервала) определяется по формуле

$$\Delta H = CP [T_2 - T_1], \quad (1)$$

где CP – потоковая теплоемкость, является произведением массового расхода на удельную теплоемкость, $\text{Вт}/\text{°C}$; T_1 – начальная температура; T_2 – конечная температура.

Горячая составная кривая объединяет потоки, которые отдают тепло. Потоки мазута, требующие нагрева, объединяются в холодную составную кривую. На основании параметров холодных и горячих технологических потоков построены холодная и горячая составные кривые потоков (рис.3, а).

Таблица 1

Исходные данные тепловых потоков установки

Тип	Поток	Температура, °C		Массовый расход, кг/с	Удельная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг·°C)	Потоковая теплоемкость, кВт/°C	Изменение энталпии потока, МВт
		Начальная	Конечная				
Горячий поток 1	Фракция тяжелого вакуумного газойля и второго циркуляционного орошения из колонны К-4 от Н-20/1,2 в Т-26/3,4	328	255	56,0	2,8	154,1	-11,2
Горячий поток 2	Фракция тяжелого вакуумного газойля и второго циркуляционного орошения из И-32/2 в Т-25/1,2	232	176	56,0	2,4	136,7	-7,7
Горячий поток 3	Гудрон и квенч от Н-19/1,2 в Т-31/3,4	362	270	44,2	2,7	118,5	-10,9
Горячий поток 4	Гудрон из И-33/2 в Т-30/1,2	250	150	35,0	2,3	81,5	-8,2
Горячий поток 5	Фракция легкого вакуумного газойля из Т-22/1,2 в Т-24/1,2	238	175	21,0	2,5	52,9	-3,3
Холодный поток 1	Мазут от Н-201/1,2 в Т-27/1,2	86	101	79,2	2	160,2	2,4
Холодный поток 2	Мазут из Т-27/1,2 в Т-24/1,2	101	284	39,6	2,4	93,5	17,1
Холодный поток 3	Мазут из Т-27/1,2 в Т-23/1,2	101	225	39,6	2,3	89,7	11,1
Холодный поток 4	Мазут в Т-31/1,2	255	393	79,2	2,7	217,2	29,8

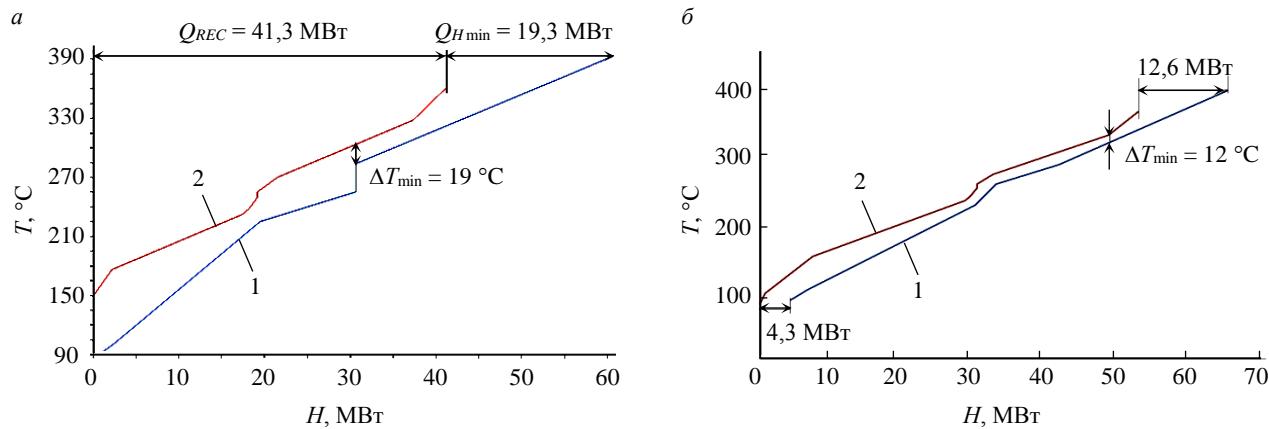


Рис.3. Составные кривые технологических потоков до (а) и после (б) преобразования

1 – холодная; 2 – горячая

Значение наименьшего теплового напора в теплообменной химико-технологической системе (ХТС) получают путем изменения положения составной кривой холодных потоков на температурно-энталпийной плоскости. Обусловлено это тем, что начальные и конечные температуры технологических потоков должны сохраняться, а энталпия – величина относительная. Сохраняется только изменение энталпий потоков, следовательно, составные кривые можно сдвигать вдоль оси абсцисс на TH -диаграмме [22].

Опираясь на полученные значения, можно сделать вывод, что построение горячей и холодной составных кривых на температурно-энталпийной диаграмме позволяет определить значения реекуперации теплоты и внешних горячих и холодных утилит.

По построенной составной кривой получены следующие данные:

- минимальная разность температур между технологическими потоками в теплообменном оборудовании, которая определяется по минимальному расстоянию между составными кривыми вдоль температурной оси на TH -диаграмме:



$$\Delta T_{\min} = 19 \text{ } ^\circ\text{C};$$

- количество рекуперируемой теплоты (максимальная рекуперация теплоты)

$$Q_{REC} = 41,3 \text{ МВт};$$

- целевые значения горячих утилит

$$Q_{H\min} = 60,6 - 41,3 = 19,3 \text{ МВт};$$

- целевые значения холодных утилит

$$Q_{C\min} = 0 \text{ МВт}.$$

Целевые значения горячих утилит $Q_{H\min}$ определяют количество внешней тепловой энергии, которое не получить холодными потоками от существующих горячих потоков установки ВТ-1 и должно быть подведено от внешних источников энергии (печи нагрева мазута П-3Н и П-3).

Целевые значения холодных утилит $Q_{C\min}$ определяют количество тепловой энергии, которое не может быть передано от горячих потоков к холодным и должно быть отдано внешним холодным утилитам. Для установки ВТ-1 остаточная теплота горячих потоков отводится в холодильниках и аппаратах воздушного охлаждения (АВО). Чтобы уменьшить требуемое количество внешних горячих утилит и, следовательно, снизить тепловую нагрузку на печи П-3Н и П-3, необходимо исследовать возможность доохлаждения существующих горячих потоков в блоке предварительного нагрева мазута до подачи их в холодильники и АВО.

Рассмотрим возможность дополнительного использования каждого из представленных в табл.1 горячих потоков:

- Фракция тяжелого вакуумного газойля и второго циркуляционного орошения К-4 из И-32/2 в Т-25/1,2. Поток проходит через теплообменники Т-25/1,2, Т-23/1,2 и поступает в АВО ВХ-16. После прохождения через данный АВО поток охлаждается от температуры, равной 176 °С, до 150 °С. Несмотря на то что ТВГ должен быть охлажден перед поступлением в парк до 80,4 °С, II ЦО К-4 должно быть охлаждено до 150 °С, так как данный поток после ВХ-16 поступает в ректификационную колонну К-4. Следовательно, изменение температуры II ЦО К-4 недопустимо, так как это может вызвать изменение режима работы вакуумной колонны. Но можно исключить из работы АВО ВХ-16 за счет охлаждения фракции ТВГ + II ЦО К-4 в теплообменниках Т-25/1,2 и Т-23/1,2 сразу до 150 °С. Это позволит не только снизить нагрузку на внешние горячие утилиты, но и уменьшить расход электроэнергии на привод вентиляторов АВО ВХ-16.

- Гудрон из И-33/2 в Т-30/1,2. Данный поток проходит через теплообменники Т-30/1,2, Т-29/3,4, Т-29/1,2, Т-27/1,2 и выводится в холодильники Х-35/1,2 и Х-35/3,4, где охлаждается за счет нагрева циркуляционной воды. Охлаждение гудрона необходимо, потому что температура фракции гудрона при поступлении в парк или на битумную установку (в зависимости от режима работы установки ВТ-1) должна быть равна 96 °С. Температура гудрона на выходе из блока предварительного нагрева мазута равна 150 °С. Следовательно, нужно рассмотреть возможность доохлаждения гудрона до его целевой температуры именно в блоке предварительного нагрева сырья, т.е. исключить из работы холодильники Х-35/1,2 и Х-35/3,4.

- Фракция легкого вакуумного газойля из Т-22/1,2 в Т-24/1,2. Поток проходит через теплообменник Т-24/1,2, далее поступает в АВО ВХ-14/5-1,2, ВХ-14/5-3,4, ВХ-17 и выводится в парк или линию гудрона в парк (в зависимости от требований к получаемым продуктам). Температура фракции легкого вакуумного газойля после теплообменника Т-24/1,2 равна 175 °С. Температура фракции ЛВГ на выходе из установки ВТ-1 должна быть равна 80 °С. Следовательно, стоит рассмотреть возможность доохлаждения данного потока до целевой температуры в блоке предварительного нагрева сырья, что позволит исключить из работы АВО и снизить тепловую нагрузку на печи нагрева мазута П-3Н и П-3.

Энталпийный пинч-анализ установки вакуумной перегонки мазута. Параметры измененных тепловых потоков после преобразований представлены в табл.2. Параметры остальных потоков остались без изменения. Составные кривые на плоскости температура – энталпия представлены на рис.3, б. Данные составные кривые сближены до $\Delta T_{\min} = 12 \text{ } ^\circ\text{C}$.



Таблица 2

Данные измененных тепловых потоков системы теплообмена

Тип	Поток	Температура, °C		Массовый расход, кг/с	Удельная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг·°C)	Потоковая теплоемкость, кВт/°C	Изменение энталпии потока, МВт
		Начальная	Конечная				
Горячий поток 2	Фракция тяжелого вакуумного газойля и второго циркуляционного орошения из И-32/2 в Т-25/1,2	232	150↓	56,0	2,4	134,2	-11
Горячий поток 4	Гудрон из И-33/2 в Т-30/1,2	250	96↓	35,0	2,1	74,4	-11,5
Горячий поток 5	Фракция легкого вакуумного газойля из Т-22/1,2 в Т-24/1,2	238	80↓	21,0	2,3	48,7	-7,7

По построенной составной кривой получены следующие данные:

- минимальная разность температур между технологическими потоками в теплообменном оборудовании, которая определяется по минимальному расстоянию между составными кривыми вдоль температурной оси на TH -диаграмме $\Delta T_{min} = 12$ °C;
- количество рекуперируемой теплоты (максимальная рекуперация теплоты), которое определяется по области перекрытия составных кривых технологических потоков вдоль энталпийной оси на TH -диаграмме: $Q_{REC} = 48$ МВт;
- целевые значения горячих утилит $Q_{Hmin} = 12,6$ МВт;
- целевые значения холодных утилит $Q_{Cmin} = 4,3$ МВт.

Полученные целевые энергетические значения по использованию внешних горячих и холодных утилит определены при минимальной разности температур между технологическими потоками в теплообменном оборудовании, равной $\Delta T_{min} = 12$ °C.

За счет построения составных кривых технологических потоков можно задавать значение наименьшего теплового напора в теплообменной ХТС. Так, для кожухо-трубчатых теплообменников минимальная разность температур между технологическими потоками должна быть не менее 10 °C. Такое требование обусловлено тем, что при малых значениях ΔT_{min} теплообменные аппараты должны работать в чисто противоточном режиме. При проектировании новой или реконструкции существующей теплообменной ХТС оптимальное значение ΔT_{min} выбирается путем достижения экономического компромисса между зависимостями от минимальной разности температур между технологическими потоками в теплообменном оборудовании, стоимости внешних утилит (энергоносителей) и капитальных вложений на устройство системы теплообмена.

Следующий этап исследования и оптимизации установки заключается в построении теплового каскада, который позволит показать процесс теплообмена между потоками. По методике пинч-анализа [22] для построения теплового каскада необходимо, чтобы сдвинутые составные кривые касались друг друга в точке пинча. Представим, что горячие потоки холоднее на величину $\Delta T_{min}/2$, холодные – на $\Delta T_{min}/2$. Результатом такого сдвигания составных кривых вдоль температурной оси становится возможна теплопередача между потоками, содержащими в холодной и горячей составные кривые в пределах каждого температурного интервала. Изменение границ температурных интервалов сохраняет баланс теплоты всей системы.

Энергетические значения внешних утилит и локализация точки пинча будут определяться при $\Delta T_{min} = 12$ °C. Для построения теплового каскада необходимо получить новые температуры, сдвинутые на $\Delta T_{min}/2$. Измененные значения начальных и конечных температур потоков представлены в табл.3. Расположение технологических потоков на температурной оси после преобразований представлено в табл.4.



Таблица 3

Сдвинутые температурные интервалы

Поток	Тип	$T_h, ^\circ\text{C}$	$T_k, ^\circ\text{C}$	$T_h, ^\circ\text{C}$	$T_k, ^\circ\text{C}$
1	Холодный	86	101	92	107
2	—"	101	284	107	290
3	—"	101	225	107	231
4	—"	255	393	261	399
5	Горячий	328	255	322	249
6	—"	232	150	226	144
7	—"	362	270	356	264
8	—"	250	96	244	90
9	—"	238	80	232	74

Таблица 4

Баланс тепла в сдвинутых температурных интервалах

Температура на границах интервалов $T, ^\circ\text{C}$	Распределение потоков	Величина температурного интервала $T, ^\circ\text{C}$	$\Sigma CP_{хол} - \Sigma CP_{гор}, \text{kBt}/^\circ\text{C}$	Тепловая нагрузка интервала, МВт	Избыток/ недостаток
399		43	217,2	9,339	Недостаток
356		34	98,7	3,356	Недостаток
322		32	-55,4	-1,773	Избыток
290		26	38,1	0,991	Недостаток
264		3	156,6	0,469	Недостаток
261		12	-60,6	-0,727	Избыток
249		5	93,5	0,468	Недостаток
244		12	19,1	0,229	Недостаток
232		1	-29,6	-0,029	Избыток
231		5	60,1	0,301	Недостаток
226		82	-74,1	-6,076	Избыток
144		37	60,1	2,224	Недостаток
107		15	37,1	0,557	Недостаток
92		2	-123,1	-0,246	Избыток
90		16	-48,7	-0,779	Избыток
74					

Следующим шагом в решении задачи табличным способом является энергетический баланс для каждого сдвинутого температурного интервала:

$$\Delta H_i = (\sum CP_{хол} - \sum CP_{гор}) \Delta T_i, \quad (2)$$

где $\Sigma CP_{хол}$, $\Sigma CP_{гор}$ – сумма потоковых теплоемкостей всех холодных и горячих потоков соответственно, $\text{Вт}/^\circ\text{C}$; ΔT_i – величина i -го температурного интервала, $^\circ\text{C}$.

В формуле (2) ΔH_i представляет собой изменение энталпии для каждого сдвинутого температурного интервала. Положительное ΔH_i обозначает, что на i -м интервале дефицит тепловой

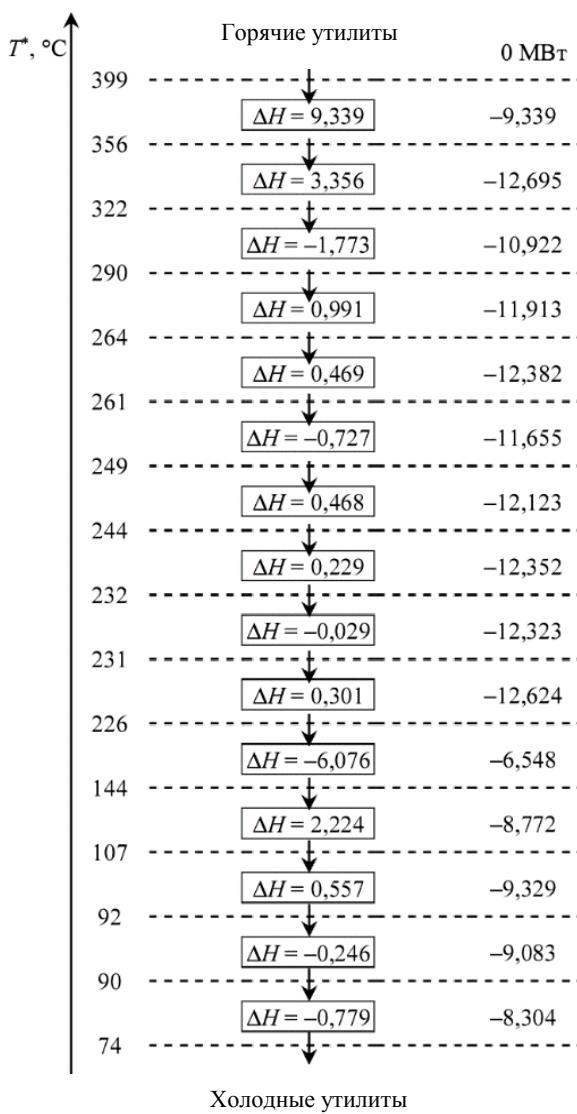


Рис.4. Каскад различных остатков теплоты при нулевых горячих утилитах

энергии, поэтому необходимо подводить тепло из внешних источников. Отрицательное ΔH_i значит, что в i -м интервале избыток тепловой энергии. Значения ΔH_i каждого температурного интервала представлены в табл.4.

Чтобы рассмотреть возможность рекуперации теплоты между температурными интервалами, в данном методе предусматривается построение каскадов тепловых потоков. Для этого необходимо создать каскад, в котором суммируется изменение энталпии сверху вниз. При этом нужно построить два каскада. Предполагается, что первый температурный интервал не получает тепловую энергию от внешних энергоносителей, т.е. $Q_{H\min} = 0$. Построенный энталпийный каскад при нулевых горячих утилитах представлен на рис.4.

Как видно из рис.4, первый температурный интервал имеет нетто-дефицит тепловой энергии, равный 9,339 МВт. Он передается второму температурному интервалу, который тоже имеет недостаток тепловой энергии горячих потоков – 3,356 МВт. В результате недостаток теплоты составляет величину, равную –12,695 МВт. Третий температурный интервал имеет избыток тепловой энергии горячих потоков –1,773 МВт, в результате чего недостаток теплоты уменьшается и становится равным –10,992 МВт. По такому принципу изменяется величина избытка или недостатка тепловой энергии на каждом из температурных интервалов. Но стоит задача определить с помощью построенного каскада тепловых потоков локализацию пинча, целевые энергетические значения горячих и холодных утилит. Для этого нужно действовать, основываясь на том, что тепловые потоки не могут быть отрицательными, потому что невозможно передавать энергию вверх по температурной шкале от низких температур к более высоким. Отрицательных тепловых потоков не должно быть, для этого к первому интервалу подводят значение наибольшей отрицательной величины. В данном исследовании –12,69 МВт (рис.4). Полученный каскад тепловых потоков представлен на рис.5.

Из построенного каскада можно сделать вывод, что в данном случае отсутствуют отрицательные тепловые потоки. Это говорит о возможности передачи теплоты от одного температурного интервала к другому. При этом на температурном интервале 322-356 °C тепловой поток равен нулю. Опираясь на полученные значения, можно заключить, что целевые энергетические значения для горячих и холодных утилит равны $Q_{H\min} = 12,6$ и $Q_{C\min} = 4,39$ МВт соответственно. Данные равны значениям, которые получены при построении составных кривых технологических потоков на TH -диаграмме (см. рис.3, б). Температура пинча составляет 322 °C – это и есть пинч-точка, при которой тепловой поток на границе интервалов равен нулю. Реальные значения горячих холодных потоков в точке пинча равны $T_{\text{пинч}}^{\text{гор}} = 328$ и $T_{\text{пинч}}^{\text{хол}} = 316$ °C соответственно. Значения согласуются с данными, полученными при построении составных кривых горячих и холодных потоков.

Таким образом, алгоритм теплового каскада позволяет упростить расчет целевых энергетических значений внешних энергоносителей и определить локализацию пинч-точки. Построение составных кривых технологических потоков позволяет наглядно представить взаимосвязь горячих

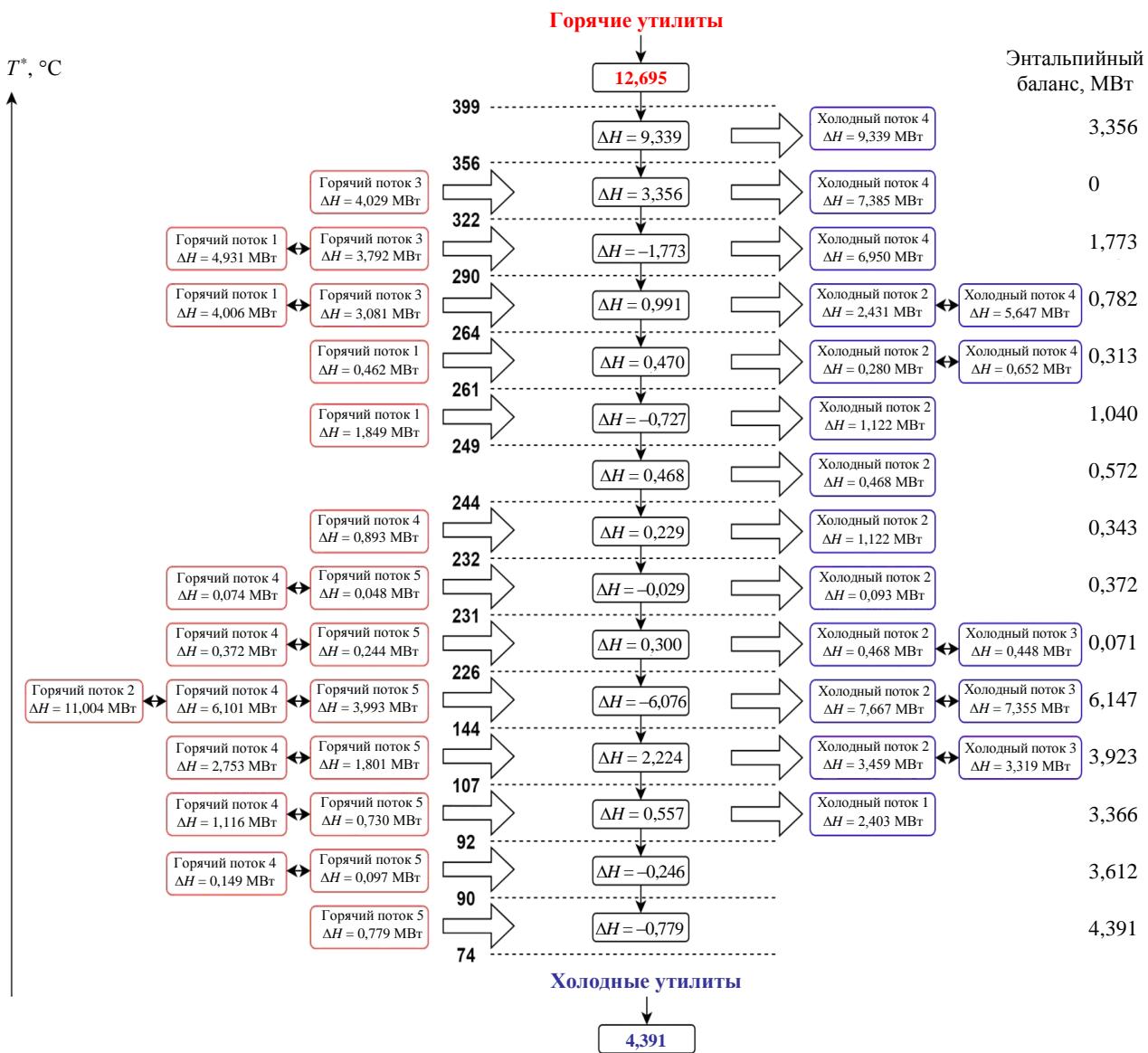


Рис.5. Тепловой каскад системы теплообмена установки перегонки мазута

$T_{\text{пинч}}^* = 322^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{пинч}}^{\text{гор}} = 328^{\circ}\text{C}$ для горячих потоков; $T_{\text{пинч}}^{\text{хол}} = 326^{\circ}\text{C}$ для холодных потоков

и холодных потоков теплообменной системы, т.е. это необходимо для «концептуального понимания процесса». Затем анализируется система теплообмена с помощью третьего инструмента пинч-анализа – большой составной кривой. Данный анализ позволит оптимизировать работу печи, которая является внешним горячим источником.

Большая составная кривая строится на основе теплового каскада, получаемого ранее. Она представляет собой кривую на плоскости сдвинутых температур на $\Delta T_{\min}/2$ и энталпии. На оси абсцисс проставляют значение недостатка тепловой энергии данного температурного интервала (рис.6). Коэффициент полезного действия печи до оптимизации составлял 80 %. Для анализа печи вместе с большой составной кривой строится график изменения температур дымовых газов печи, который представляет собой наклонную прямую. Первая точка – температура горения ($T_{\text{1печ}} = 2000^{\circ}\text{C}$), вторая – температура уходящих газов.

В установке для разных теплообменников – разное значение ΔT_{\min} . Для потоков системы теплообмена объекта исследования сдвиг температурных интервалов определен и равен 6°C . Для дымовых газов печи сдвиг будет равен 25°C . Тогда на рекуперативных теплообменниках потоков $\Delta T_{\min} = 12^{\circ}\text{C}$, а на теплообменных аппаратах, передающих тепло от дымовых газов к технологическим потокам, $\Delta T_{\min} = 6 + 25 = 31^{\circ}\text{C}$.

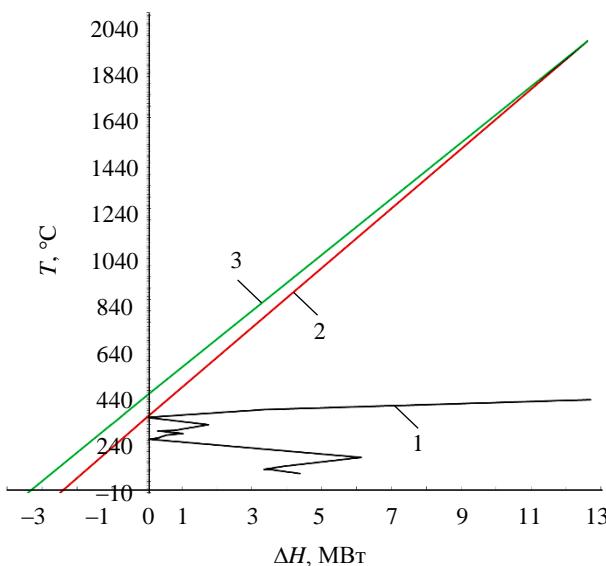


Рис.6. Большая составная кривая и профили дымовых газов печи

1 – большая составная кривая; 2 – дымовые газы № 1
 $CP = 0,0076 \text{ MBt/}^{\circ}\text{C}$; 3 – дымовые газы № 2 $CP = 0,008 \text{ MBt/}^{\circ}\text{C}$

$322 + 25 = 347^{\circ}\text{C}$, она выше кислотной точки росы, т.е. исключается возможность образования серной кислоты, которая негативно влияет на конструкционные материалы. Минимальные внешние горячие энергоносители, необходимые системе теплообмена, равны $Q_{\min} = 12,6 \text{ MBt}$. Определим оптимальную потоковую теплоемкость дымовых газов, используя формулу

$$CP_{\text{дым.газов}} = \frac{Q_{H\min}}{T_2 - T_1} = \frac{12,69}{1975 - 322} = 0,0076 \text{ MBt/}^{\circ}\text{C}. \quad (3)$$

В идеальном случае энергия, отданная топливом $Q_{\text{топлива}}$, равна энергии, которую дымовые газы отдали при охлаждении от теоретической температуры горения до температуры окружающей среды. Следовательно, применяется формула

$$Q_{\text{топлива}} = CP_{\text{дым.газов}} \Delta T = 0,0076(2000 - 15) = 15 \text{ MBt}. \quad (4)$$

Эффективность печи определяется формулой

$$\eta_{\text{печи}} = \frac{Q_{H\min}}{Q_{\text{топлива}}} \cdot 100 \% = \frac{12,69}{15} \cdot 100 \% = 84 \%. \quad (5)$$

Обсуждение результатов. Повышение энергоэффективности нефтеперерабатывающего предприятия важная и сложная задача. Пинч-анализ позволяет проанализировать и оптимизировать большое количество тепловых потоков. Анализ и повышение энергоэффективности объектов исследования проводились энталпийным пинч-анализом.

Предложены меры по оптимизации:

- Изменить конечную температуру горячего потока 2 с 176 до 150 °C, горячего потока 4 с 150 до 96 °C, горячего потока 5 с 175 до 80 °C. Таким образом, увеличивается энталпия горячих потоков, и уменьшаются затраты на их охлаждение.
- После параметрической оптимизации определены значения максимальной рекуперации тепла, минимальные значения внешних энергоносителей. В дальнейших исследованиях будет проведена структурная оптимизация системы теплообмена пинч-анализом.
- Эффективность печи подогрева нефти можно увеличить за счет уменьшения потерь тепла с уходящими газами.



В технической характеристике печи указано, что температура уходящих газов до оптимизации составляет 400 °С. Фактическая потоковая теплоемкость дымовых газов для нагрева холодных потоков 12,6 МВт:

$$CP_{\text{дым.газов}} = \frac{12,69}{1975 - 400} = 0,008 \text{ МВт/}^{\circ}\text{C}.$$

Если принять $Q_{\text{топлива}}$ для идеального случая:

$$Q_{\text{топлива}} = 0,008(2000 - 15) = 15,88 \text{ МВт.}$$

Эффективность печи до оптимизации определяется формулой (5):

$$\eta_{\text{печи}} = \frac{12,69}{15,88} \cdot 100 \% = 80 \%.$$

Расчетный КПД при проектных условиях имеет примерно такое же значение. В данном исследовании эффективность печи увеличена на 4 %.

Заключение. Проанализирована существующая система теплообмена блока предварительного нагрева сырья с помощью энталпийного пинч-анализа, определены пути оптимизации. Для снижения тепловой нагрузки на печи подогрева нефти введены дополнительные потоки в систему теплообмена блока подогрева нефти.

Проведен энталпийный пинч-анализ установки вакуумной перегонки мазута и параметрическая оптимизация новой системы теплообмена. Построены составные кривые горячих и холодных потоков на температурно-энталпийной плоскости. Определены минимальные потребности системы теплообмена во внешних энергоносителях.

Построен энталпийный каскад при $\Delta T_{\min} = 12$ °С, который подтверждает правильность определения точки пинча и значения внешних энергоносителей, определенных при параметрической оптимизации.

Проанализирована система теплообмена с помощью большой составной кривой, что позволило оптимизировать работу печи подогрева мазута. Поиск оптимальной потоковой теплоемкости продуктов сгорания печи является важным пунктом в анализе энергоэффективности печи. Определена оптимальная потоковая теплоемкость, при которой потери тепла с уходящими газами минимальны.

Предложены меры для повышения эффективности блока предварительного нагрева мазута за счет доведения рекуперации тепла до максимума, а затраты на внешние энергоносители минимизированы. С помощью уменьшения потерь тепла с уходящими газами удалось увеличить КПД печи с 80 до 84 %. Результаты исследования могут быть использованы для повышения энергоэффективности как существующих объектов нефтеперерабатывающей промышленности, так и проектируемых.

Авторы выражают благодарность Д.Д.Тупикову за помощь в сборе информации по объекту исследования и Ю.В.Борисовой за информационную поддержку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rudko V.A., Derkunskii I.O., Gabdulkhakov R.R. et al. Kinetics of various hydrocarbon groups formation in distillates obtained during the production of needle coke via the delayed coking of decantoil // Egyptian Journal of Petroleum. 2022. Vol. 31. Iss. 1. P. 33-38. DOI: [10.1016/j.ejpe.2022.02.002](https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2022.02.002)
2. König W., Löbbecke S., Büttner S., Schneider C. Establishing Energy Efficiency–Drivers for Energy Efficiency in German Manufacturing Small- and Medium-Sized Enterprises // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 19. № 5144. DOI: [10.3390/en13195144](https://doi.org/10.3390/en13195144)
3. Muraveinikov S.S., Sulin A.B., Baranov I.V., Nikitin A.A. Average annual efficiency evaluation in the design of life support systems // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141. Iss. 1. № 030019. DOI: [10.1063/1.5122069](https://doi.org/10.1063/1.5122069)

4. *Xinxiao Chen, Paprrouschi A., Elveny M. et al.* A laboratory approach to enhance oil recovery factor in a low permeable reservoir by active carbonated water injection // *Energy Reports.* 2021. Vol. 7. P. 3149-3155. DOI: [10.1016/j.egyr.2021.05.043](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.05.043)
5. *Pyagai I., Zubkova O., Babykin R. et al.* Influence of Impurities on the Process of Obtaining Calcium Carbonate during the Processing of Phosphogypsum // *Materials.* 2022. Vol. 15. Iss. 12. № 4335. DOI: [10.3390/ma15124335](https://doi.org/10.3390/ma15124335)
6. *Tsvetkov O.B., Laptev Yu.A., Nikitin A.A. et al.* Energy and environment options of working fluid alternative for different refrigeration configurations // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020. Vol. 826. № 012017. DOI: [10.1088/1757-899X/826/1/012017](https://doi.org/10.1088/1757-899X/826/1/012017)
7. *Kondrasheva N.K., Eremeeva A.M., Nelkenbaum K.S. et al.* Development of environmentally friendly diesel fuel // *Petroleum Science and Technology.* 2019. Vol. 37. Iss. 12. P. 1478-1484. DOI: [10.1080/10916466.2019.1594285](https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1594285)
8. *Tsvetkov P.* Climate Policy Imbalance in the Energy Sector: Time to Focus on the Value of CO₂ Utilization // *Energies.* 2021. Vol. 14. Iss. 2. № 411. DOI: [10.3390/en14020411](https://doi.org/10.3390/en14020411)
9. *Kopteva A., Kalimullin L., Tsvetkov P., Soares A.* Prospects and Obstacles for Green Hydrogen Production in Russia // *Energies.* 2021. Vol. 14. Iss. 3. № 718. DOI: [10.3390/en14030718](https://doi.org/10.3390/en14030718)
10. *Malarev V., Kopteva A., Koptev V., Gotsul Yu.* Improvement of Efficiency of Steam-Thermal Treatment of High-Viscous Oil Formations Using Downhole Electric Steam Generators // *Journal of Ecological Engineering.* 2021. Vol. 22. Iss. 2. P. 17-24. DOI: [10.12911/22998993/130630](https://doi.org/10.12911/22998993/130630)
11. *Morenov V., Leusheva E., Buslaev G., Gudmestad O.T.* System of Comprehensive Energy-Efficient Utilization of Associated Petroleum Gas with Reduced Carbon Footprint in the Field Conditions // *Energies.* 2020. Vol. 13. Iss. 18. № 4921. DOI: [10.3390/en13184921](https://doi.org/10.3390/en13184921)
12. *Жуковский Ю.Л., Королев Н.А., Малькова Я.М.* Мониторинг состояния измельчения в барабанных мельницах по результирующему моменту на валу // *Записки Горного института.* 2022. Т. 256. С. 686-700. DOI: [10.31897/PMI.2022.91](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.91)
13. *Shabalov M.Yu., Zhukovskiy Yu.L., Buldysko A.D. et al.* The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector // *Energy Reports.* 2021. Vol. 7. P. 2664-2680. DOI: [10.1016/j.egyr.2021.05.001](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.05.001)
14. *Rogachev M.K., Nguyen Van T., Aleksandrov A.N.* Technology for Preventing the Wax Deposit Formation in Gas-Lift Wells at Offshore Oil and Gas Fields in Vietnam // *Energies.* 2021. Vol. 14. Iss. 16. № 5016. DOI: [10.3390/en14165016](https://doi.org/10.3390/en14165016)
15. *Resniova E., Ponomarenko T.* Sustainable Development of the Energy Sector in a Country Deficient in Mineral Resources: The Case of the Republic of Moldova // *Sustainability.* 2021. Vol. 13. Iss. 6. № 3261. DOI: [10.3390/su13063261](https://doi.org/10.3390/su13063261)
16. *Kumar R.* A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4-E) analysis of thermal power plants // *Engineering Science and Technology, an International Journal.* 2017. Vol. 20. Iss. 1. P. 283-292. DOI: [10.1016/j.jestch.2016.08.018](https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.08.018)
17. *Sciubba E.* Exergy-based ecological indicators: From Thermo-Economics to cumulative exergy consumption to Thermo-Ecological Cost and Extended Exergy Accounting // *Energy.* 2019. Vol. 168. P. 462-476. DOI: [10.1016/j.energy.2018.11.101](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.101)
18. *Aghbashlo M., Tabatabaei M., Hosseinpour S.* On the exergoeconomic and exergoenvironmental evaluation and optimization of biodiesel synthesis from waste cooking oil (WCO) using a low power, high frequency ultrasonic reactor // *Energy Conversion and Management.* 2018. Vol. 164. P. 385-398. DOI: [10.1016/j.enconman.2018.02.086](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.086)
19. *Nami H., Mahmoudi S.M.S., Nemati A.* Exergy, economic and environmental impact assessment and optimization of a novel cogeneration system including a gas turbine, a supercritical CO₂ and an organic Rankine cycle (GT-HRSG/SCO₂) // *Applied Thermal Engineering.* 2017. Vol. 110. P. 1315-1330. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2016.08.197](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.197)
20. *Кондрашева Н.К., Рудко В.А., Назаренко М.Ю., Габдулхаков Р.Р.* Влияние параметров процесса замедленного коксования асфальта на выход и качество жидких и твердофазных продуктов // *Записки Горного института.* 2020. Т. 241. С. 97-104. DOI: [10.31897/PMI.2020.1.97](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.97)
21. *Hon Huin Chin, Varbanov P.S., Fengqi You et al.* Plastic Circular Economy Framework using Hybrid Machine Learning and Pinch Analysis // *Resources, Conservation and Recycling.* 2022. Vol. 184. № 106387. DOI: [10.1016/j.resconrec.2022.106387](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106387)
22. *Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л. и др.* Основы интеграции тепловых процессов. Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. 458 с.
23. *Ibrahim D., Jobson M., Jie Li, Guillén-Gosálbez G.* Optimal design of flexible heat-integrated crude oil distillation units using surrogate models // *Chemical Engineering Research and Design.* 2021. Vol. 165. P. 280-297. DOI: [10.1016/j.cherd.2020.09.014](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.09.014)
24. *Ndunagu P.U., Alaike E.E., Megueptchie T.* A Practical Approach to Energy Optimization Using Pinch Analysis: A Case Study of an Oil Refinery // *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 2-4 August 2021, Lagos, Nigeria.* OnePetro, 2021. № SPE-207096-MS. DOI: [10.2118/207096-MS](https://doi.org/10.2118/207096-MS)
25. *Yong Zheng.* Optimization of Chenzhuang Combined Station through Pinch Analysis // *Journal of Physics: Conference Series.* 2023. Vol. 2442. № 012036. DOI: [10.1088/1742-6596/2442/1/012036](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2442/1/012036)
26. *Bayomie O.S., Abdelaziz O.Y., Gadalla M.A.* Exceeding Pinch limits by process configuration of an existing modern crude oil distillation unit – A case study from refining industry // *Journal of Cleaner Production.* 2019. Vol. 231. P. 1050-1058. DOI: [10.1016/j.jclepro.2019.05.041](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.041)
27. *Kunru Yang, Shirun Liu, Chang He et al.* Improving energy saving of crude oil distillation units with optimal operations // *Journal of Cleaner Production.* 2020. Vol. 263. № 121340. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.121340](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121340)
28. *Gadalla M.A.* A new graphical method for Pinch Analysis applications: Heat exchanger network retrofit and energy integration // *Energy.* 2015. Vol. 81. P. 159-174. DOI: [10.1016/j.energy.2014.12.011](https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.011)
29. *Alhajri I.H., Gadalla M.A., Abdelaziz O.Y., Ashour F.H.* Retrofit of heat exchanger networks by graphical Pinch Analysis – A case study of a crude oil refinery in Kuwait // *Case Studies in Thermal Engineering.* 2021. Vol. 26. № 101030. DOI: [10.1016/j.csite.2021.101030](https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101030)
30. *Dianliang Fu, Zeting Yu, Yanhua Lai.* Linking pinch analysis and shifted temperature driving force plot for analysis and retrofit of heat exchanger network // *Journal of Cleaner Production.* 2021. Vol. 315. № 128235. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.128235](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128235)
31. *Mrayed S., Bin Shams M., Al-Khayyat M., Alnoaimi N.* Application of pinch analysis to improve the heat integration efficiency in a crude distillation unit // *Cleaner Engineering and Technology.* 2021. Vol. 4. № 100168. DOI: [10.1016/j.clet.2021.100168](https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100168)



32. Konur O., Saatcioglu O.Y., Korkmaz S.A. et al. Heat exchanger network design of an organic Rankine cycle integrated waste heat recovery system of a marine vessel using pinch point analysis // International Journal of Energy Research. 2020. Vol. 44. Iss. 15. P. 12312-12328. DOI: 10.1002/er.5212
33. Qi Zhang, Jin Xu, Xiaoyu Zhao, Yujie Wang. Energy and exergy analyses of an integrated iron and steel making process // International Journal of Exergy. 2018. Vol. 26. № 4. P. 454-480. DOI: 10.1504/IJEX.2018.093190
34. Goodarzvand-Chegini F., GhasemiKaffrudi E. Application of exergy analysis to improve the heat integration efficiency in a hydrocracking process // Energy & Environment. 2017. Vol. 28. Iss. 5-6. P. 564-579. DOI: 10.1177/0958305X17715767
35. Лебедев В.А., Юшкова Е.А. Эксергетический пинч-анализ всех элементов котельного агрегата и котельного агрегата в целом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 8. С. 92-98. DOI: 10.18799/24131830/2020/8/2771

Авторы: Е.А.Юшкова, канд. техн. наук, ассистент, atenoks@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8492-0159> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), В.А.Лебедев, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0003-0956-5772> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Система беспроводного заряда аккумуляторов для рудничного электровоза

В.М.ЗАВЬЯЛОВ¹, И.Ю.СЕМЫКИНА²✉, Е.А.ДУБКОВ¹, А.С.ВЕЛИЛЯЕВ¹¹ Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия

Как цитировать эту статью: Завьялов В.М., Семыкина И.Ю., Дубков Е.А., Велилиев А.С. Система беспроводного заряда аккумуляторов для рудничного электровоза // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 428-442. EDN JSNTAQ

Аннотация. Развитие электротранспорта обладает высоким потенциалом энергосбережения: энергосберегающее управление движением способно снизить объем потребляемых ресурсов, а интеграция с сетью электроснабжения обеспечивает возможность выравнивания суточных графиков нагрузки. Это справедливо для предприятий подземной добычи полезных ископаемых. Ключевым звеном интеграции электротранспорта с сетью является зарядная инфраструктура с перспективой разработки систем беспроводного заряда. Внедрение таких систем в подземных условиях сопряжено с вопросами энергетической эффективности и обеспечения взрывобезопасности. Рассматривается разработка системы беспроводного заряда на примере рудничного электровоза марки А-5,5-600-У5. Схемные и конструктивные решения сформированы с использованием метода анализа иерархий по результатам сопоставления существующих технических решений для отдельных узлов системы по критериям энергоэффективности и безопасности. Разработана комплексная компьютерная модель, позволяющая проводить исследование переходных процессов в электрической схеме системы беспроводного заряда и в трехмерной постановке определять параметры высокочастотного магнитного поля в пространстве передающей и приемной катушек. Предложен подход к оценке опасности воспламенения рудничной атмосферы на основе анализа индукции высокочастотного магнитного поля в области электромагнитного взаимодействия между катушками системы беспроводного заряда. Подход с использованием комплексной компьютерной модели применен к разработанной системе. Исследование показало, что система беспроводного заряда для рудничного электровоза в условиях предприятия подземной добычи полезных ископаемых, опасных по газу и пыли, технически реализуема и существуют конструктивные решения, при которых она взрывобезопасна.

Ключевые слова: рудничный электровоз; система беспроводного заряда аккумуляторов; метод анализа иерархий; эффективность; взрывобезопасность; комплексная компьютерная модель; индукция магнитного поля

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-03-2021-138/3.

Поступила: 14.03.2023

Принята: 20.06.2023

Онлайн: 19.07.2023

Опубликована: 19.07.2023

Введение. Энергосбережение и снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду являются одним из актуальных мировых направлений развития науки и техники [1]. Это направление объединяет исследования в области электротранспорта, развитие которого обладает значительным потенциалом энергосбережения. Например, в КНР, где парк электромобилей составляет более 50 % от мирового [2], замещение электротранспортом автомобилей с двигателями внутреннего сгорания способно сэкономить потребление ископаемого топлива на 50-60 % [3], что в абсолютном выражении оценивается в 40,99 млн т условного топлива к 2025 г. [4].

Заметную позицию в этой области занимает концепция интеграции электромобилей в сеть электроснабжения V2G (от англ. vehicle-to-grid), которая позволяет снижать пиковый спрос на электроэнергию и корректировать профиль потребления в сети [5, 6]. Концепция V2G предусматривает множество составляющих, обеспечивающих энергосбережение, например системы управления движением электромобиля [7], системы мониторинга автомобильных аккумуляторов [8], сложную зарядную инфраструктуру и др. [9]. Зарядная инфраструктура является ключевым звеном интеграции электромобилей в сеть электроснабжения и может быть реализована с использованием проводных и беспроводных технологий [10].



По сравнению с проводными системы беспроводного заряда, кроме влияния на энергоэффективность, способствуют повышению автономности электротранспорта, так как не требуют участия человека в процессе заряда аккумуляторов [11]. Это преимущество позволяет рассмотреть возможности внедрения систем беспроводного заряда для промышленного электротранспорта, функционирующего в условиях повышенной опасности для персонала. Подобной отраслью промышленности является подземная добыча полезных ископаемых, для которой активно ведется разработка безлюдных технологий. В работе [12] описан опыт внедрения безлюдных технологий на подземном руднике в КНР, где для транспортировки полезных ископаемых использовались дизельные погрузчики, хотя в настоящее время в подземной добыче зафиксирован переход от дизельного транспорта к электрическим аккумуляторным аналогам [13]. Система беспроводного заряда для этих задач является перспективным решением.

В России на предприятиях подземной добычи полезных ископаемых распространенным видом аккумуляторного электротранспорта является электровозная откатка. Системы беспроводного заряда для рудничных электровозов способны снизить эксплуатационные затраты и длительность процедуры заряда аккумуляторов, поскольку снимают предписанную требованиями безопасности необходимость отключать аккумулятор и переносить его для заряда на поверхность в специально оборудованное помещение [14]. Совмещение процедуры заряда аккумуляторов с технологическими операциями погрузки и разгрузки рудничных электровозов обеспечивает стабильно высокий уровень заряда аккумуляторов, в результате чего такие системы облегчают работу систем автоматического управления тяговых электроприводов. Это позволяет точно формировать требуемое тяговое усилие, которое может существенно варьироваться в зависимости от профиля пути, коэффициента сцепления с рельсами и других факторов [15].

Важной особенностью применения систем беспроводного заряда для аккумуляторов рудничных электровозов являются условия их эксплуатации, поскольку значительная часть предприятий подземной добычи полезных ископаемых в России являются опасными по газу и пыли. Исследования [16, 17] посвящены оценке факторов, влияющих на повышенный риск перегрева элементов системы беспроводного заряда. Разработка такого устройства для рудничного электровоза должна предусматривать оценку взрывобезопасности. Задачей исследования является научное обоснование технических решений системы беспроводного заряда аккумуляторов рудничного электровоза, обеспечивающих одновременно высокую энергетическую эффективность и взрывобезопасность системы.

Методы. *Принцип работы систем беспроводного заряда и его основные компоненты.* Работа систем беспроводного заряда (рис.1, а) строится на принципе индуктивной и магнитно-резонансной связи между стационарно размещаемой передающей катушкой и подвижной приемной катушкой, устанавливаемой на рудничном электровозе (рис.1, б) [18, 19]. Передающая и приемная катушки входят в индуктивно-емкостную компенсационную цепь резонансного контура, на который подается напряжение с помощью специального высокочастотного инвертора. Создаваемое передающей катушкой высокочастотное магнитное поле наводит напряжение в приемной катушке, которое через силовой преобразователь постоянного тока передается в цепь заряда аккумулятора. Когда система работает в резонансном режиме, беспроводная передача энергии осуществляется с высокой эффективностью. Системы беспроводного заряда в диапазоне мощностей 5-100 кВт работают при расстоянии между катушками от 50 до 200 мм и имеют КПД выше 90 % [20]. Энергетическая эффективность системы беспроводного заряда определяется в большей степени схемотехническими решениями, а взрывобезопасность зависит преимущественно от конструктивных решений.

На рудничном электровозе все элементы приемной цепи, кроме приемной катушки, размещаются в аккумуляторном отсеке, а элементы передающей цепи – в специальном шкафу. Это позволяет обеспечить взрывозащиту вида «взрывонепроницаемая оболочка» для всех элементов системы, кроме катушек, для которых подобное размещение будет выступать экраном, препятствующим беспроводной передаче энергии [21]. Катушки в целях взрывозащиты могут быть заизолированы или залиты компаундом, однако область электромагнитного взаимодействия между ними будет располагаться непосредственно в атмосфере предприятия подземной добычи полезных ископаемых, а следовательно, анализу подлежит влияние электромагнитного поля на взрывобезопасность.

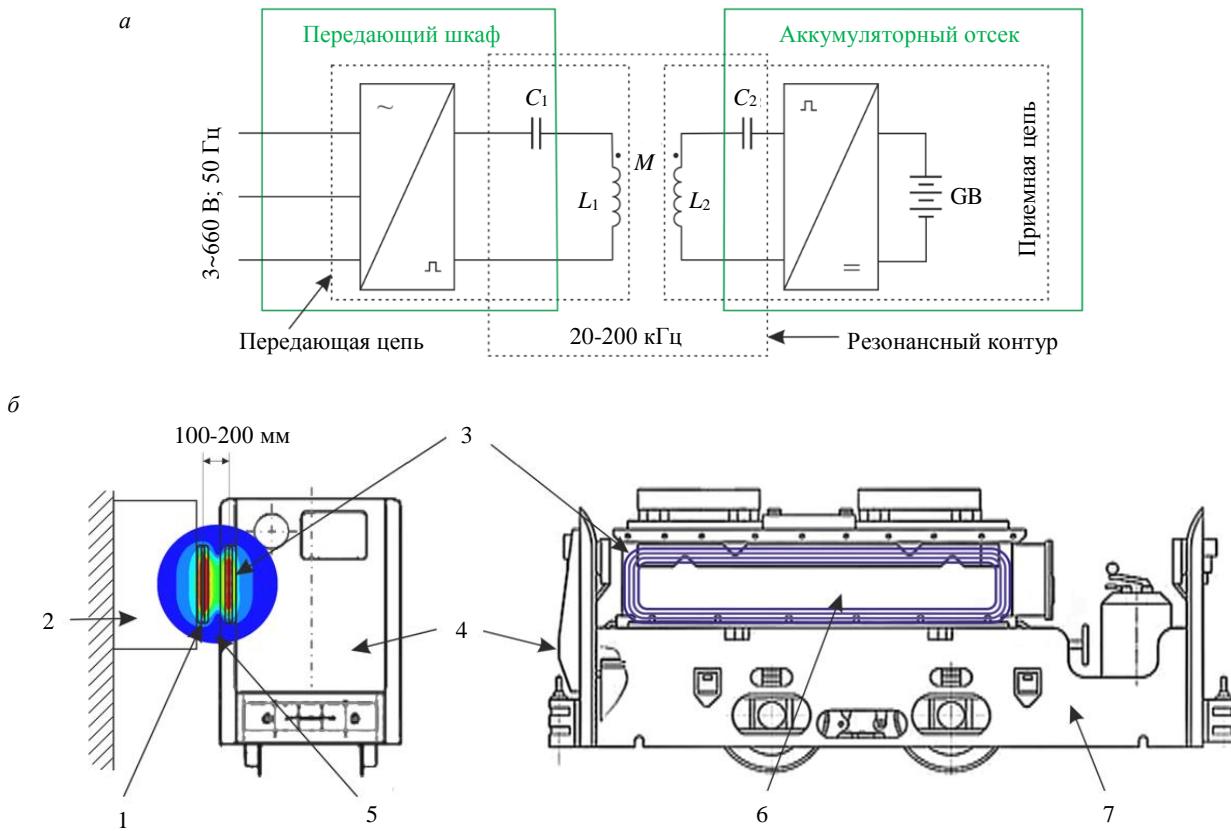


Рис.1. Система беспроводного заряда на примере рудничного электровоза марки А-5,5-600-У5:
 а – структурная схема; б – возможное конструктивное исполнение

1 – передающая катушка; 2 – передающий шкаф; 3 – приемная катушка; 4 – электровоз;
 5 – область электромагнитного взаимодействия; 6 – аккумуляторный отсек; 7 – рама

Обоснование схемотехнического решения. Анализ схемотехнических решений для системы беспроводного заряда может быть выполнен с использованием метода анализа иерархий [22]. Предполагается для каждого из возможных решений выполнить парные сравнения относительно критериев оценки, которым решение должно удовлетворять, после чего определить локальные приоритеты решений относительно каждого критерия и глобальные приоритеты, определяющие итоговое схемотехническое решение.

Рассматриваемые критерии оценки: температура поверхности оборудования К1; энергия электромагнитного излучения К2; передаваемая мощность К3; КПД К4 [23]. В качестве возможных решений рассматривается двухуровневая иерархия, описывающая основные элементы системы беспроводного заряда (табл.1).

Таблица 1
 Иерархия решений

Первый уровень		Второй уровень	
Номер	Элемент системы беспроводного заряда	Номер	Наименование решения
R1	Высокочастотный инвертор	R1.1	Матричные
		R1.2	Источник тока
		R1.3	Источник напряжения
R2	Силовой преобразователь постоянного тока	R2.1	Пассивный
		R2.2	Активный
		R2.3	Синхронный
R3	Компенсационная цепь	R3.1	Последовательная
		R3.2	Параллельная
		R3.3	Гибридная
R4	Катушки	R4.1	Круглые
		R4.2	Прямоугольные
		R4.3	Поляризованные



Для высокочастотных инверторов R1 существует высокая вариативность схемных решений [24, 25]. Они разделяются на преобразователи с одноступенчатым и двухступенчатым преобразованием энергии. Первые построены по принципу матричных преобразователей R1.1 и из-за отсутствия промежуточного звена постоянного тока обладают меньшими габаритами и большим суммарным КПД, поэтому в приемной цепи, а следовательно, и в цепи питания аккумуляторных батарей появляются гармоники двукратной частоты сети. Двухступенчатые преобразователи, несмотря на проигрыш по массе габаритным характеристикам, гораздо больше распространены, поскольку такое схемотехническое решение применяется в широком спектре электротехнических приложений, хорошо отлажено, имеет высокий потенциал оптимизации набора компонентов и их параметров, что может нивелировать разницу в КПД.

По принципу действия двухступенчатые преобразователи могут работать в режиме источника тока R1.2 и напряжения R1.3. Инверторы, работающие в режиме источника тока, как правило, применяются для резонансного контура с параллельным подключением конденсаторов компенсационной цепи для смягчения токовой нагрузки и перенапряжений, а также улучшения гармонического состава тока в передающей катушке. По сравнению с другими типами инверторов они отличаются меньшей токовой нагрузкой на все элементы силовых преобразователей, что обуславливает меньшие потери в полупроводниковых ключах. Этот эффект достигается за счет применения мощной катушки индуктивности, обладающей высокими габаритами, поэтому такие инверторы проигрывают по массогабаритным показателям инверторам, работающим в режиме источника напряжения.

Силовой преобразователь постоянного тока R2 в цепи заряда аккумулятора представляет собой пассивный R2.1 или активный R2.2 выпрямитель либо синхронный преобразователь постоянного тока R2.3. Пассивный выпрямитель построен на мостовых диодных схемах, наиболее распространен из-за простоты и минимальных габаритов, однако из-за нелинейности при значительном изменении тока нагрузки провоцирует существенное снижение коэффициента связи катушек [26]. Активный выпрямитель предусматривает замену диодов транзисторами и за счет регулируемого фазового сдвига обеспечивает согласование полных сопротивлений, однако требует относительно сложной системы управления [27, 28]. Альтернативой активному выпрямителю, обеспечивающей согласование полных сопротивлений, является синхронный преобразователь постоянного тока, состоящий из диодного моста и повышающего преобразователя [29]. Активный выпрямитель и синхронный преобразователь не работают в разомкнутых схемах.

Компенсационная цепь R3 резонансного контура различается топологией размещения индуктивностей и емкостей относительно передающей и приемной катушек и базово разделяется на последовательную R3.1 и параллельную R3.2 [30, 31]. Последовательная топология обычно используется совместно с источниками напряжения, имеет больший коэффициент передачи по мощности и меньшую чувствительность к изменению взаимной индукции между передающей и приемной катушками [32]. Параллельная топология, как правило, используется с источниками тока и требует применения дополнительной последовательной катушки индуктивности, что усложняет систему. Эта топология обеспечивает большее полное сопротивление и легче управляется.

Кроме последовательной и параллельной, существуют гибридные топологии R3.3, предполагающие размещение параллельной компенсирующей емкости в передающей цепи и последовательной в приемной цепи либо использование одновременно нескольких компенсационных индуктивностей и емкостей в разных вариациях подключения. Они применяются для снижения чувствительности к отклонениям взаимного расположения передающей и приемной катушек [33], переключения режима заряда аккумуляторов с постоянным током и с постоянным напряжением [34], снижения чувствительности к изменениям нагрузки [35] и других специфических задач.

Приемная и передающая катушки R4 могут иметь различные конструктивные исполнения [36, 37], которые разделяются на неполяризованные (круглые R4.1 и прямоугольные R4.2) и на поляризованные R4.3 (соленоидные, плоские биполярные, конструкции double D и др.). Круглые обеспечивают наиболее высокий коэффициент связи и КПД для сопоставимой активной массы и площади катушки. Прямоугольные несколько уступают, но работают лучше, чем поляризованные, в отношении полей рассеяния в вертикальном и поперечном направлениях. Поляризованные более устойчивы к отклонениям взаимного расположения катушек по сравнению с круглыми и прямоугольными.

Поскольку оценка иерархии решений в количественном выражении затруднительна, для со-ставления матрицы парных сравнений (МПС) будет использоваться 17-значная шкала Саати*. При анализе, помимо характеристик отдельных решений, учитываются ограничения, накладывае-мые конструктивным исполнением. Например, если сравниваемые решения отличаются габари-тами, с учетом ограниченного объема взрывонепроницаемой оболочки для более крупной альтер-нативы потребуется снизить мощность элементов. Составим МПС для локальных приоритетов ре-шений первого уровня R1-R4 по критерию K1.

Детально рассмотрены высокочастотные инверторы R1 относительно температуры поверхно-сти оборудования K1. Поскольку R1.1 имеют меньшие габариты и больший КПД, их греющие по-тери меньше, а значит, температура поверхности оборудования ниже. Решения R1.2 и R1.3 при-няты равнозначными. Таким образом,

$$C_{K1,R1} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{array}{l} | R1.1 \\ | R1.2 \\ | R1.3 \end{array}$$

Аналогично получены МПС для R2-R4 по K1:

$$C_{K1,R2} = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{array}{l} | R2.1 \\ | R2.2 \\ | R2.3 \end{array}; \quad C_{K1,R3} = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \begin{array}{l} | R3.1 \\ | R3.2 \\ | R3.3 \end{array}; \quad C_{K1,R4} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \begin{array}{l} | R4.1 \\ | R4.2 \\ | R4.3 \end{array}.$$

Все полученные МПС высоко согласованы. Индексы согласованности $k_{ICK1R1}-k_{ICK1R4}$, отношения согласованности $k_{OCK1R1}-k_{OCK1R4}$ для МПС составляют:

$$k_{ICK1R1} = 0 \leq 0,1; \quad k_{ICK1R2} = 0 \leq 0,1; \quad k_{ICK1R3} = 0,08 \leq 0,1; \quad k_{ICK1R4} = 0 \leq 0,1;$$

$$k_{OCK1R1} = 0 \leq 0,2; \quad k_{OCK1R2} = 0 \leq 0,2; \quad k_{OCK1R3} = 0,14 \leq 0,2; \quad k_{OCK1R4} = 0 \leq 0,2,$$

что свидетельствует о корректности вынесенной оценки.

Общее решение R выбирает по одному из элементов второго уровня решений R1-R4, которые могут комбинироваться между собой. Принимая во внимание, что парное сравнение есть отноше-ние весов рассматриваемых решений относительно рассматриваемого критерия, а вес комбинаци-онного решения определяется произведением весов составляющих его решений, МПС общих ре-шений R определяется как произведение Кронекера для МПС решений R1, R2, R3 и R4:

$$C_{K1,R} = C_{K1,R1} \otimes C_{K1,R2} \otimes C_{K1,R3} \otimes C_{K1,R4}.$$

Для наглядности раскроем произведение Кронекера для двух последних сомножителей, де-монстрирующее повышение размерности матриц:

$$C_{K1,R3} \otimes C_{K1,R4} = (C_{K1,R3_{(i,j)}} \quad C_{K1,R4}) = \left(C_{K1,R3_{(i,j)}} \begin{pmatrix} C_{K1,R4_{(1,1)}} & C_{K1,R4_{(1,2)}} & C_{K1,R4_{(1,3)}} \\ C_{K1,R4_{(2,1)}} & C_{K1,R4_{(2,2)}} & C_{K1,R4_{(2,3)}} \\ C_{K1,R4_{(3,1)}} & C_{K1,R4_{(3,2)}} & C_{K1,R4_{(3,3)}} \end{pmatrix} \right),$$

следовательно, $C_{K1,R}$ является матрицей размерности 81×81 .

Следует учитывать, что не каждые решения второго уровня совместимы. Например, высокочастотный инвертор в режиме источника тока R1.2 неэффективно совмещать с последовательной топологией компенсационной цепи R3.1. Это значит, что иерархия не является полной, а следова-тельно, оценка нереализуемых комбинаций и их обратных величин в соответствующем месте должна заменяться на ноль. Далее из полученной МПС вычисляется вектор локальных приорите-тов решений

* Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.



$$V_{K1,R} = \left(V_{K1,R(i)} \right) = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n C_{K1,R(i,j)}}}{\sum_{k=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n C_{K1,R(k,j)}}},$$

где $n = 81$.

Аналогичным образом последовательно по каждому критерию К2-К4 для общих решений R получены МПС $C_{K2,R}$ - $C_{K4,R}$. Далее из МПС вычислены векторы локальных приоритетов решений $V_{K2,R}$ - $V_{K4,R}$. Путем объединения $V_{K1,R}$ - $V_{K4,R}$ получен общий вектор локальных приоритетов решений V_R , из которого определяется вектор глобальных приоритетов:

$$G_R = V_R V_K = (V_{K1,R}, V_{K2,R}, V_{K3,R}, V_{K4,R}) V_K,$$

где V_K принят равным [23]

$$V_K = (0,133; 0,147; 0,125; 0,127)^T.$$

Наилучшим решением будет являться то, для которого значение $G_{R(i)}$ максимально. Полученный результат показывает, что глобальным приоритетом в рассматриваемом случае обладает решение $R_{(56)} = R1.3 \cup R2.1 \cup R3.1 \cup R4.2$, для которого $G_{R(56)} = 0,102$.

Электрическая схема данного решения приведена на рис.2, параметры элементов схемы определялись с учетом параметров литийионного аккумулятора ЛИАБ-70 ТРВ-БК, которым оснащается рудничный электровоз марки А-5,5-600-У5. Аккумулятор имеет номинальное напряжение 130 В и максимальный ток заряда 270 А. Для обеспечения надежности номинальный зарядный ток принят равным 260 А, так как при регулировании возможны кратковременные токовые всплески, таким образом, эквивалентное сопротивление нагрузки R_{load} равно 0,5 Ом.

Параметры передающей и приемной катушек определялись исходя из заданного конструктива (данные П.Л.Калантарова, Л.А.Цейтлина). Катушки имеют одинаковую конструкцию, т.е. индуктивности катушек $L_1 = L_2 = L$ и их внутренние сопротивления $R_1 = R_2 = R$, при этом размеры приемной катушки ограничены внешними габаритами аккумуляторного отсека электровоза 3000×700 мм, а расстояние между катушками принято равным 100 мм, что, с одной стороны, достаточно для гарантированного зазора при движении электровоза, а с другой стороны, позволяет сохранить сильную связь между катушками. Тогда индуктивности передающей и приемной катушек определяются следующим образом:

$$L = \frac{1}{\pi} \mu_0 w^2 (b+c) \left[\ln \frac{2bc}{r} - \frac{c}{b+c} \ln \left(c + \sqrt{b^2 + c^2} \right) - \frac{b}{b+c} \ln \left(b + \sqrt{b^2 + c^2} \right) + \frac{2\sqrt{b^2 + c^2}}{b+c} - \frac{1}{2} + 0,447 \frac{r}{c+b} \right],$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; w – число витков; b и c – длина и ширина катушки по внешней границе; r – ширина шага намотки, который принят равным 15 мм. Взаимная индуктивность рассчитывается как

$$M = w^2 \frac{\mu_0}{\pi} \left[c \ln \left(\frac{c + \sqrt{c^2 + x^2}}{c + \sqrt{c^2 + b^2 + x^2}} \frac{\sqrt{b^2 + x^2}}{x} \right) + b \ln \left(\frac{b + \sqrt{b^2 + x^2}}{b + \sqrt{c^2 + b^2} ex^2} \frac{\sqrt{c^2 + x^2}}{x} \right) + \right. \\ \left. + 2 \left(\sqrt{c^2 + b^2 + x^2} - \left(\sqrt{c^2 + x^2} - \sqrt{b^2 + x^2} + x \right) \right) \right],$$

где x – расстояние между катушками.

Внутренние сопротивления катушек

$$R = w \rho_m \frac{2(b+c) - 2rw}{S},$$

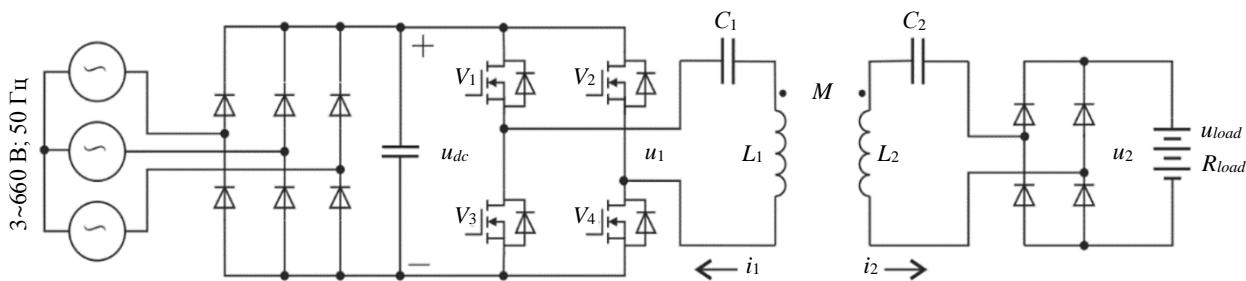


Рис.2. Электрическая схема системы беспроводного заряда

где S – сечение обмоточного провода, в качестве которого выбран высоковольтный высокочастотный провод ЛЭЛОР-Е номинальным сечением 50 мм^2 и максимальным диаметром 15 мм; ρ_m – его удельное сопротивление.

Параметры катушек и нагрузки при заданной резонансной частоте определяют емкость конденсаторов компенсационной цепи, емкости передающей и приемной цепи одинаковы, т.е. $C_1 = C_2 = C$. Определить аналитическое выражение для C затруднительно, поскольку уравнение, описывающее резонансную частоту f_r для системы, показанной на рис.2, имеет высокую размерность. Поэтому емкость C определяется численными методами с помощью специально написанной компьютерной программы. Резонансная частота выбирается согласно рекомендациям стандарта SAE J2954, $f_r = 90 \text{ кГц}$.

Расчетные значения параметров электрической схемы системы беспроводного заряда приведены в табл.2 для разного числа витков передающей и приемной катушек. Расчетное значение КПД получено как возможный максимум на всем диапазоне рабочих частот для системы беспроводного заряда без учета коммутационных и кондуктивных потерь в полупроводниковых ключах, диэлектрических потерь в конденсаторах резонансного контура и используется только для сопоставления энергетической эффективности разных конструктивных вариантов одного устройства. Полученные данные показывают, что наибольшая энергетическая эффективность системы будет обеспечиваться при $w = 1$, такое решение является конструктивно наиболее простым. Следовательно, именно такая конструкция принимается для дальнейшего рассмотрения. Полученное схемотехническое и конструктивное решение является основой для оценки влияния параметров магнитного поля системы беспроводного заряда аккумуляторов на взрывобезопасность в условиях атмосферы, опасной по газу и пыли.

Таблица 2

Расчетные параметры электрической схемы

Число витков w	$L, \text{ мкГн}$	$M, \text{ мкГн}$	$R, \text{ Ом}$	$C, \text{ мкФ}$	КПД	$i_2/u_1, \text{ А/В}$
1	16,6	2,7	0,003	0,162	0,994	от 0,606 до 2
2	43,7	10,5	0,006	0,058	0,988	от 0,15 до 1,96
3	78,7	23,2	0,009	0,031	0,983	от 0,07 до 1,93

Определение условий безопасной эксплуатации. С учетом размещения во взрывонепроницаемых оболочках всех элементов системы беспроводного заряда, за исключением передающей и приемной катушек, единственным источником опасности, способным воспламенить взрывобезопасную среду, является область электромагнитного взаимодействия между катушками. Моделирование температурных полей показывает, что в нормальных условиях высокочастотное переменное магнитное поле не является источником тепла и нагрев атмосферы между катушками происходит в основном в силу законов тепломассопереноса от омических потерь в обмоточных проводах [38, 39]. Однако ситуация принципиально меняется в случае попадания между катушками посторонних металлических предметов, в которых высокочастотное переменное магнитное поле будет наводить вихревые токи. Так как удельная теплоемкость металлов, как правило, низкая, омические потери от протекания вихревых токов могут вызывать значительное повышение температуры.



Для оценки возможности чрезмерного нагрева постороннего металлического предмета прием, что мощность, выделяемая в виде тепла, не может превышать мощности магнитного поля, ограниченного объемом металлического предмета, в котором протекают вихревые токи. Принимая допущения, что высокочастотное переменное магнитное поле в каждой точке пространства изменяется синусоидально с угловой частотой ω , а распределение магнитной индукции по объему постороннего металлического предмета V является равномерным, мощность магнитного поля, преобразовываемая в тепло, будет определяться выражением

$$P_m = \frac{\omega B_{\max}^2 V}{\mu_0 \mu}, \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость среды; B_{\max} – амплитудное значение индукции магнитного поля.

Температура, до которой посторонний металлический предмет будет нагреваться, определяется тепловым равновесием, потенциал теплового поля распределен по объему металлического предмета равномерно, а теплопередача осуществляется за счет естественной конвекции (данные С.С.Кутателадзе, В.М.Боришанского):

$$\tau = \frac{P_m}{\alpha}, \quad (2)$$

где τ – превышение температуры металлического предмета над температурой окружающей среды; α – коэффициент температуропроводности, зависящий от формы и размера нагреваемого предмета, а также произведения числа Прандтля Pr и числа Грасгофа Gr .

Величина τ определяется по ГОСТ 31610.0-2019, в соответствии с ним для оборудования группы I, предназначенного для применения в подземных выработках шахт и наземных строениях, опасных по газу и пыли, максимальная температура поверхности, на которой маловероятно отложение угольной пыли в виде слоя, должна быть не более 450°C , температура окружающей среды принята равной 40°C .

Анализируя выражения (1) и (2), определим предельную величину амплитудного значения магнитной индукции, гарантирующую, что максимальная возможная температура поверхности тела, подвергающегося нагреву вихревыми токами, не будет превышать 450°C :

$$\begin{cases} B_{\max} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \tau}{\omega l^3}} A_1 \sqrt[8]{\frac{\tau}{l^5}} & \text{при } l \leq 2,574 \text{ мм;} \\ B_{\max} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \tau}{\omega l^3}} A_2 \sqrt[4]{\frac{\tau}{l}} & \text{при } 2,574 < l < 88,044 \text{ мм;} \\ B_{\max} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \tau}{\omega l^3}} A_3 \sqrt[3]{\tau} & \text{при } l \geq 88,044 \text{ мм,} \end{cases}$$

где A_1, A_2, A_3 – коэффициенты, зависящие от температуры воздуха; l – длина ребра куба.

Зависимость предельного значения B_{\max} от l для данных условий приведена на рис.3. Учитывая, что расстояние между катушками принято равным 100 мм, длина ребра постороннего металлического предмета кубической формы не может превышать этого значения. Следовательно, амплитудное значение индукции магнитного поля рассматриваемой системы в любой точке пространства, куда может попасть посторонний предмет, не должно превышать 1,929 мТл. Определить,

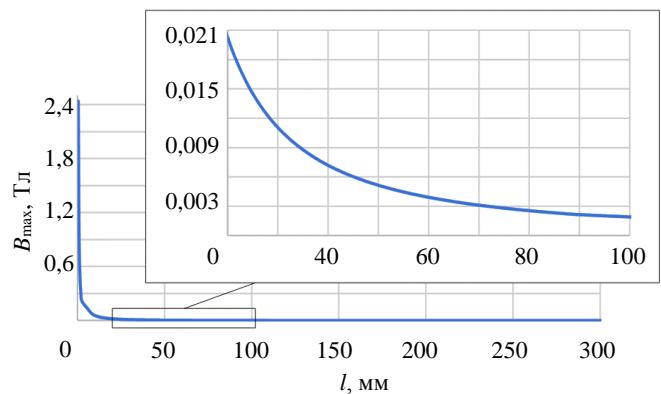


Рис.3. Предельное амплитудное значение магнитной индукции

выполняется ли данное условие для рассматриваемой системы беспроводного заряда, можно с использованием компьютерного моделирования.

Комплексная компьютерная модель. Моделирование системы беспроводного заряда позволяет в трехмерной постановке определять параметры высокочастотного магнитного поля в пространстве передающей и приемной катушек с учетом физических свойств материалов, из которых они состоят, и свойств окружающей среды. Применение конечно-элементных моделей в сочетании с динамической моделью элементов электрической схемы системы беспроводного заряда позволяет описывать переходные процессы, в том числе изменение выделяемой энергии магнитного поля. Такая комплексная модель реализована с использованием пакетов прикладных программ MatLab Simulink и Altair Flux.

Модель системы беспроводного заряда в MatLab Simulink имеет следующие допущения: выпрямительная ступень преобразования энергии в высокочастотном инверторе является идеальной, а напряжение в звене постоянного тока неизменно; полупроводниковые ключи инвертора и выпрямители идеализированы и не описывают коммутационные потери и потери проводимости; конденсаторы компенсационной цепи идеализированы и не описывают диэлектрические потери. Модель выполнена с использованием библиотеки SimPowerSystems, что обеспечивает высокий уровень ее адекватности, поскольку элементы данной библиотеки широко апробированы (рис.4).

Модель передающей и приемной катушек и области их электромагнитного взаимодействия выполнена на базе трехмерного чертежа, представляющего собой два элемента на основе изогнутых цилиндров с поперечным сечением 50 mm^2 , прямоугольных в плане, с размерами $3000 \times 700 \text{ mm}$, размещенных с наложением в плане на расстоянии 100 мм между осями цилиндров. При моделировании использовалась динамическая сетка с автоматическим выбором размера конечных элементов, обеспечивающим на каждом шаге расчета ошибку не более $1 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}$.

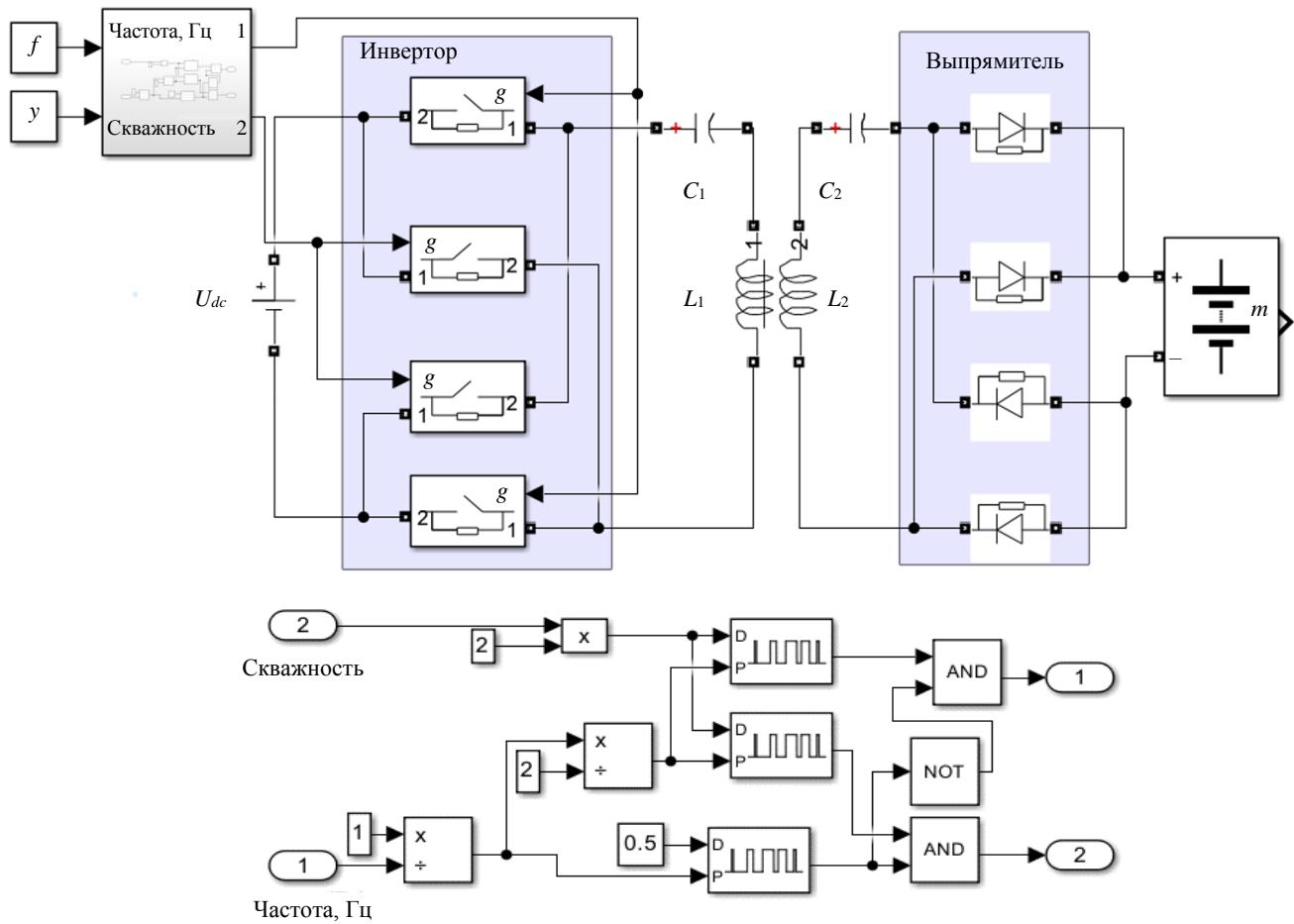


Рис.4. Модель системы беспроводного заряда в MatLab Simulink



Обсуждение результатов. Макетные испытания. Для демонстрации реализуемости системы беспроводного заряда описанной конструкции и подтверждения адекватности компьютерной модели изготовлен макетный образец электровоза в масштабе 1:10, оснащенный системой беспроводного заряда, имеющей следующие параметры: $L_1 = L_2 = 100 \text{ мкГн}$; $M = 10 \text{ мкГн}$; $R_1 = R_2 = 0,01 \text{ Ом}$; $C_1 = C_2 = 33 \text{ нФ}$; $R_{load} = 6 \text{ Ом}$ (рис.5). Высокочастотный инвертор построен на транзисторах марки IRFP90N20DPBF с номинальным напряжением 200 В и током 94 А, а выпрямитель – на диодах Шоттки марки VS-80CPQ150-N3 с номинальным током 40 А и напряжением 150 В. В качестве источника питания использовался источник питания постоянного тока Delta Elektronika SM330-AR-22 мощностью 3300 Вт. В качестве измерительного оборудования при макетных испытаниях использовались тепловизор Fluke TiS20 и осциллограф DS1074Z-S.

Макетные испытания проводились при напряжении источника питания 24 В, частоте на выходе высокочастотного инвертора 91 кГц и скважности импульсов 0,28. В ходе испытаний проводились замеры напряжений на катушках и конденсаторах передающей и приемной цепи u_{L1} , u_{C1} и u_{L2} , u_{C2} соответственно. Те же величины для тех же условий моделировались в MatLab Simulink. Полученные результаты показаны на рис.6.

Термограмма демонстрирует работоспособность системы беспроводного заряда, является косвенным инструментом, показывающим распределение в пространстве электромагнитного поля (рис.6, а). Источником тепла в области электромагнитного взаимодействия является нагрев проводников катушек протекающими по ним токами, причем центральная область катушек имеет существенно меньшую температуру.

Осциллограммы показывают замеры напряжений, где цена деления по шкале напряжения равна 100 В, а по шкале времени – 2 мкс (рис.6, б, г, е). Соответствующие им напряжения, полученные с помощью моделирования, показаны на рис.6, в, д, ж. Сопоставление результатов моделирования и эксперимента свидетельствует, что за исключением микропереходных процессов при коммутации полупроводниковых ключей наблюдается количественное и качественное соответствие рассматриваемых напряжений как по амплитуде, так и по фазе. Максимальное расхождение результатов моделирования и эксперимента составляет 3,28 %, что говорит о высокой адекватности компьютерной модели (см. рис.4). Данный результат является основанием для использования описанной выше комплексной компьютерной модели в целях исследования взрывобезопасности системы беспроводного заряда для рудничного электровоза марки А-5,5-600-У5.

Результаты моделирования. С использованием комплексной компьютерной модели проведено исследование параметров магнитного поля в области электромагнитного взаимодействия системы беспроводного заряда для рудничного электровоза марки А-5,5-600-У5. Исследование проводилось в два этапа. На первом этапе анализировались динамические процессы, определялись параметры тока передающей и приемной цепи, которые на втором этапе использовались как входные данные для моделирования магнитного поля.

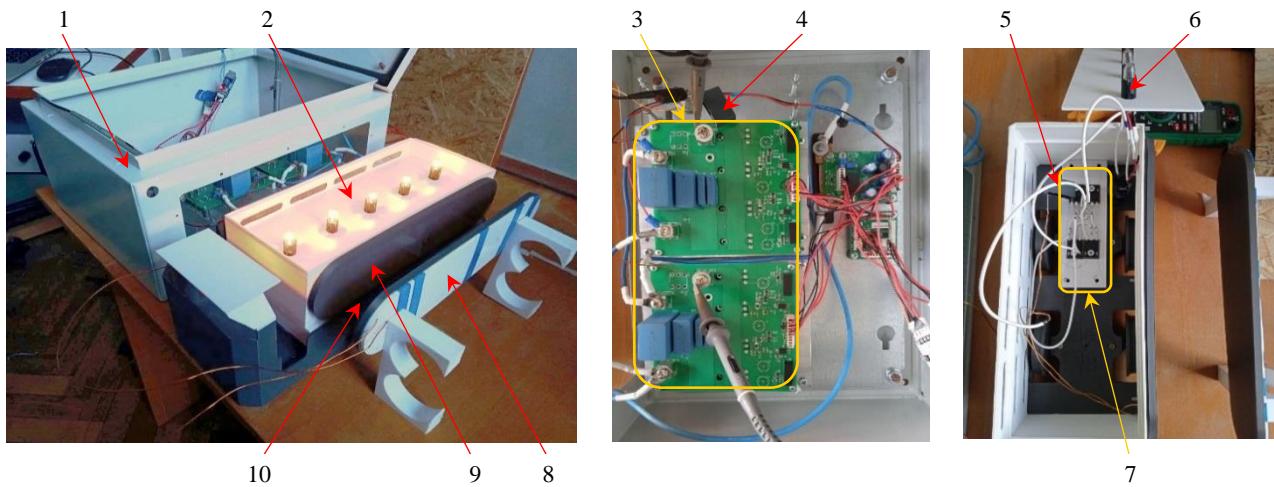
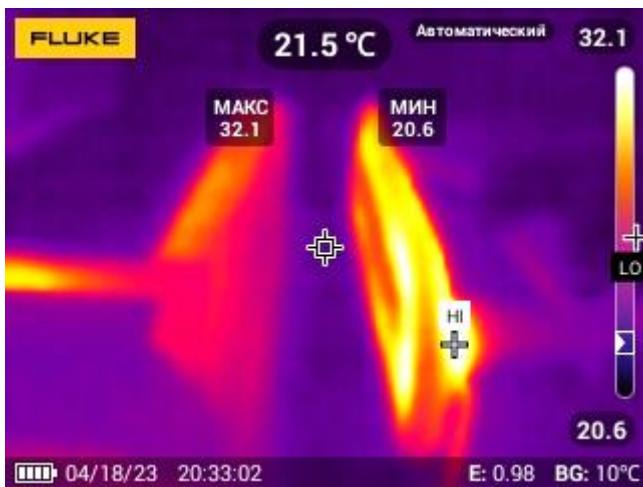


Рис.5. Макетный образец электровоза, оснащенный системой беспроводного заряда

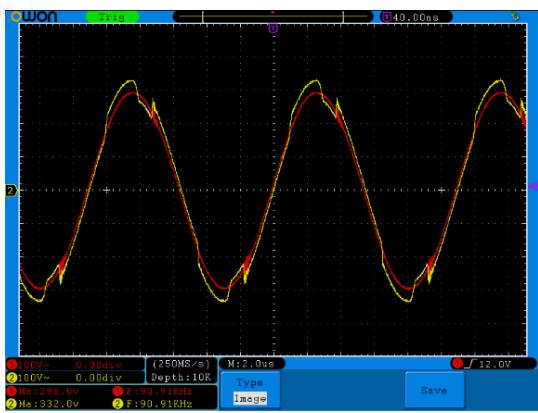
1 – передающий шкаф; 2 – макет электровоза; 3 – высокочастотный инвертор; 4 – конденсатор передающей цепи; 5 – конденсатор приемной цепи; 6 – нагрузка; 7 – выпрямитель; 8 – передающая катушка; 9 – приемная катушка; 10 – область электромагнитного взаимодействия



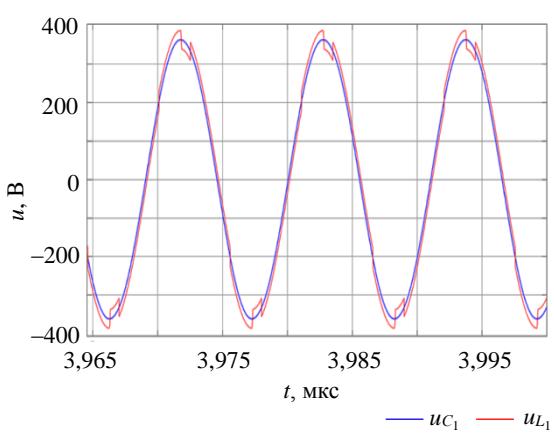
a



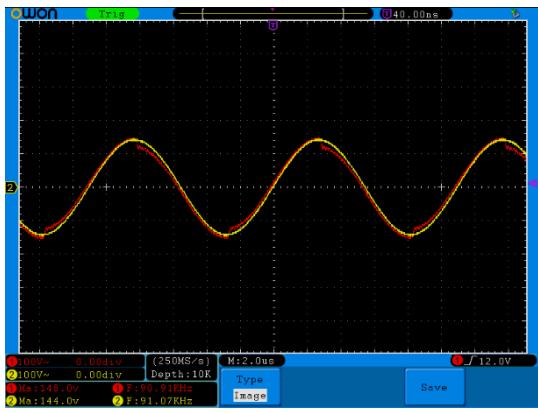
б



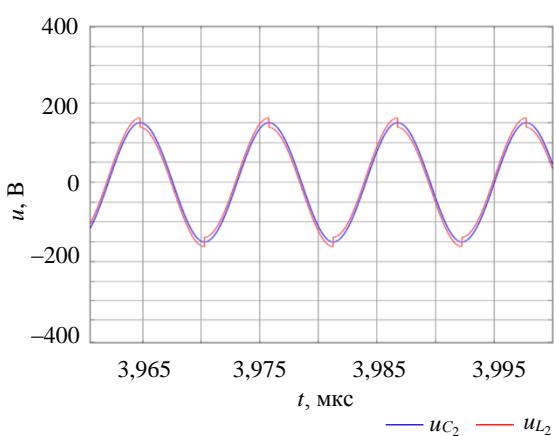
в



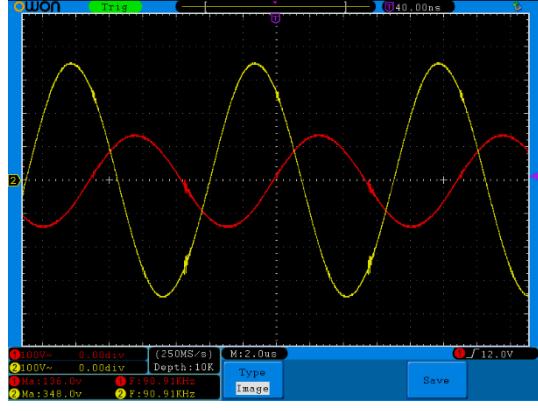
г



д



е



ж

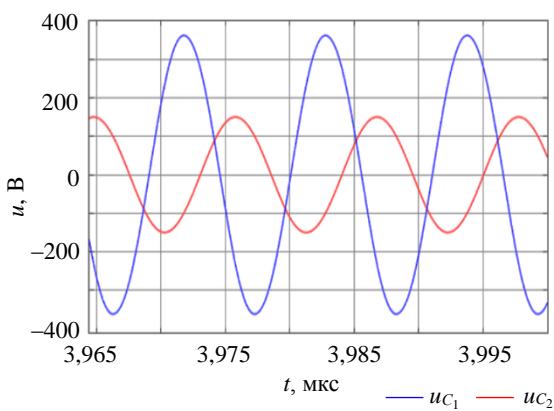


Рис.6. Результаты макетных испытаний:

а – термограмма;

б – эксперимент u_{L1} , uc_1 ;

в – моделирование u_{L1} , uc_1 ;

г – эксперимент u_{L2} , uc_2 ;

д – моделирование u_{L2} , uc_2 ;

е – экспериммент uc_1 , uc_2 ;

ж – моделирование uc_1 , uc_2

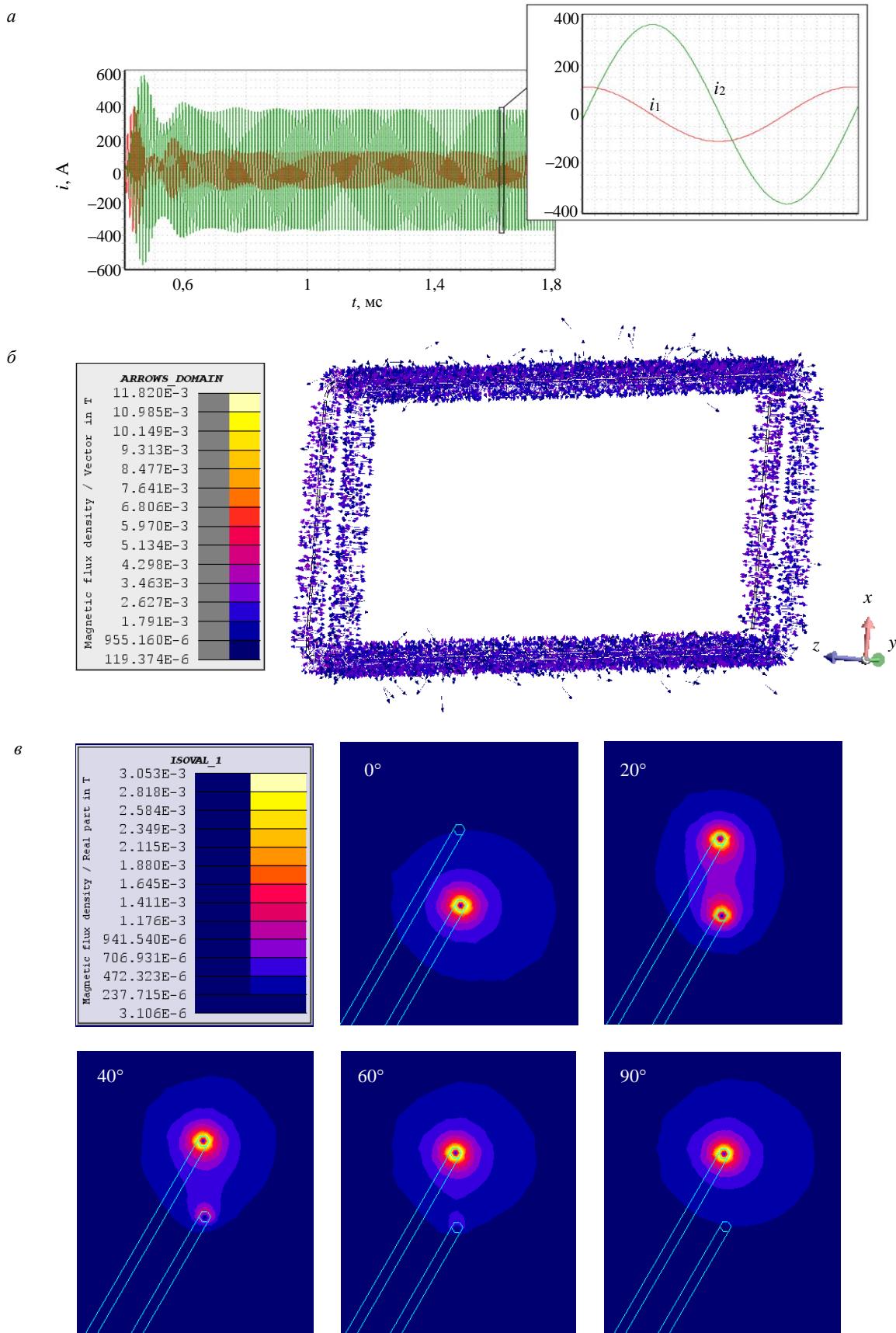


Рис.7. Результаты моделирования: *a* – переходные процессы i_1 и i_2 ; *б* – поле векторов магнитной индукции для значения фазы 20° ; *в* – распределение магнитной индукции в окрестностях обмоточного провода катушек для значений фазы $0, 20, 40, 60$ и 90°

При работе с моделью в MatLab Simulink на входе системы устанавливались рабочая частота и скважность. Система рассчитывалась для резонансной частоты, равной 90 кГц, на этой частоте отмечается максимум тока приемной цепи i_2 при постоянстве напряжения на входе резонансного контура u_1 , коэффициент передачи по току $i_2/u_1 = 2$ А/В. КПД беспроводной передачи энергии на данной частоте равен 0,988 при теоретическом максимуме для системы 0,994. Следовательно, целесообразным является выбор рабочей частоты, отличающейся от резонансной, чтобы соблюдался баланс между стремлением к максимуму КПД и обеспечением требуемого зарядного тока.

В рассматриваемом случае требуется зарядный ток 260 А, амплитудное значение тока i_2 составляет 368 А. Учитывая, что минимальный теоретический коэффициент передачи по току $i_2/u_1 = 0,606$ А/В, амплитудное значение напряжения u_1 должно быть не менее 607 В. При трехфазном сетевом напряжении с действующим фазным значением 660 В напряжение звена постоянного тока составит 891 В, требуемый зарядный ток будет обеспечен на любой рабочей частоте. Исходя из этого, в качестве рабочей частоты выбрана частота 97,1 кГц, на которой обеспечивается максимум КПД. Скважность, обеспечивающая напряжения на входе резонансного контура, равна 0,68.

Полученные для описанных условий токи i_1 и i_2 показаны на рис.7, а. Амплитудные значения токов, фазовый сдвиг между ними использовались как входные данные для конечноэлементной модели, определяющей распределенное в пространстве поле векторов магнитной индукции в течение периода изменения токов. Результаты моделирования магнитного поля в области электромагнитного взаимодействия приведены на рис.7, б, в. Они показывают, что индукция высокочастотного магнитного поля за пределами окрестностей обмоточного провода передающей и приемной катушек имеет пренебрежимо малое значение и в центре прямоугольника 3000×700 равна нулю. Это говорит о достаточно высокой электромагнитной совместимости и безопасности для людей по критериям СанПиН 1.2.3685-21.

При рассмотрении магнитного поля в окрестностях обмоточного провода катушек установлено, что максимальная индукция поля за пределами обмоточного провода составляет 3,548 мТл, однако уже на удалении 18 мм индукция магнитного поля не превышает 1,929 мТл. Поскольку изначально предполагалось катушки заизолировать или заливать компаундом, при слое изоляции толщиной 20 мм будут обеспечены условия, при которых попадание между передающей и приемной катушками любого металлического предмета не вызовет его нагревания до температур, способных воспламенить атмосферу предприятия подземной добычи полезных ископаемых. Дополнительно может использоваться снижение зарядного тока, что пропорционально замедлит процесс заряда аккумулятора рудничного электровоза, однако повысит надежность системы против взрыва.

Заключение. Исследование показало, что система беспроводного заряда для рудничного электровоза, работающая в условиях предприятия подземной добычи полезных ископаемых, опасных по газу и пыли, технически реализуема и существуют такие конструктивные исполнения и режимы ее работы, при которых она взрывобезопасна. Полученные схемотехнические и конструктивные решения могут использоваться в качестве основы для разработки конструкторских и технологических документов, необходимых для изготовления опытного образца системы беспроводного заряда и последующего направления в сертификационный орган для проведения испытаний на соответствие требованиям технического регламента Таможенного союза ТР ТС 012/2011.

Внедрение системы беспроводного заряда для рудничных электровозов и других аналогичных систем шахтного транспорта способно повысить эффективность добычи за счет снижения эксплуатационных затрат, обусловленных необходимостью отключать аккумуляторы для зарядки за пределами взрывобезопасной зоны. В случае реализации на крупных рудничных транспортных системах концепции интеграции электрического транспорта в сеть электроснабжения предложенная система может использоваться для выравнивания нагрузки, обеспечивая повышение энергоэффективности всего предприятия.

Дальнейшее исследование системы беспроводного заряда состоит в уточнении ее динамической модели с учетом коммутационных потерь и потерь проводимости в силовых полупроводниковых ключах, диэлектрических потерь в конденсаторах компенсационной цепи, что позволит оценивать КПД всей системы беспроводного заряда, а не только КПД беспроводной передачи энергии. Целесообразно дальнейшее исследование высокочастотного магнитного поля в области



электромагнитного взаимодействия в условиях отклонений во взаимном расположении катушек, таких как чрезмерное сближение и удаление, горизонтальное и угловое смещение. Дополнительно в качестве развития системы возможна оптимизация ее параметров, а также внедрение замкнутой системы управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Weilong Wang, Xiaodong Yang, Jianhong Cao et al.* Energy internet, digital economy, and green economic growth: Evidence from China // Innovation and Green Development. 2022. Vol. 1. Iss. 2. № 100011. DOI: [10.1016/j.igd.2022.100011](https://doi.org/10.1016/j.igd.2022.100011)
2. *Jie Xiong, Shuyan Zhao, Yan Meng et al.* How latecomers catch up to build an energy-saving industry: The case of the Chinese electric vehicle industry 1995-2018 // Energy Policy. 2022. Vol. 161. № 112725. DOI: [10.1016/j.enpol.2021.112725](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112725)
3. *Zhifeng Que, Shixue Wang, Weiyi Li.* Potential of energy saving and emission reduction of battery electric vehicles with two type of drivetrains in China // Energy Procedia. 2015. Vol. 75. P. 2892-2897. DOI: [10.1016/j.egypro.2015.07.584](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.584)
4. *Hong-Mei Deng, Yun-Peng Zhang, Jing Li et al.* Research on energy saving potential and countermeasures in China's transport sector // Energy Reports. 2022. Vol. 8. S. 6. P. 300-311. DOI: [10.1016/j.egyr.2022.03.098](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.098)
5. *Bibak B., Tekiner-Mogulkoc H.* Influences of vehicle to grid (V2G) on power grid: An analysis by considering associated stochastic parameters explicitly // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2021. Vol. 26. № 100429. DOI: [10.1016/j.segan.2020.100429](https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100429)
6. *Gough R., Dickerson C., Rowley P., Walsh C.* Vehicle-to-grid feasibility: A techno-economic analysis of EV-based energy storage // Applied Energy. 2017. Vol. 192. P. 12-23. DOI: [10.1016/j.apenergy.2017.01.102](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.102)
7. *Laiqing Xie, Yugong Luo, Donghao Zhang et al.* Intelligent energy-saving control strategy for electric vehicle based on preceding vehicle movement // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol. 130. P. 484-501. DOI: [10.1016/j.ymssp.2019.05.027](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.05.027)
8. *Augello A., Gallo P., Sanseverino E.R. et al.* Certifying battery usage for V2G and second life with a blockchain-based framework // Computer Networks. 2023. Vol. 222. № 109558. DOI: [10.1016/j.comnet.2023.109558](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109558)
9. *Mastoi M.S., Shenxian Zhuang, Munir H.M. et al.* An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends // Energy Reports. 2022. Vol. 8. P. 11504-11529. DOI: [10.1016/j.egyr.2022.09.011](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.011)
10. *Mohammed S.A.Q., Jin-Woo Jung.* A Comprehensive State-of-the-Art Review of Wired/Wireless Charging Technologies for Battery Electric Vehicles: Classification/Common Topologies/Future Research Issues // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 19572-19585. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3055027](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3055027)
11. *Cirimele V., Diana M., Freschi F., Mitolo M.* Inductive power transfer for automotive applications: state-of-the-art and future trends // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. № 5. P. 4069-4079. DOI: [10.1109/TIA.2018.2836098](https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2836098)
12. *Jian-guo Li, Kai Zhan.* Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment // Engineering. 2018. Vol. 4. Iss. 3. P. 381-391. DOI: [10.1016/j.eng.2018.05.013](https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.013)
13. *Jäderblom N.* From Diesel to Battery Power in Underground Mines. A Pilot Study of Diesel Free LHDs: Master of Science Thesis in Industrial Design Engineering. Luleå: Luleå University of Technology, 2017. 75 p.
14. *Semykina I., Zavyalov V., Dubkov E., Veliiliaev A.-H.* On the possibility of wireless battery charging in a gaseous-and-dusty mine // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 303. № 01032. DOI: [10.1051/e3sconf/202130301032](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130301032)
15. *Борисов С.В., Колтунова Е.А., Кладиев С.Н.* Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электроповоза // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 114-121. DOI: [10.31897/PMI.2021.1.12](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.12)
16. *Songyan Niu, Hang Yu, Shuangxia Niu, Linni Jian.* Power loss analysis and thermal assessment on wireless electric vehicle charging technology: The over-temperature risk of ground assembly needs attention // Applied Energy. 2020. Vol. 275. № 115344. DOI: [10.1016/j.apenergy.2020.115344](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115344)
17. *Lijuan Xiang, Ze Zhu, Jindong Tian, Yong Tian.* Foreign Object Detection in a Wireless Power Transfer System Using Symmetrical Coil Sets // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 44622-44631. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2908866](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908866)
18. *Ahmad A., Alam M.S., Chabaan R.* A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2018. Vol. 4. № 1. P. 38-63. DOI: [10.1109/TTE.2017.2771619](https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2771619)
19. *Abou Houran M., Xu Yang, Wenjie Chen.* Magnetically Coupled Resonance WPT: Review of Compensation Topologies, Resonator Structures with Misalignment, and EMI Diagnostics // Electronics. 2018. Vol. 7. Iss. 11. № 296. DOI: [10.3390/electronics7110296](https://doi.org/10.3390/electronics7110296)
20. *Foote A., Onar O.C.* A review of high-power wireless power transfer // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 22-24 June 2017, Chicago, USA. IEEE, 2017. P. 234-240. DOI: [10.1109/ITEC.2017.7993277](https://doi.org/10.1109/ITEC.2017.7993277)
21. *Semykina I.Yu., Zavyalov V.M., Krylov V.N.* Research of the Laboratory Prototype for the Battery Charging System Based on Wireless Power Transfer // 21th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 29 June – 3 July 2020, Chemal, Russia. IEEE, 2020. P. 324-330. DOI: [10.1109/EDM49804.2020.9153521](https://doi.org/10.1109/EDM49804.2020.9153521)
22. *Qizhi Liu.* Identifying and correcting the defects of the Saaty analytic hierarchy/network process: A comparative study of the Saaty analytic hierarchy/network process and the Markov chain-based analytic network process // Operations Research Perspectives. 2022. Vol. 9. № 100244. DOI: [10.1016/j.orp.2022.100244](https://doi.org/10.1016/j.orp.2022.100244)
23. *Семыкина И.Ю., Дубков Е.А., Завьялов В.М.* Обоснование критериев оценки технических решений систем беспроводного заряда аккумуляторных батарей для рудничного электротранспорта // Сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции «Перспективы инновационного развития угольных регионов России», 13-14 апреля 2022 г., Прокопьевск, Россия. Прокопьевск: филиал КузГТУ в г. Прокопьевске, 2022. С. 88-93.
24. *Huynh P.S., Ronanki D., Vincent D., Williamson S.S.* Overview and Comparative Assessment of Single-Phase Power Converter Topologies of Inductive Wireless Charging Systems // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 9. № 2150. DOI: [10.3390/en13092150](https://doi.org/10.3390/en13092150)
25. *Kripalakshmi T., Deepa T.* A Comprehensive Review of High-frequency Transmission Inverters for Magnetic Resonance Inductive Wireless Charging Applications in Electric Vehicles // IETE Journal of Research. 2021. P. 1-11. DOI: [10.1080/03772063.2021.1905089](https://doi.org/10.1080/03772063.2021.1905089)

26. *Bing Cheng, Liangzong He, Le Li et al.* Improved wireless power transfer system utilizing a rectifier with nonlinear resistance compression characteristic // *Applied Energy*. 2023. Vol. 331. № 120365. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120365
27. *Zhong W.X., Hui S.Y.R.* Maximum Energy Efficiency Tracking for Wireless Power Transfer Systems // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015. Vol. 30. № 7. P. 4025-4034. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2351496
28. *Di Capua G., Femia N., Lisi G.* Impact of losses and mismatches on power and efficiency of Wireless Power Transfer Systems with controlled secondary-side rectifier // *Integration*. 2016. Vol. 55. P. 384-392. DOI: 10.1016/j.vlsi.2016.04.005
29. *Hongchang Li, Jie Li, Kangping Wang et al.* A Maximum Efficiency Point Tracking Control Scheme for Wireless Power Transfer Systems Using Magnetic Resonant Coupling // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015. Vol. 30. № 7. P. 3998-4008. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2349534
30. *Shuyu Cao, Htet Ye Yint Naing, Naayagi R.T. et al.* Wireless Charging Resonant Converter Topology Study Based On Analytical Design Computation // *3rd International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Clean Energy Technologies*, 5-7 March 2021, Shillong, Meghalaya, India. IEEE, 2021. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICEPE50861.2021.9404462
31. *Mude K.N., Aditya K.* A Comprehensive Review and Analysis of Two-Element Resonant Compensation Topologies for Wireless Inductive Power Transfer Systems // *Chinese Journal of Electrical Engineering*. 2019. Vol. 5. № 2. P. 14-31. DOI: 10.23919/CJEE.2019.000008
32. *Jayalath S., Khan A.* Design, Challenges, and Trends of Inductive Power Transfer Couplers for Electric Vehicles: A Review // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021. Vol. 9. № 5. P. 6196-6218. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3042625
33. *Jianwei Mai, Yijie Wang, Yousu Yao, Dianguo Xu.* Analysis and Design of High-Misalignment-Tolerant Compensation Topologies With Constant-Current or Constant-Voltage Output for IPT Systems // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021. Vol. 36. № 3. P. 2685-2695. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3014687
34. *Xiaohui Qu, Hongdou Han, Siu-Chung Wong et al.* Hybrid IPT Topologies With Constant Current or Constant Voltage Output for Battery Charging Applications // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015. Vol. 30. № 11. P. 6329-6337. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2396471
35. *Siqi Li, Weihan Li, Junjun Deng et al.* A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2015. Vol. 64. № 6. P. 2261-2273. DOI: 10.1109/TVT.2014.2347006
36. *Marques E.G., Mendes A.M.S.* Optimization of transmitter magnetic structures for roadway applications // *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 26-30 March 2017, Tampa, USA. IEEE, 2017. P. 959-965. DOI: 10.1109/APEC.2017.7930812
37. *Bandyopadhyay S., Venugopal P., Jiaming Dong, Bauer P.* Comparison of Magnetic Couplers for IPT-Based EV Charging Using Multi-Objective Optimization // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68. № 6. P. 5416-5429. DOI: 10.1109/TVT.2019.2909566
38. *Chunbo Zhu, Chaoye Fu, De'an Wang et al.* Thermal Simulation and Optimization Study for Magnetic Coupler of Static Electric Vehicle Wireless Power Transfer Systems // *22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 11-14 August 2019, Harbin, China. IEEE, 2019. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICEMS.2019.8921715
39. *Chunming Wen, Qing Xu, Minbo Chen et al.* Thermal Analysis of Coupled Resonant Coils for an Electric Vehicle Wireless Charging System // *World Electric Vehicle Journal*. 2022. Vol. 13. Iss. 8. № 133. DOI: 10.3390/wevj13080133

Авторы: **В.М.Завьялов**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0001-8485-9864> (Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия), **И.Ю.Семыкина**, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, arinasemykina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6874-1735> (Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия), **Е.А.Дубков**, старший преподаватель, <https://orcid.org/0000-0003-0065-8681> (Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия), **А.С.Велиляев**, ассистент, <https://orcid.org/0000-0002-3944-4042> (Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Определение сопротивления электрической сети при расчете режимов с искажениями в напряжении

А.Н.СКАМЬИН¹ , В.С.ДОБУШ¹, М.Х.ЖОПРИ²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Малаккский технический университет Малайзии, Малакка, Малайзия

Как цитировать эту статью: Скамьин А.Н., Добуш В.С., Жопри М.Х. Определение сопротивления электрической сети при расчете режимов с искажениями в напряжении // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 443-454. EDN LPAYJO. DOI: 10.31897/PMI.2023.25

Аннотация. В работе исследуется определение гармонического сопротивления системы электроснабжения горного предприятия. Данный параметр важен при расчете режимов с искажениями в напряжении, так как от его значения значительно зависят определяемые характеристики токов и напряжений на частотах высших гармоник, которые позволяют наиболее точно моделировать процессы при наличии искажений в напряжении и токе. Рассмотрена система электроснабжения подземных горных работ, характеризуемая значительной разветвленностью электрической сети и наличием мощных нелинейных электроприемников – одними из основных причин снижения качества электроэнергии на производстве. Модернизация процесса горного производства, внедрение систем автоматизированного электропривода, использование возобновляемых источников энергии, энергосберегающих технологий ведут к повышению энергоэффективности производства, но вместе с тем приводят к ухудшению качества электрической энергии, в частности, к повышению уровня высших гармоник в сети. Задача определения гармонического сопротивления системы электроснабжения решается с целью повышения качества проектирования и эксплуатации сетей электроснабжения горных предприятий с учетом особенностей их нагрузки при добыче твердых полезных ископаемых подземным способом. Рассмотрена возможность определения сопротивления системы на основе измерения нехарактерных высших гармоник, которые генерирует специальная нелинейная нагрузка. В качестве такой нагрузки рассматривается тиристорный регулятор мощности, работающий в режиме фазового регулирования выходного напряжения. Для обоснования предложенного способа используются имитационное компьютерное моделирование и экспериментальные исследования на лабораторном стенде. Даны рекомендации по выбору параметров нагрузки и местоположению подключаемых измерительных устройств.

Ключевые слова: высшие гармоники; качество электрической энергии; нелинейная электрическая нагрузка; тиристорный регулятор; искажения электрической энергии; гармоническое сопротивление сети

Поступила: 26.10.2022

Принята: 13.02.2023

Онлайн: 04.05.2023

Опубликована: 19.07.2023

Введение. Развитие технологий добычи полезных ископаемых и их переработки характеризуется повышением энергопотребления и ростом автоматизации технологического процесса. Происходит внедрение новых технологий электротермической металлургии [1-3], применяются технологии возобновляемой энергетики для питания удаленных энергетических установок нефтегазовой сферы [4-6] и автономного электроснабжения с помощью гибридных установок [7, 8]. Новые технологические установки опираются на применение устройств силовой электроники, которые входят в состав различных полупроводниковых преобразователей. Это приводит к насыщению электрической сети токами высших гармоник. Негативные последствия искажения сетевого напряжения и тока известны и широко освещены [9-11].

Системы электроснабжения подземных горных работ имеют особенности – высокую протяженность линий электропередач, рассредоточенность мощных электрических установок [12-14]. Данное обстоятельство является одной из основных причин увеличения уровней искажений в напряжении, которые зависят от эквивалентного сопротивления питающей сети и от протекающих токов высших гармоник. При модернизации энергоемких установок на горном производстве,

таких как водоотливные, вентиляторные, электроподъемные и др., используется автоматизированная преобразовательная техника [15-17]. Такие установки повышают энергоэффективность технологического процесса, однако являются источниками искажения электрической энергии. Более подробно возможность моделирования таких приводов исследована в работах [18-20]. Прогнозирование уровней искажения электрической энергии при моделировании процессов в электрической сети при наличии высших гармоник является важной и актуальной задачей, стоящей перед проектировщиком или исследователем. В работе [18] подтверждается важность учета параметров качества электроэнергии при расчете электрических нагрузок и выборе параметров основного оборудования на горных предприятиях.

Сопротивление системы широко используется при расчете режимов работы системы электроснабжения предприятий, в том числе несинусоидальных режимов работы сети [21-23]. В работе [23] показано, что в зависимости от измеренных значений сопротивления системы можно определить доминирующий источник высших гармоник в точке общего присоединения потребителей. Одной из особенностей систем электроснабжения подземных горных работ является удаленность электрических нагрузок от источника питания, а значит и высокое сопротивление системы. При этом уровни искажений напряжения могут значительно превышать требования нормативных документов. Эффективность работы устройств компенсации гармонических искажений, например, пассивных фильтров гармоник, напрямую зависит от сопротивления питающей сети. Поэтому при выборе параметров таких устройств необходимо знать величину сопротивления системы на частотах высших гармоник. Сопротивление системы может помочь в определении источника загрязнения высшими гармониками, т.е. уладить споры между поставщиком электрической энергии и потребителем [24-26].

Сопротивление системы на высших гармониках может быть определено расчетным путем или с помощью измерений. Определение сопротивления системы на высших гармониках с помощью расчетов ведется из предположения его индуктивного характера и линейной зависимости от частоты:

$$X_s^{(n)} = nX_s^{(1)},$$

где n – номер гармоники; $X_s^{(1)}$ – индуктивное сопротивление сети на основной (первой) гармонике.

Такой способ прост и не требует применения дополнительного оборудования, однако при моделировании режимов работы энергосистемы точность определения уровней высших гармоник снижается. Это связано с тем, что сопротивление системы включает в себя резистивную и емкостную составляющие, и имеет нелинейный характер [27, 28]. Применение аналитического метода оценки сопротивления системы для ветряных турбин показано в работе [29]. Также сопротивление системы может изменяться с течением времени, т.е. обладать нестационарностью из-за подключения различных дополнительных нагрузок выше точки общего подключения [30, 31]. С другой стороны, применение измерительного метода более трудоемко, но дает более точные результаты [32, 33].

Среди измерительных методов можно выделить основанные на применении генераторов высших гармоник (инвазивные) и на измерении гармонических токов и напряжений для двух следующих друг за другом моментов времени (неинвазивные). Сравнение различных методов определения сопротивления системы приведено в статье [34]. Использование метода на основе генераторов высших гармоник требует дополнительного дорогостоящего оборудования, а также реализации функции измерения в сети гармоник с целью генерации специального сигнала, исключающего существующие в сети гармоники. Метод двух последовательных измерений более прост в применении, однако его принцип, основанный на изменении параметров нелинейных нагрузок с внешней или с внутренней стороны относительно точки общего присоединения, не позволяет точно измерять сопротивление сети на гармониках при одновременном изменении параметров нагрузки во внешней сети и сети электроснабжения рассматриваемого объекта. Оценка погрешности метода измерения сопротивления системы на основе колебаний нагрузок приведена в [35].



Еще одной проблемой при исследовании сопротивления системы электроснабжения подземных горных работ является то, что нагрузки могут быть резкопеременными во многих точках подключения, и сопротивление системы также может являться величиной нестационарной. Подходы к определению сопротивления системы в режиме реального времени описаны в [36, 37].

В данной работе предлагается метод измерения сопротивления сети на основе подключения дополнительной нелинейной нагрузки с определенным спектром высших гармоник, которая не требует больших затрат при внедрении. Однако, нелинейные нагрузки в своем составе могут иметь значительное внутреннее сопротивление, которое может зависеть от частоты, тем самым приближаясь по величине к сопротивлению системы на высших гармониках. Поэтому необходимо изучить влияние внутреннего сопротивления дополнительно подключаемой нелинейной нагрузки, параметров ее электропотребления и режимов работы.

Методы. Для определения сопротивления системы рассматриваемым методом необходимо использовать нелинейную электрическую нагрузку, которая удовлетворяет двум условиям. Во-первых, нелинейная нагрузка должна генерировать нехарактерные для системы электроснабжения высшие гармоники тока. Под нехарактерными гармониками нелинейной нагрузки понимаются гармоники, которые отсутствуют или крайне малы по величине в спектре напряжения сети при отсутствии выбранной нелинейной нагрузки. Во-вторых, у нелинейной нагрузки должно отсутствовать внутреннее сопротивление на высших гармониках, которую на схеме замещения можно представить в виде совокупности параллельно соединенных источников тока без дополнительных сопротивлений. Наличие внутреннего сопротивления у нелинейной нагрузки будет также искажать значение сопротивления системы, так как внутреннее сопротивление на схеме замещения будет соединено параллельно с сопротивлением системы и поэтому расчетное значение сопротивления системы будет меньше его реального значения. Указанные условия необходимо соблюдать для точного определения сопротивления системы на частотах высших гармоник. Наличие в схеме замещения, например, гармоники напряжения сети той же частоты, что и гармоника тока дополнительно подключаемой нелинейной нагрузки, приведет к ошибке расчета сопротивления системы на этой частоте, потому что необходимо учитывать влияние на расчет этого источника напряжения.

Рассмотрим обобщенную упрощенную схему электроснабжения подземных горных работ, связанных с добычей твердых полезных ископаемых (рис.1).

Электроснабжение подземных потребителей зависит от многих факторов: глубина разрабатываемых горизонтов, напряжение подземных электрических сетей, суммарная нагрузка и характер электроприемников, система разработки шахтного поля и др. Однако, все это сопряжено с увеличением длины питающих линий и рассредоточенностью электроприемников. Подавляющее большинство шахтных машин и механизмов приводится во вращение асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Широко используются регулируемые электроприводы на добывочных и подготовительных участках угольных шахт. Для регулирования частоты вращения двигателей применяют шестипульсные полупроводниковые преобразователи частоты. В установках значительной мощности, где регулирование скорости не требуется (вентиляторы главного проветривания, компрессоры), широко применяются синхронные двигатели. В последнее время даже на мощных подъемных установках все чаще применяют мощные асинхронные двигатели с частотным регулированием, что приводит к проблемам в области качества электроснабжения с точки зрения высших гармоник. Применение находят устройства плавного пуска, выполненные по схеме тиристорных регуляторов напряжения, в частности, на конвейерных установках. Следует отметить, что существуют разработки и средства, позволяющие минимизировать влияние полупроводниковых преобразователей отдельных установок на сеть (активный выпрямитель, входные силовые активные и пассивные фильтры). Высокая стоимость таких устройств является одной из основных причин низких темпов их внедрения.

Таким образом, с точки зрения поставленной цели можно выделить основные моменты: в системах электроснабжения подземных горных работ присутствует нелинейная нагрузка с характерными для шестипульсных выпрямителей гармониками порядка $n = 6k \pm 1$, где $k = 1, 2, 3, \dots$; в спектре потребляемого тока также присутствуют гармоники, кратные двум, которые характеризуются небольшой продолжительностью ввиду применения в пусковых режимах электрооборудования;

электроснабжение потребителей имеет разветвленную радиальную сеть и резкопеременную нагрузку в разных точках подключения к сети.

В качестве нелинейной нагрузки, необходимой для определения сопротивления сети на высших гармониках, можно использовать специализированное полупроводниковое устройство, которое генерирует нехарактерные высшие гармоники для внешней системы электроснабжения. Его нагрузкой должны быть резистивные элементы, характеристики которых не зависят от частоты. По результатам опытов было выявлено, что такими нагрузками являются, например, тиристорный регулятор мощности (TPM) и неуправляемый выпрямитель без емкостного фильтра постоянного тока [38]. Неуправляемый выпрямитель имеет спектр, который включает в себя гармоники порядка $6k \pm 1$, которые часто встречаются во внешней сети электроснабжения. В спектре потребляемого тока TPM присутствуют гармоники, кратные двум, которые в большинстве случаев отсутствуют во внешней сети. Поэтому в качестве генератора нехарактерных высших гармоник был выбран TPM. Данный выбор имеет некоторые недостатки. Во-первых, TPM создает помимо нехарактерных гармоник еще и другие, в том числе и основную гармонику, величина которой во всех режимах больше остальных гармоник, что ведет к снижению эффективности работы установки в качестве измерителя сопротивления системы. Во-вторых, для увеличения точности результатов измерения необходимо увеличивать и мощность нагрузки TPM, следовательно, увеличиваются и габаритные размеры установки.

Таким образом, для измерения сопротивления системы необходимо:

- Убедиться в отсутствии нехарактерных гармоник напряжения во внешней сети при отключенном генераторе нехарактерных высших гармоник. При наличии во внутренней системе электроснабжения устройств, генерирующих гармоники, кратные двум, необходимо их отключить. Это представляется возможным ввиду незначительного количества таких устройств в системах электроснабжения подземных горных работ. В случае непродолжительного включения такого

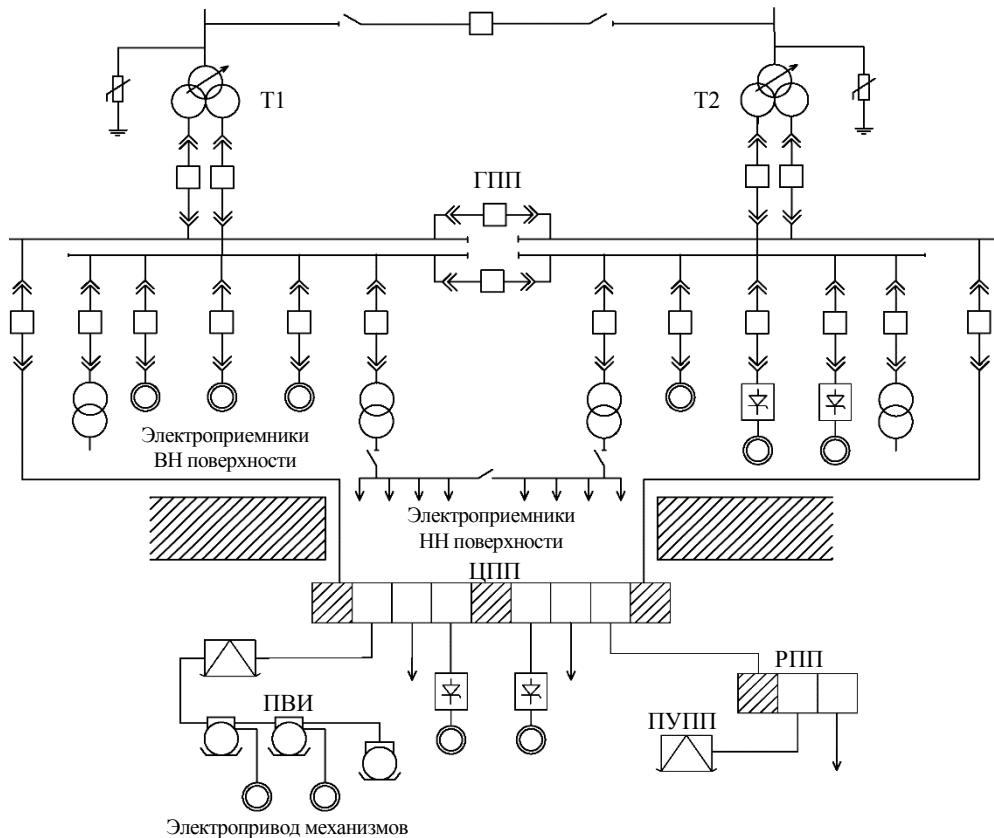


Рис. 1. Упрощенная схема электроснабжения горного производства
 ГПП – главная понизительная подстанция; ЦПП – центральная подземная подстанция;
 Т – силовые трансформаторы; ВН – высокое напряжение; НН – низкое напряжение;
 РПП – распределительный подземный пункт; ПУПП – передвижная участковая
 подземная подстанция; ПВИ – взрывобезопасные рудничные пускатели

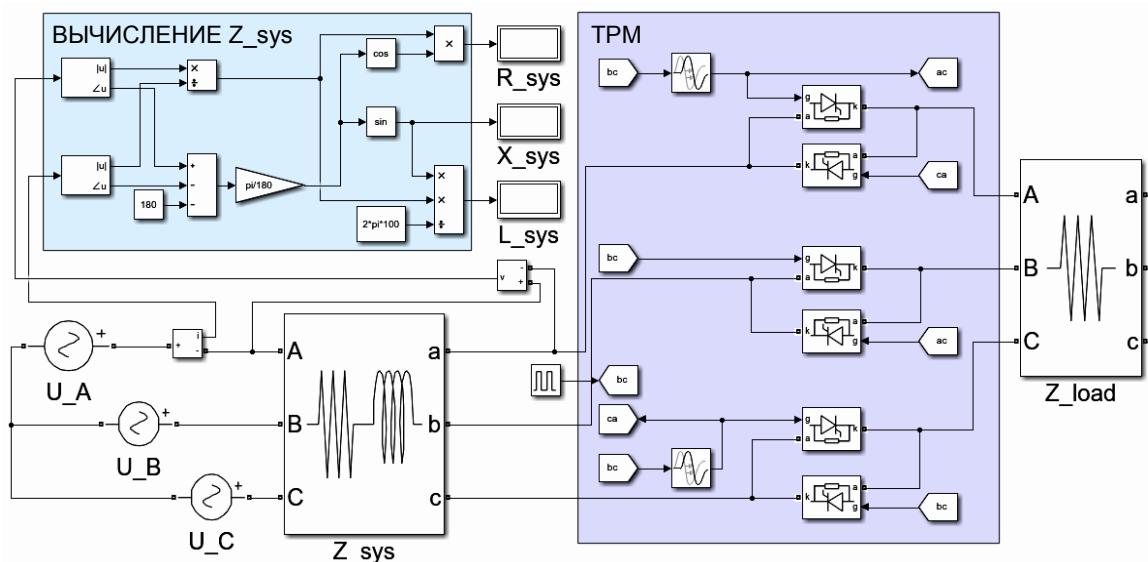


Рис.2. Имитационная модель Matlab/Simulink

рода устройств (например, в пусковых режимах двигателей) проведение предварительных измерений возможно без их отключения с осуществлением контроля таких периодов включения двигателей.

- Включить генератор нехарактерных гармоник. Устройства, генерирующие гармоники, кратные двум, также могут быть включены в работу (в данном случае необходимо учитывать местоположение такой нагрузки при проведении измерений).
- Снять осциллограммы тока и напряжения на входе генератора высших гармоник.
- Получить спектр тока и напряжения на входе генератора.
- Выполнить расчет сопротивления системы на нехарактерных высших гармониках.

Для проверки предлагаемого метода расчета сопротивления системы была создана имитационная модель в среде Matlab/Simulink (рис.2). Имитационная модель состоит из трехфазного симметричного источника (источники переменного синусоидального напряжения U_A , U_B , U_C), тиристорного регулятора мощности с системой управления (блок TPM), нагрузки тиристорного регулятора (блок Z_{load}), сопротивления системы (Z_{sys}) и блока измерения и расчета сопротивления системы (ВЫЧИСЛЕНИЕ Z_{sys}). Блок TPM состоит из трех пар встречечно-параллельно соединенных тиристоров и работает в режиме фазового регулирования выходного напряжения. Блок ВЫЧИСЛЕНИЕ Z_{sys} выполняет расчеты сопротивления системы на основе осциллограмм фазного напряжения и тока тиристорного регулятора мощности. Разработанная модель применялась для определения сопротивления системы на высших гармониках при различных по величине и характеру сопротивлениях системы.

Верификация компьютерной модели проводилась на лабораторном стенде (рис.3), который состоит из трехфазного симметричного источника напряжения (1), тиристорного регулятора мощности (2), нагрузки в виде ТЭНов (3), трех катушек индуктивности (4) и измерителя напряжения и тока (5). В качестве регистрирующего прибора использовались осциллограф Rigol 1202 и анализатор качества электроэнергии Ресурс PQA. Полученные осциллограммы обрабатывались в Matlab.



Рис.3. Лабораторный стенд

Параметры тиристорного регулятора мощности и сопротивления системы приведены в таблице. Все параметры модели идентичны параметрам лабораторного стенда, а алгоритм работы модели тиристорного регулятора мощности полностью соответствует алгоритму работы реального устройства.

Параметры оборудования лабораторного стенда

Наименование оборудования	Параметры
Сопротивление системы	
Ступень 1	$R = 0,449 \text{ Ом}; L = 1 \text{ мГн}$
Ступень 2	$R = 1,12 \text{ Ом}; L = 4,1 \text{ мГн}$
Ступень 3	$R = 1,84 \text{ Ом}; L = 8,8 \text{ мГн}$
Нагрузка тиристорного регулятора	$R = 96 \text{ Ом}$
Тиристорный регулятор мощности	$I_{\text{ном}} = 30 \text{ А}$
Трехфазная сеть	$U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}$
Мощность короткого замыкания	
Ступень 1	263 кВА
Ступень 2	85 кВА
Ступень 3	44 кВА
Активное сопротивление системы	10 Ом
Емкостное сопротивление системы	2350 мкФ

Линейная индуктивность имеет три ступени регулирования, ее параметры приведены в таблице. Частотная характеристика индуктивности имеет линейный характер, что подтверждалось с помощью лабораторного источника переменной частоты от 0 до 500 Гц. В качестве допущения принимается, что сопротивление сети 10 кВ и выше не учитывается, так как его величина значительно меньше лабораторной линейной индуктивности.

Сопротивление системы может иметь сложную зависимость от частоты и состоять из разных по характеру сопротивлений. Были проведены эксперименты при различных типах сопротивления энергосистемы, которые в различной степени зависят от частоты, а также проверка метода на данных типах сопротивлений.

Обсуждение результатов. Компьютерная модель в системе Matlab/Simulink была верифицирована с помощью экспериментов на лабораторном оборудовании при различной загрузке TPM (от 0 до 50 %). Сравнивались осциллограммы TPM, полученные при моделировании и в результате измерений на лабораторном стенде. Подтверждением этому служат осциллограммы, представленные на рис.4. На рис.4, *a* представлено сравнение осциллограмм, полученных путем компьютер-

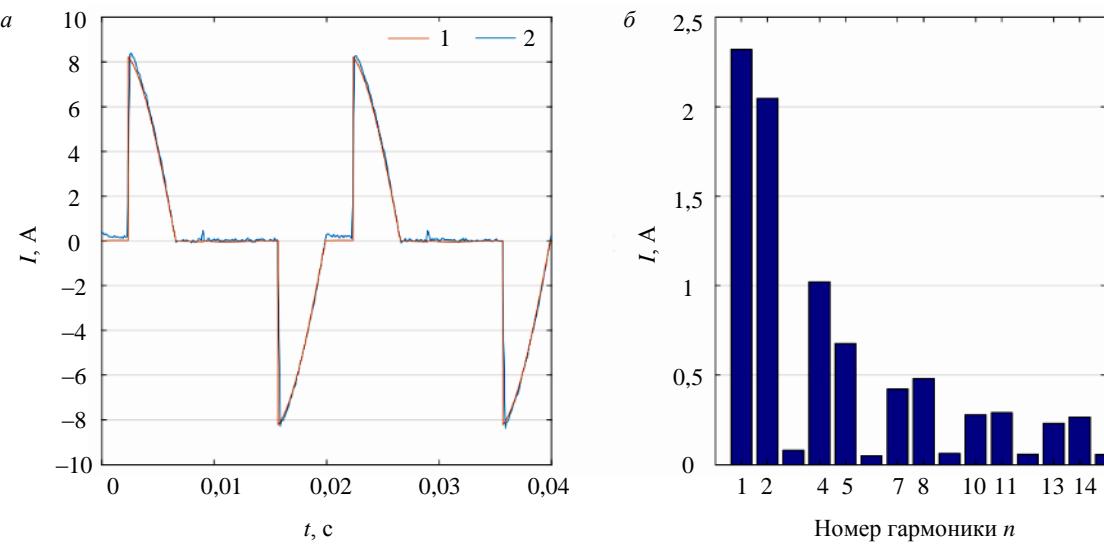


Рис.4. Осциллограмма (*a*) и спектр тока (*б*), потребляемого тиристорным регулятором



ного моделирования (1) и эксперимента на оборудовании (2). На рис.4, б представлен спектр потребляемого тока TPM.

Рассматриваемая компьютерная модель полностью подтвердила свою работоспособность на всех четных гармониках, т.е. были определены активное и реактивное сопротивление системы. Ошибка определения сопротивления системы на высших гармониках составляла менее 1 %. Таким образом подтверждается, что схема замещения модели на нехарактерных гармониках состоит только из источника тока нехарактерной гармоники и сопротивления системы. Поэтому комплексное сопротивление системы n -й гармоники может быть найдено по формуле

$$Z_S^{(n)} = \frac{\dot{U}^{(n)}}{\dot{I}^{(n)}},$$

где $\dot{U}^{(n)}$ – комплексное напряжение n -й гармоники; $\dot{I}^{(n)}$ – комплексный ток n -й гармоники.

Для проверки предложенного способа проведен эксперимент на лабораторном стенде. TPM работал в фазовом режиме управления и его загрузка изменялась от 0 до 50 %. При 100 %-ной нагрузке искажения тока равны нулю и нагрузка работает в полностью синусоидальном режиме, поэтому данный режим не рассматривался. На рис.5 представлены расчетные значения индуктив-

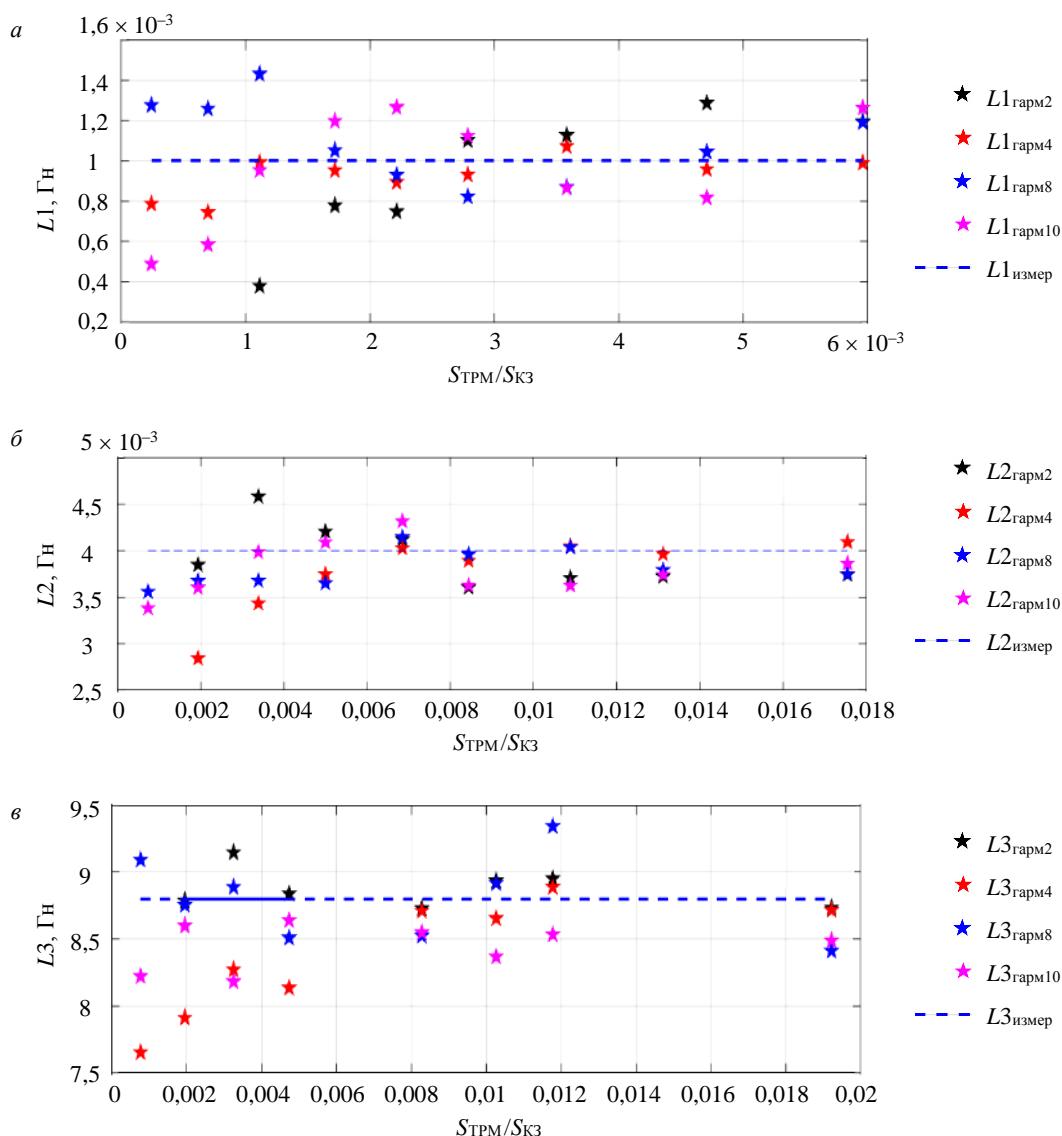


Рис.5. Расчетные значения индуктивности катушки $L1$ (a), $L2$ (б), $L3$ (в)
для гармоник 2, 4, 8, 10 при различной мощности TPM

ности катушки $L1$, $L2$, $L3$ для гармоник 2, 4, 8, 10 при различной мощности ТРМ. Важным параметром при определении сопротивления системы с помощью предложенного метода является мощность короткого замыкания. Это связано с тем, что при различных потребляемых гармонических токах на сопротивлении энергосистемы будет создаваться соответствующее падение напряжения на гармониках, которое может находиться в пределах погрешности измерительного прибора. Чтобы достичь необходимых значений токов и напряжений на гармониках, при проведении расчетов необходимо выявить диапазон соответствующих значений мощности ТРМ в зависимости от мощности короткого замыкания системы.

Характеристики, представленные на рис.5, отражают значения расчетной индуктивности на второй, четвертой, восьмой и десятой гармониках в зависимости от мощности ТРМ и мощности короткого замыкания в точке присоединения электроприемников. Пунктирной линией показано измеренное с помощью лабораторного источника значение индуктивности. Отношение мощности ТРМ к мощности короткого замыкания может служить критерием выбора мощности ТРМ, подходящего под исследуемую сеть. Исходя из полученных зависимостей, можно сделать следующие выводы:

- режимы работы ТРМ с минимальной загрузкой (5-15 %) можно отнести к выбросам, так как в этом случае значения второй гармоники тока и напряжения являются незначительным и расчет индуктивности имеет большую ошибку. Остальные режимы работы ТРМ подходят для измерения и расчета индуктивности системы и имеют незначительную погрешность;
- при учете остальных режимов работы ТРМ (20-50 %) среднее отклонение от измеренной величины индуктивности составляет менее 5 %;
- схему замещения ТРМ на высших гармониках действительно можно представить в виде параллельно соединенных источников тока без внутреннего сопротивления;
- при значении мощности ТРМ, равной 0,2 % от мощности короткого замыкания, индуктивность энергосистемы определяется с необходимой точностью.

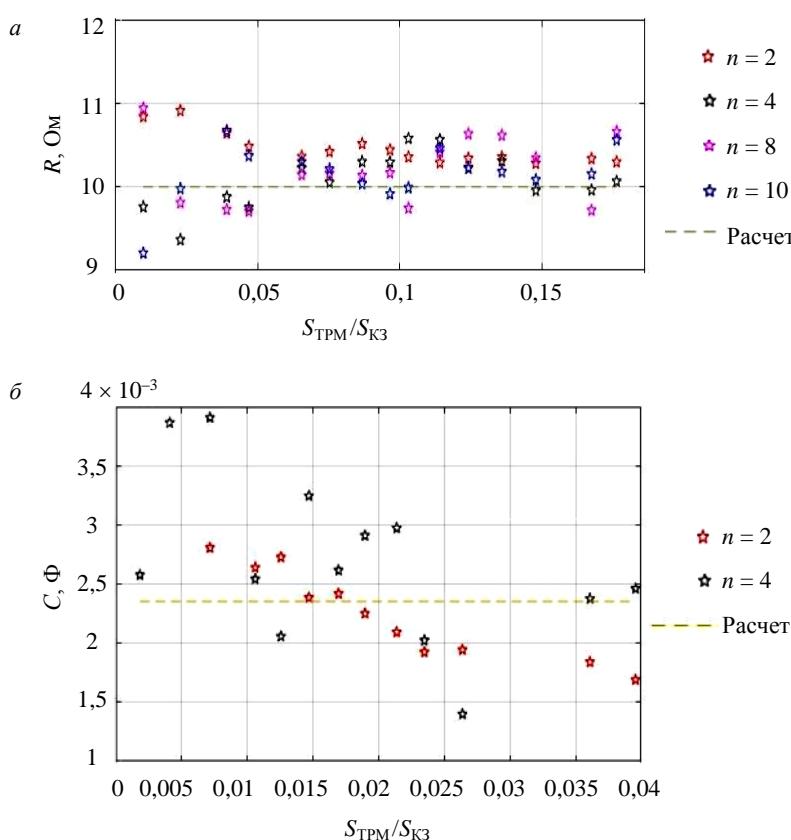


Рис.6. Измеренные значения сопротивления при активном (а) и емкостном (б) характере сети

Далее были проведены эксперименты для активного и емкостного сопротивлений системы с целью проверки полученных ранее выводов для данных типов сопротивлений. Результаты измерений для активного и емкостного сопротивлений представлены на рис.6.

Измерение активного сопротивления по данным проведенного эксперимента происходит с ошибкой менее 10 % от величины реального сопротивления (рис.6, а). Причем при загрузке ТРМ в промежутке от 25-45 % ошибка измерения не превышает 5 %. Ошибка измерения активного сопротивления системы практически не зависит от номера гармоник. Активное сопротивление измерялось в диапазоне 1-18 % от мощности короткого замыкания сети, т.е. для сети ТРМ являлся одной из наиболее мощных нагрузок. На рис.6, б представлена зависимость рассчитанной емкости сети на различных



частотах от отношения мощности TPM к мощности короткого замыкания системы. Емкостное сопротивление сети с помощью описываемого способа можно определить только с ошибкой 50 % на низкочастотных гармониках, что можно пояснить следующим образом. Во-первых, по причине малой величины сопротивления системы мощность TPM не превышает 4 % от мощности короткого замыкания сети в лабораторных условиях. Во-вторых, на более высоких частотах емкостное сопротивление становится еще меньше, поэтому достоверно измерить на этих гармониках токи и напряжения и рассчитать на их основе емкость сети не представляется возможным в лабораторных условиях.

В большинстве случаев для систем электроснабжения подземных горных работ сопротивление энергосистемы имеет активно-индуктивный характер, особенно для сетей среднего и низкого класса напряжений. Поэтому применение предложенного метода может быть реализовано без значительных увеличений мощности дополнительно подключаемой нелинейной нагрузки. Методика применения разработанного способа для определения сопротивления питающей сети системы электроснабжения подземных горных работ состоит из следующих этапов:

1. Анализ системы электроснабжения подземных горных работ на наличие нехарактерных искажений в напряжении питающей сети осуществляется на основе предварительных замеров показателей качества электроэнергии при отключенном генераторе нехарактерных сигналов и выявления типов силовых полупроводниковых преобразователей на производстве. При наличии полупроводниковых преобразователей, генерирующих нехарактерные искажения (гармоники, кратные двум), необходимо также их отключить на время измерений. В случае непрерывного включения такого рода устройств (например, в пусковых режимах двигателей) проведение предварительных измерений возможно без их отключения с осуществлением контроля и исключения таких периодов включения двигателей из измеренных данных. При отсутствии нехарактерных гармоник в напряжении питающей сети осуществляется переход к следующему пункту. Наличие нехарактерных гармоник в напряжении питающей сети приводит к дополнительной погрешности при расчете гармонического сопротивления энергосистемы. Оценка такой погрешности в данной работе не проводилась.

2. Выбор мощности ТРМ определяется из мощности короткого замыкания в исследуемой точке сети:

$$\frac{S_{\text{K3}}}{S_{\text{TPM}}} \leq 500.$$

При проведении измерений в низковольтной электрической сети горного предприятия, которая в сравнении с сетями среднего и высокого класса напряжения характеризуется наихудшими показателями с точки зрения искажений, мощность ТРМ составит незначительную величину от единиц до десятков киловатт.

3. Выбор точек подключения измерительных устройств. Определяется участок сети (подстанция), на котором необходимо решить требуемую задачу – расчет уровней искажений в точке присоединения новых нелинейных потребителей, в точке присоединения потребителей при изменении параметров нагрузки и устройств компенсации реактивной мощности, в точке присоединения потребителей при установке устройств снижения гармоник и т.д. На рис.7 представлена упрощенная однолинейная электрическая схема, в рамках которой рассматривается подключение ТРМ и цепей измерения к выбранному участку сети.

В случае превышения нормативных показателей качества электроэнергии и необходимости выбора параметров устройств снижения гармоник, например на шинах подстанции НН, необходимо

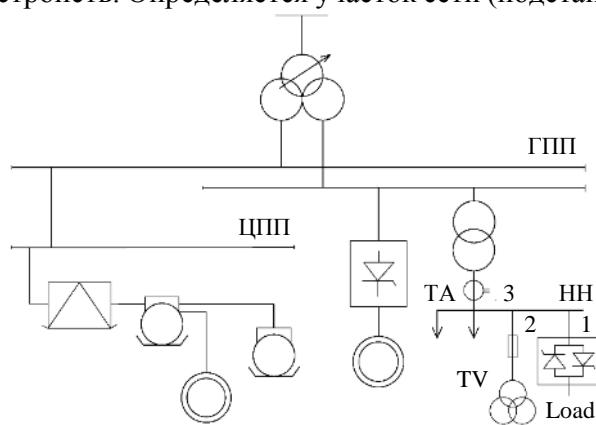


Рис.7. Упрощенная однолинейная электрическая схема
 ТА – трансформатор тока; ТВ – трансформатор
 напряжения

определить гармоническое сопротивление сети на этом присоединении. Подключение ТРМ осуществляется на шинах подстанции НН (точка 1), измерение фазного напряжения гармоник проводится также на шинах НН (точка 2). Наличие внутреннего сопротивления такой нелинейной нагрузки может быть минимизировано за счет корректного подключения измерительных цепей тока. В этом случае измерение токов гармоник проводится на вводном фидере подстанции (точка 3). Такой выбор точек подключения измерительных цепей распространяется и на другие классы напряжения.

В случае наличия на шинах подстанции НН дополнительных устройств, генерирующих такой же спектр нехарактерных гармоник, необходимо такое же подключение измерительных цепей тока на вводном фидере. Наличие таких устройств лишь увеличивает токи нехарактерных гармоник, протекающих по сопротивлению предвключенной сети. Следовательно, увеличивается напряжение нехарактерных гармоник в этой точке и точность расчета гармонического сопротивления сети. В случае наличия на предприятии в сети более высокого класса напряжения устройств, также генерирующих спектр нехарактерных гармоник, необходимо подключение измерительных устройств проводить на такой подстанции (например, ГПП). При этом на основе измерений определяется гармоническое сопротивление системы относительно шин ГПП. На подстанции НН сопротивление предвключенной сети будет отличаться лишь на параметры питающей линии от НН до ГПП.

4. Расчет гармонического сопротивления сети на основе измеренных данных нехарактерных токов и напряжений высших гармоник.

Заключение. Проведенные исследования подтверждают возможность измерения гармонического сопротивления системы на основе определения реакции на нехарактерные гармоники тока, генерируемые с помощью предложенного устройства в виде ТРМ. Применение такого устройства в качестве источника нехарактерных гармоник может быть реализовано для определения сопротивления системы на частотах высших гармоник, что подтверждается исследованиями на физической и математической моделях при отсутствии нехарактерных гармоник в напряжении питающей сети. ТРМ является дешевой и простой альтернативой более дорогостоящим генераторам высших гармоник.

В качестве критерия выбора мощности ТРМ для определения гармонического сопротивления системы необходимо использовать отношение мощности короткого замыкания сети к мощности ТРМ, подключаемого в том же узле. На основании анализа значений мощности короткого замыкания в системах электроснабжения подземных горных работ было выявлено, что мощность ТРМ составит от единиц до десятков киловатт в зависимости от места его подключения. Представлена методика применения предложенного способа для систем электроснабжения подземных горных работ, которая содержит этапы предварительного анализа сети и нагрузки, выбор требуемых параметров ТРМ и мест подключения измерительных цепей тока и напряжения при наличии и отсутствии дополнительных устройств, генерирующих спектр характерных и нехарактерных гармоник во внутренней системе электроснабжения предприятия.

Существуют несколько направлений для дальнейшего исследования. Во-первых, усовершенствование ТРМ для усиления только нехарактерных гармоник и уменьшения величины основной гармоники. Модернизация ТРМ или создание нового устройства на его основе должны привести к увеличению эффективности работы генератора гармоник и уменьшению, соответственно, тепловых потерь. Во-вторых, разработка методики учета нехарактерных гармоник, возникающих во внешней системе электроснабжения. В-третьих, применение предложенного способа при натуральных измерениях с целью измерения сопротивления системы на частотах высших гармоник и разработка методики обработки измеренных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бааке Э., Шпенст В.А. Последние научные исследования в сфере электротермической металлургической обработки // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 660-668. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.660
2. Шклярский Я.Э., Шклярский А.Я., Замятин Е.О. Анализ потерь электроэнергии алюминиевого производства при наличии искажений в системе электроснабжения // Цветные металлы. 2019. № 4. С. 84-91. DOI: 10.17580/tsm.2019.04.11



3. Халифа А.А., Бажин В.Ю., Устинова Я.В., Шалаби М.Э.Х. Изучение особенностей кинетики процесса получения окатышей из красного шлама в потоке водорода // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 261-270. DOI: 10.31897/PMI.2022.18
4. Kroposki B., Johnson B., Yingchen Zhang et al. Achieving a 100% Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy // IEEE Power and Energy Magazine. 2017. Vol. 15. Iss. 2. P. 61-73. DOI: 10.1109/MP.2016.2637122
5. Nikulin A.N., Epifancev K.V., Kovshov S.V., Korshunov G.I. The research of possibility to use the machine for biofuel production as a mobile device for poultry farm waste recycling // Life Science Journal. 2014. Vol. 11. № 4. P. 464-467.
6. Zhukovskiy Y.L., Vasilev B.Y., Korolev N.A., Malkova Y.M. Analysis of the behavior of asynchronous electric drive with a closed scalar control system when changing the inductance of the magnetizing circuit // Indonesian Journal of Science and Technology. 2022. Vol. 8. № 1. P. 65-78. DOI: 10.17509/ijost.v8i1.51983
7. Morenov V., Leusheva E., Lavrik A. et al. Gas-Fueled Binary Energy System with Low-Boiling Working Fluid for Enhanced Power Generation // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 7. P. 1-15. DOI: 10.3390/en15072551
8. Шклярский Я.Э., Герра Д.Д., Яковлева Э.В., Рассылкин А. Влияние солнечной энергетики на развитие горнодобывающей отрасли в Республике Куба // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 427-440. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.12
9. Benaoadj M., Boumous Z., Boumous S. Active Harmonic Filtering for Improving Power Quality of an Electrical Network // Journal Européen des Systèmes Automatisés. 2022. Vol. 55. № 3. P. 397-403. DOI: 10.18280/jesa.550312
10. Ruuskanen V., Koponen J., Kosonen A. et al. Power quality and reactive power of water electrolyzers supplied with thyristor converters // Journal of Power Sources. 2020. Vol. 459. № 228075. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228075
11. Zhukovskiy Y., Tsvetkov P., Buldysko A. et al. Scenario Modeling of Sustainable Development of Energy Supply in the Arctic // Resources. 2021. Vol. 10. Iss. 12. № 124. DOI: 10.3390/resources10120124
12. Бельский А.А., Моренов В.А., Купавых К.С., Сандыга М.С. Электроснабжение станции нагрева нефти в скважине от ветроэлектрической установки // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62. № 2. С. 146-154. DOI: 10.21122/1029-7448-2019-62-2-146-154
13. Alexandrov V.I., Kopteva A.V., Serzan S.L. Effective Parameters of Tail Processing of Gold-Bearing Ore Hydrotransport for Verninskaya Processing Factory // Key Engineering Materials. 2020. Vol. 836. P. 25-35. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.836.25
14. Abdallah W.J., Hashmi K., Faiz M.T., Flah A., Channumsin S., Mohamed M.A., Ustinov D.A. A Novel Control Method for Active Power Sharing in Renewable-Energy-Based Micro Distribution Networks // Sustainability. 2023. Vol. 15. № 1579. DOI: 10.3390/su15021579
15. Муньос-Гихоса Х.М., Крыльцов С.Б., Соловьев С.В. Применение активного выпрямителя в качестве компенсатора токов искажений в распределительных сетях 6-10 кВ // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 229-238. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.229
16. Abramovich B.N., Ustinov D.A., Abdallah W.J. Modified proportional integral controller for single ended primary inductance converter // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2022. Vol. 13. № 2. P. 1007-1025. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp1007-1025
17. Raj L.R.L.V., Jidin A., Abdul Karim K. et al. Improved torque control performance of direct torque control for 5-phase induction machine // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2013. Vol. 3. № 4. P. 391-399. DOI: 10.11591/ijpeds.v3i4.5249
18. Lingom P.M., Song-Manguelle J., Doumbia M.L. et al. Electrical Submersible Pumps: A System Modeling Approach for Power Quality Analysis with Variable Frequency Drives // IEEE Transactions on Power Electronics. 2022. Vol. 37. Iss. 6. P. 7039-7054. DOI: 10.1109/TPEL.2021.3133758
19. Yerbayev Y., Artyukhov I., Zemtsov A. et al. Negative Impact Mitigation on the Power Supply System of a Fans Group with Frequency-Variable Drive // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 23. № 8858. DOI: 10.3390/en15238858
20. Jopri M.H., Abdullah A.R., Manap M. et al. An Improved Of Multiple Harmonic Sources Identification In Distribution System With Inverter Loads By Using Spectrogram // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2016. Vol. 7. № 4. P. 1355-1365. DOI: 10.11591/ijpeds.v7.i4.pp1355-1365
21. Shawon M.H., Barczentewicz S.H., Bień A., Hanelka Z. Localization of Harmonic Sources in Power System – Simulation and Laboratory Study // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2016. № 14. P. 546-551. DOI: 10.24084/repqj14.388
22. Martinez R., Castro P., Arroyo A. et al. Techniques to Locate the Origin of Power Quality Disturbances in a Power System: A Review // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 12. № 7428. DOI: 10.3390/su14127428
23. Srikanth P., Koley C. Deep learning and signal processing based algorithm for autorecognition of harmonic loads // Journal of Intelligent and Fuzzy Systems. 2022. Vol. 42. № 2. P. 1171-1184. DOI: 10.3233/JIFS-189780
24. Kasemuan S.M., De Beer A.S., Pretorius J.H.C. A Practical Method to Identify Contributions of Harmonics in Power Systems: Method and Application // International Review of Electrical Engineering. 2021. Vol. 16. № 4. P. 304-315. DOI: 10.15866/iree.v16i4.19194
25. Mokoena B., Eboule P.S.P., Pretorius J.H.C. Medium voltage consumers' cost evaluation connected to a micro-grid PV system // Energy Reports. 2022. Vol. 8. S. 10. P. 235-244. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.05.105
26. Jopri M.H., Abdullah A.R., Sutikno T. et al. A Diagnostic Analytics of Harmonic Source Signature Recognition by Using Periodogram // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2018. Vol. 8. № 6. P. 5399-5408. DOI: 10.11591/ijece.v8i6.pp5399-5408
27. Ebadi M., Bayat M., Asadi H. Evaluating maximum permissible feeder current in capacitive compensated harmonic polluted networks introducing Apparent RMS Current Ratio Index (ACRI) // Electric Power Systems Research. 2020. Vol. 187. № 106511. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106511
28. Yaqiong Li, Zhanfeng Deng, Tongxun Wang et al. Coupled Harmonic Admittance Identification Based on Least Square Estimation // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 10. № 2600. DOI: 10.3390/en11102600

29. *Xia Zhou, Yishi Liu, Ping Chang et al.* Voltage Stability Analysis of a Power System with Wind Power Based on the Thevenin Equivalent Analytical Method // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Iss. 11. № 1758. DOI: 10.3390/electronics11111758
30. *Ahmed E.F., Said E.-S.S.A., Abdel Mageed H.M., Ammar A.A.* A novel interactive technique for load current harmonic reduction for any randomly utilized household equipment // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2022. Vol. 13. № 4. P. 2159-2171. DOI: 10.11591/ijped.v13.i4.pp2159-2171
31. *Azebaze Mboving C.S., Hanzelka Z., Firlit A.* Analysis of the Factors Having an Influence on the LC Passive Harmonic Filter Work Efficiency // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 5. № 1894. DOI: 10.3390/en15051894
32. *Singh R.S., Ćuk V., Cobben S.* Measurement-Based Distribution Grid Harmonic Impedance Models and Their Uncertainties // *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 16. № 4259. DOI: 10.3390/en13164259
33. *Wanjun Lei, Cheng Nie, Mingfeng Chen et al.* A Fast-Transient Repetitive Control Strategy for Programmable Harmonic Current Source // *Journal of Power Electronics*. 2017. Vol. 17. Iss. 1. P. 172-180. DOI: 10.6113/JPE.2017.17.1.172
34. *Kanálik M., Margitová A., Bena L., Kanáliková A.* Power System Impedance Estimation Using a Fast Voltage and Current Changes Measurements // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 1. № 63. DOI: 10.3390/en14010063
35. *Yang Wang, Wilsun Xu, Jing Yong.* An Adaptive Threshold for Robust System Impedance Estimation // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019. Vol. 34. Iss. 5. P. 3951-3953. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2924349
36. *Sommer S., Aabrandt A., Jóhannsson H.* Reduce-factor-solve for fast Thevenin impedance computation and network // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2019. Vol. 13. Iss. 2. P. 288-295. DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.5330
37. *Ziteng Liu, Yonghai Xu, Haiwei Jiang, Shun Tao.* Study on Harmonic Impedance Estimation and Harmonic Contribution Evaluation Index // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 59114-59125. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2982950
38. *Skamyin A., Shklyarskiy Y., Dobush V., Dobush I.* Experimental Determination of Parameters of Nonlinear Electrical Load // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 22. № 7762. DOI: 10.3390/en14227762

Авторы: А.Н.Скамьин, канд. техн. наук, доцент, skamin_an@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7738-7539> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), В.С.Добуш, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-9401-5638> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), М.Х.Жопри, PhD, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-6902-0099> (Малаккский технический университет Малайзии, Малакка, Малайзия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Перспективы применения генерации на возобновляемых источниках энергии на угледобывающих предприятиях

Ф.С.НЕПША^{1,2}✉, К.А.ВАРНАВСКИЙ¹, В.А.ВОРОНИН¹, И.С.ЗАСЛАВСКИЙ¹, А.С.ЛИВЕН¹

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия

² РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Непша Ф.С., Варнавский К.А., Воронин В.А., Заславский И.С., Ливен А.С. Перспективы применения генерации на возобновляемых источниках энергии на угледобывающих предприятиях // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 455-469. EDN LNSCEY

Аннотация. Рассматривается проблема развития возобновляемой энергетики на угледобывающих предприятиях Российской Федерации. Представлена методология оценки технико-экономической эффективности внедрения возобновляемых источников энергии на базе имитационного моделирования. Проведен анализ потенциала солнечной и ветровой энергетики для угледобывающих регионов РФ. С применением авторской программы для ЭВМ выполнено моделирование режима работы системы электроснабжения для следующих сценариев внедрения генерации на возобновляемых источниках энергии: солнечной генерации, ветрогенерации, солнечной генерации с накопителем энергии, ветрогенерации и солнечной генерации. По итогам расчета представлен технико-экономический анализ рассмотренных вариантов на примере Ростовской обл. Выполнен анализ чувствительности инвестиционного проекта в условиях неопределенности развития российской возобновляемой энергетики. Сделан вывод, что даже в условиях создания рынка квот на выбросы CO₂ и установления цен на уровне Сахалинского эксперимента возобновляемая энергетика на предприятиях минерально-сырьевого комплекса в РФ остается малопривлекательной и требует дополнительной поддержки.

Ключевые слова: энергоэффективность; возобновляемая энергетика; распределенная генерация; декарбонизация угольных шахт; имитационное моделирование

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2021-138/3).

Поступила: 02.04.2023

Принята: 20.06.2023

Онлайн: 19.07.2023

Опубликована: 19.07.2023

Введение. В соответствии с ратифицированными Киотским протоколом к Рамочной конвенции ООН об изменении климата, Парижским соглашением, а также договоренностями, принятыми на Конференции об изменении климата в Глазго (2021) и Шарм-эль-Шейхе (2022), Российской Федерации взяла на себя обязательства по сокращению углеродного следа за счет декарбонизации экономики [1]. Многие страны активно вводят углеродные платежи, заявляют о полном отказе от ископаемых энергоресурсов, включая уголь, и ставят цель достижения углеродной нейтральности в период 2045-2060 гг. [2]. Несмотря на это, угольная промышленность продолжает играть существенную роль в мировой энергетике. По данным на 2021 г.¹, уголь обеспечивал около 27 % мирового энергопотребления (10,9 % в России), а на долю электроэнергетики приходилось 36,7 % потребления угля в мире (17,3 % в России). Особенно велика доля использования угля в странах Азии: Китай – 62,93, Индия – 74,17, Индонезия – 61,46 %. По данным аналитических отчетов EIA и IEA, уголь сохранит значительную роль в электроэнергетике вплоть до 2050 г. Таким образом, несмотря на активное лоббирование мер по декарбонизации экономики и постоянному увеличению объемов использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), угольная промышленность остается важной составляющей глобального энергетического баланса.

¹ Ritchie H., Roser M., Rosado P. Energy. URL: <https://ourworldindata.org/energy> (дата обращения 14.04.2023).



Однако внедрение стратегии декарбонизации экономики не единственный вызов для угольной отрасли России. Беспрецедентное санкционное давление, переориентация на новые рынки сбыта в страны Юго-Восточной Азии и Индийского океана, увеличение логистической цепи и стоимости перевозок, волатильность экспортных цен также являются серьезными внешними шоками для угольной промышленности России [3]. Особую важность приобретает повышение конкурентоспособности российских угольных компаний за счет введения современных технологий, таких как IoT (интернет вещей) и Big Data (большие данные), а также энергетической эффективности электроснабжения угольных предприятий [4]. Внедрение угольными компаниями высокоеффективных технологий, в том числе цифровых, в процессах добычи и переработки угля предусмотрено Программой развития угольной промышленности России на период до 2035 г. Крупные инвестиции также направлены на создание комплекса технологий, повышающих эффективность угледобычи и углепереработки².

Одним из путей снижения углеродного следа России без ущерба для угольной промышленности является «озеленение» внутреннего электропотребления угольных шахт за счет внедрения распределенной генерации. В исследованиях [5, 6] отмечены возможности снижения расходов на покупку электроэнергии из сети и объемов выбросов углекислого газа угольными шахтами при использовании собственной генерации на шахтном метане. Актуальность и необходимость генерации на ВИЭ в условиях предприятий минерально-сырьевого комплекса (МСК) обоснована в работе [7]. В статье [8] рассмотрены возможности интеграции собственной генерации на основе ВИЭ для предприятий МСК, дана положительная оценка использованию ВИЭ для обеспечения электро- и теплоснабжения. Работа [9] посвящена исследованию эффективности применения гибридных энергетических комплексов на основе солнечных, ветряных и дизельных электростанций, а также замены дизельного транспорта на водородный для угольных шахт Северного Китая. Отмечен высокий потенциал по сокращению выбросов CO₂ и снижению расхода дизельного топлива. В исследовании [10] проведена оценка эффективности внедрения когенерации на шахтном метане и отмечена значительная зависимость инвестиционной привлекательности проекта от тарифов на выбросы CO₂. Известен ряд проектов по использованию ВИЭ на предприятиях МСК: внедрение мобильных солнечных электростанций компании SunShift (Австралия) на угольных разрезах³, гибридной солнечной электростанции мощностью 36 МВт на золотодобывающей шахте на юго-западе Мали⁴, карьерных самосвалов с электродвигателями и последующим развитием инфраструктуры заряда электротранспорта в качестве одного из вариантов диверсификации бизнеса.

В перечисленных работах отмечается, что использование ВИЭ в системах электроснабжения предприятий МСК позволит снизить углеродный след, себестоимость угледобычи за счет сокращения затрат на энергоресурсы, а также повысить надежность, сократить финансовый ущерб от перерывов электроснабжения и создать новые высокотехнологичные рабочие места.

Постановка проблемы. Использование ВИЭ на промышленных предприятиях рассматривалось многими учеными. В работе [11] проанализирована возможность достижения энергетической независимости промышленных предприятий за счет применения ВИЭ. Отмечено, что внедрение ВИЭ в энергосистемы общего пользования вызывает определенные трудности, связанные с ростом цен на электроэнергию, сложностью управления и снижением надежности. При этом сделан вывод о хороших перспективах применения ВИЭ в качестве децентрализованных источников энергии в системах энергоснабжения промышленных предприятий, т.е. источников энергии только для потребителей предприятия без возможности выдачи энергии в сеть общего пользования.

² Распоряжение Правительства РФ от 11.05.2022 № 1144-р «Об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения».

³ SunSHIFT Global Fleet of Modular Moveable Megawatt Scale Solar Assets. URL: <https://www.climatefinancelab.org/ideas/sunshift-global-fleet-of-modular-moveable-megawatt-scale-solar-assets/> (дата обращения 20.06.2023).

⁴ Takouleu J.M. MALI: Reuniwatt to build weather forecasting system for Fekola solar hybrid power plant. URL: <https://www.afrik21.africa/en/mali-reuniwatt-to-build-weather-forecasting-system-for-fekola-solar-hybrid-power-plant/> (дата обращения 11.03.2023).



В исследовании [12] предложена система управления энергетической гибкостью на промышленных предприятиях. Результаты показывают положительный эффект от внедрения ВИЭ на промышленном предприятии при развитии рынка энергетической гибкости. В статье [13] сделан вывод о высоком потенциале возобновляемых источников на территории РФ после оценки данных о солнечной активности и скорости ветра в регионах. Отмечается несовпадение периодов максимума солнечной радиации и скорости ветра для ряда регионов РФ в течение суток. В связи с этим рекомендовано использование гибридных электростанций «солнце – ветер» для минимизации установленной мощности генерации в микрогридах. К подобному выводу приходят зарубежные исследователи [14], которые рассмотрели применение гибридной электростанции (фото- и ветроэлектростанция). Такой вариант обеспечил снижение затрат на электроэнергию с 5300000 до 2400000 дол./г и получение дополнительной прибыли от продажи электроэнергии в сеть 1300000 млн дол./г при сроке окупаемости проекта около шести лет.

Ученые университета Цинхуа [15] изучают задачу выбора оптимального сочетания солнечной генерации, ветрогенерации и биогазовой генерации для электрификации сельской местности. Рассмотрено множество вариантов развития сети с внедрением различных сочетаний генерации на ВИЭ. Наиболее целесообразным оказался гибридный, где сеть поселка может работать параллельно и изолированно от энергетической системы. Отмечено положительное влияние внедрения объектов распределенной энергетики на окружающую среду и социальные аспекты.

В качестве решения для повышения надежности электроснабжения нефтедобывающего сектора в работе [16] рассмотрено использование ветро-дизельных установок для питания погружных электродвигателей электроцентробежных насосов на скважинах нефтедобычи. В статье [17] исследовано внедрение на объектах нефтедобычи когенерационной установки с возможностью дополнительной электрогенерации при малой потребности в тепле. Такая система может быть перспективна на угольных шахтах с применением метана в качестве первичного энергоносителя.

В работе [18] китайскими исследователями представлена гибридная система энергоснабжения, включающая ветровые и солнечные генерирующие источники, а также гидроаккумулирующую электростанцию (ГАЭС). ГАЭС выступает в качестве резервного источника энергии в безветренные дни и дни с повышенной облачностью, обеспечивая устойчивость работы системы энергоснабжения. В качестве резервуаров для хранения воды предлагается использовать отработанные подземные горные выработки угольных шахт Нинся-Хуэйского автономного района Китая. Подобный вариант предложен испанскими учеными [19] для условий отработанных угольных шахт Астурийского угольного бассейна Испании. Представлены гидродинамические модели, отражающие движение потоков шахтных вод. Отмечается, что отсутствие подобных моделей тормозит реализацию проектов по созданию ГАЭС в условиях подземных выработок из-за невозможности оценки их эффективности. В работе [20] эти же исследователи анализируют технико-экономическую целесообразность использования шахтной воды из затопленных угольных шахт для обеспечения тепловой и электрической энергией потребителей, расположенных в близлежащих районах. Разработанная экономическая модель показывает, что эксплуатационные качества подобной системы энергоснабжения зависят от многих факторов, но при должной проработке вариантов реализации могут оказаться весьма эффективными и позволят оптимизировать расходы потребителей на энергоснабжение, а также снизить выбросы углекислого газа в окружающую среду.

В статье [21] рассмотрена проблема определения оптимального расположения ГАЭС в условиях подземных выработок на примере китайской провинции Шаньси. В основу исследования положен многокритериальный метод принятия решения, приводится четыре оценочных критерия, представлен ряд количественных показателей для реальных примеров. Отмечается необходимость совершенствования метода введением дополнительных оценочных критериев.

Еще одно исследование по проблеме оптимального расположения ГАЭС в подземных выработках закрытых шахт, проведенное европейскими учеными, представлено в работе [22]. Приведена математическая модель, с помощью которой оценивается влияние гидрогеологических факторов, химического состава пород и др. при выборе места размещения подземной ГАЭС.

В статье [23] представлен анализ текущего состояния и тенденций применения ВИЭ предприятиями австралийской горной промышленности. Отмечены как факторы, стимулирующие использование ВИЭ горными предприятиями, так и проблемы, препятствующие их широкому внедрению.



При этом указывается, что из-за недостаточной научно-технической проработки вопросов применения ВИЭ на предприятиях МСК процент горных предприятий Австралии, использующих ВИЭ, остается низким и составляет порядка 7 %.

Работа [24] посвящена исследованию возможностей оптимизации энергопотребления при помощи использования ВИЭ на примере зимбабвийских шахт. Показано, что использование традиционных методов повышения энергоэффективности (оптимизация режима работы, повышение коэффициента мощности и т.п.) без ВИЭ является самым оптимальным вариантом с точки зрения экономической эффективности. Однако ВИЭ могут быть эффективными при проработке механизмов их окупаемости.

В статье [25] предлагается разработанный многокритериальный алгоритм работы диспетчерского центра комплексной энергетической системы, использующей в качестве первичных энергоснителей шахтный метан, шахтные воды и т.п. Алгоритм опробован в условиях угольной шахты и позволяет решать широкий спектр задач от оптимизации энергопотребления и повышения надежности энергоснабжения до сокращения выбросов парниковых газов.

В работе [26] предложена модель комплексной системы энергоснабжения угольной шахты с устройствами накопления энергии и ВИЭ. На этой модели при использовании реальных данных одной из угольных шахт Западного Китая был отработан алгоритм двухстадийной оптимизации системы энергоснабжения в условиях неопределенности. Результатом применения алгоритма явилась возможность оптимальной загрузки энергетического оборудования, позволяющая повысить энергоэффективность и надежность системы энергоснабжения угольной шахты.

Исследователями из Виргинского университета в статье [27] предложена концепция использования отработанных нефтяных и газовых скважин, а также отработанных подземных горных выработок угольных шахт в качестве накопителей сжатого воздуха, которые могут применяться для стабилизации работы близлежащих ветряных электростанций в безветренные дни. Отмечается сложность реализации подобных проектов, но при этом указывается на существенный социально-экономический эффект от развития инфраструктуры, создания новых рабочих мест, а также толчок в развитии горной науки в направлении поиска и обоснования альтернативных подходов к эксплуатации горных выработок.

В статье [28] исследуется возможность применения низкопотенциальных источников тепла, характерных для предприятий угольной промышленности. Представлена принципиальная схема комплексной переработки шахтных вод с получением тепловой энергии, питьевой и технической воды (пригодной, например, для агропромышленного комплекса). По мнению авторов, использование предложенной схемы позволит повысить надежность теплоснабжения промышленных и бытовых потребителей, а также снизить негативное воздействие угольной промышленности на окружающую среду.

В работе [29] представлено тематическое исследование, посвященное возможностям использования подземных выработок угольных шахт в качестве ГАЭС, накопителей энергии сжатого воздуха, а также источников геотермальной энергии. Отмечается, что энергетический потенциал подземных выработок составляет порядка 197 ГВт·ч/г при значительном сокращении выбросов CO₂.

В статье [30] приводятся результаты использования шахтных вод затопленного медного рудника в штате Мичиган (США) в качестве источника тепловой энергии для близлежащих потребителей. Сделан вывод о высокой эффективности предлагаемых решений. Отмечается, что опыт применения данных технологий может быть использован не только в США, но и в других горнодобывающих регионах мира.

Тема оптимального использования шахтных вод в качестве источника энергии в условиях закрытой шахты Маркхэм Кольери (Великобритания) приведена в работе [31], где исследуется химический состав шахтных вод, предлагаются мероприятия по повышению эффективности работы энергетического оборудования, а также увеличению срока его службы.

Статья [32] посвящена исследованию алгоритма управления электротехническим комплексом, включающим ветроэнергетическую установку, аккумуляторные батареи и дизель-генератор. Отмечено, что учет в алгоритме управления климатических факторов и прогнозных данных по энергопотреблению на сутки вперед повышает эффективность работы системы электроснабжения. Использование полученных результатов актуально при анализе моделей систем электроснабжения



с ВИЭ для отечественных предприятий МСК, так как климатические условия в местах разработки месторождений полезных ископаемых в России могут кардинально отличаться.

Несмотря на значительное количество исследований в области внедрения ВИЭ на промышленных предприятиях, вопрос об их эффективности на угледобывающих предприятиях РФ остается недостаточно проработанным и требует дополнительных исследований для оценки целесообразности внедрения ВИЭ на стадиях строительства и модернизации предприятий. Эффективность возобновляемой генерации и ее включение в систему электроснабжения угольной шахты оцениваются с использованием авторской программы для ЭВМ, разработанной на языке программирования Python и специализированных библиотек `pvlib` и `windpowerlib`.

Методология. Существует ряд зарубежных программ, позволяющих провести имитационное моделирование гибридной системы электроснабжения. Среди них HOMER, iHOGA, PVsyst, SAM, RETScreen Expert, EnergyPlan и многие другие [33]. Наиболее эффективной и удобной является HOMER PRO, которая превосходит другие программы с аналогичным функционалом [34]. Но программа Homer PRO не учитывает особенности российского рынка электрической энергии и мощности. Возникает необходимость разработки отечественных программ, которые могли бы учесть эти особенности и в дальнейшем использоваться для предварительного тестирования и отработки систем управления объектами распределенной энергетики. Ниже приводится описание разработанной авторами программы для ЭВМ, выполняющей следующие функции:

- генерация профиля выработки электрической энергии на ВИЭ с применением данных о местоположении, с учетом сезонности и заданной установленной мощности;
- формирование годового баланса для гибридной системы электроснабжения при использовании оптимальных алгоритмов управления;
- построение финансово-экономической модели, позволяющей оценить чувствительность инвестиционного проекта и риски его реализации.

Отметим, что зарубежное программное обеспечение теоретически может решить эти проблемы, однако возникают сложности при реализации финансово-экономической модели для российского рынка электрической энергии. При этом используемые алгоритмы оптимизации не описаны достаточно подробно, чтобы их можно было реализовать в рамках реальной системы управления. По мнению авторов ПО, для выбора оптимального состава оборудования гибридная система электроснабжения и ее автоматизированная система управления должны быть связаны между собой общими алгоритмами управления. Это позволит с высокой степенью достоверности гарантировать, что результаты, полученные в ходе оптимизации состава оборудования, будут соответствовать реальному опыту эксплуатации системы управления.

Структура имитационной модели. На рис.1 представлена схема модели системы электроснабжения предприятия МСК, на котором рассматривается внедрение ВИЭ. В состав такой модели входят следующие компоненты:



Рис.1. Структурная схема имитационной модели гибридной системы электроснабжения



• внешняя электрическая сеть, параметры которой определяются регионом подключения предприятия МСК, а также договором купли-продажи электрической энергии и договором на услуги по передаче электрической энергии. В некоторых случаях для небольших предприятий со сбытовой компанией может заключаться только один договор энергоснабжения;

• электрическая нагрузка, представленная горно-шахтным оборудованием и собственными нуждами объектов распределенной энергетики. В имитационной модели для задания профиля потребления используется график нагрузки одной из угольных шахт Кузбасса. Допускается, что он подобен графику нагрузки для угольных шахт других регионов. Учитывая круглосуточный режим работ предприятий, такое допущение вполне приемлемо;

• генерация ВИЭ состоит из ветровой электростанции (ВЭС) и (или) фотоэлектрической электростанции (ФЭС). В рамках имитационного моделирования сначала выполняется формирование профиля генерации с использованием библиотек `pvlib` и `windpowerlib`. Далее в расчетах используются годовые профили ветро- и солнечной генерации;

• система накопления электрической энергии (СНЭЭ) представлена подсистемами накопления (аккумуляторная батарея) и преобразования (инвертор).

Алгоритм технико-экономической оценки внедрения ВИЭ представлен на рис.2 и включает следующие этапы:

• Задание местоположения. Осуществляется ввод координат рассматриваемого объекта, которые используются при формировании запросов к внешним сервисам.

• Загрузка данных из внешних сервисов. Формируются запросы данных по метеорологическим параметрам (солнечная радиация, температура воздуха, атмосферное давление, скорость ветра) с использованием API NASA POWER.

• Задание профиля электропотребления. Выполняется ввод профилей электропотребления электрооборудования.

• Задание параметров генерирующего оборудования. Выполняется ввод параметров основного оборудования гибридного энергетического комплекса: солнечная электростанция, ВЭС, СНЭЭ.

• Формирование профиля генерации ВИЭ. Осуществляется на основе данных о местоположении объекта и заданных параметров по номинальным мощностям ФЭС, ВЭС и СНЭЭ. Для расчета профилей генерации ФЭС и ВЭС используются `python`-библиотеки `pvlib` и `windpowerlib`, позволяющие учитывать основные характеристики фотоэлектрических панелей с инверторами и параметры ветротурбин.

• Имитационное моделирование и расчет балансов. Выполняется расчет балансов, а именно профилей потребления мощности из электрической сети с использованием полученных профилей генерации ВИЭ и заданного профиля электрической нагрузки. При наличии СНЭЭ обеспечивается его оптимальное управление с целью снижения потребления мощности в час пиковой нагрузки и поглощения избытка генерации ВИЭ.

• Расчет NPV и LCOE. Для оценки энергоэффективности рассматриваемой гибридной системы электроснабжения выполняется расчет чистого дисконтированного дохода (NPV) и нормированной стоимости электроэнергии (LCOE):

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{CF_n}{(1+i)^n} - CAPEX, \quad (1)$$

где CF_n – денежный поток за n -й год; $CAPEX$ – вложенный инвестиционный капитал; N – продолжительность проекта, лет; i – ставка дисконтирования, принятая на уровне 7,5 %.

В части доходов экономическая модель учитывает получаемую экономию за счет снижения объемов электроэнергии, покупаемой из сети, а также штрафов за косвенные выбросы углекислого газа в атмосферу. В части расходов – капитальные вложения в покупку оборудования и операционные расходы, включающие регулярное техническое обслуживание.

Для оценки рентабельности генерации на ВИЭ выполняется расчет приведенной стоимости электроэнергии, представляющей собой стоимость производства одного киловатта в час электроэнергии в течение всего жизненного цикла проекта:

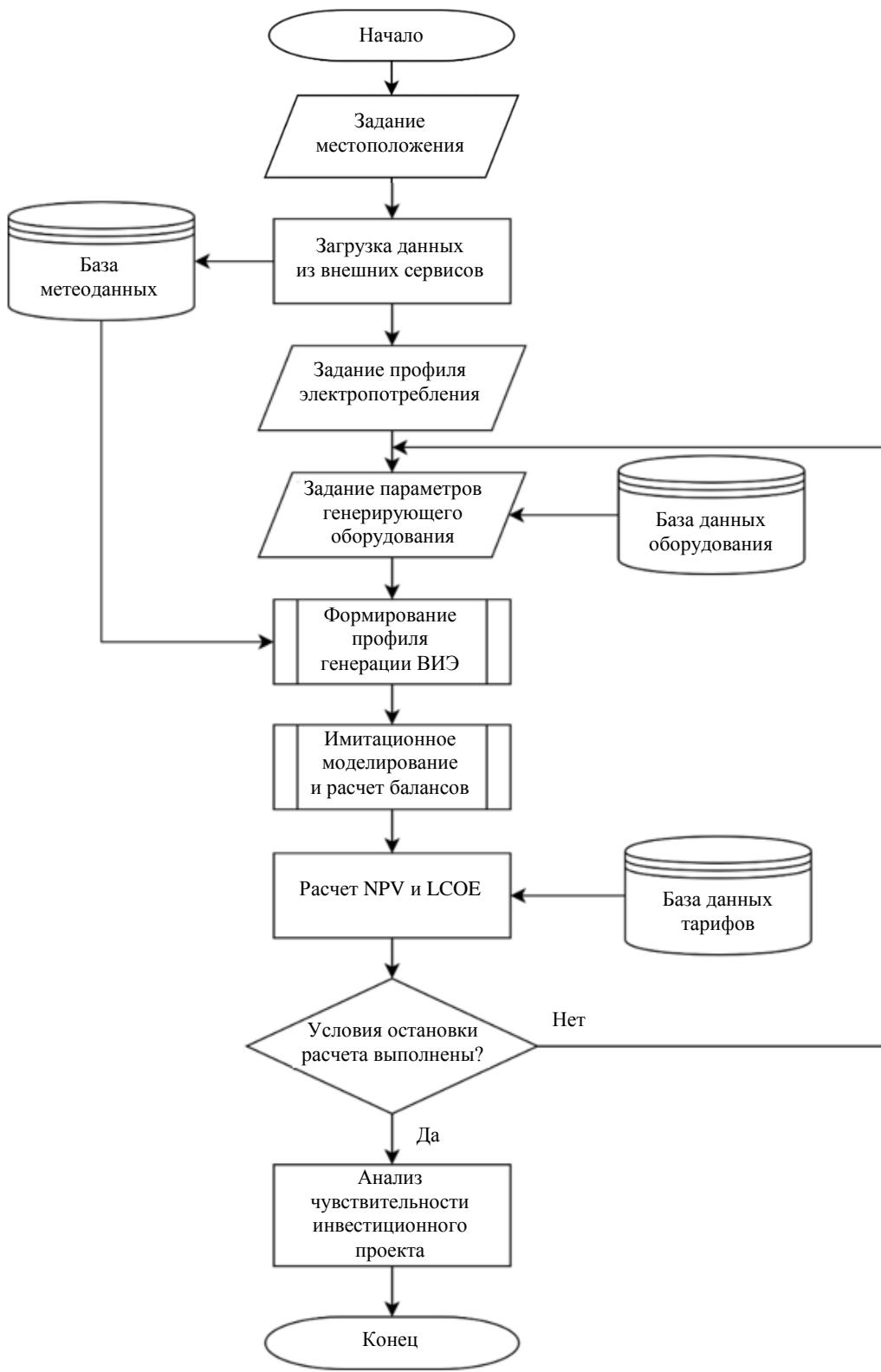


Рис.2. Алгоритм технико-экономической оценки внедрения ВИЭ на предприятии МСК

$$LCOE = \frac{EUAC}{E_{\text{ген}}}, \quad (2)$$

где EUAC – эквивалентная годовая стоимость с учетом дисконтирования, млн руб./г; $E_{\text{ген}}$ – генерация электроэнергии за год, ГВт·ч.



Эквивалентная годовая стоимость с учетом дисконтирования определяется по формуле

$$EUAC = NPC \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1}, \quad (3)$$

где NPC – чистая приведенная стоимость, млн руб.,

$$NPC = \sum_{t=0}^N \frac{OPEX_t}{(1+i)^t} + CAPEX, \quad (4)$$

$OPEX_t$ – операционные затраты в t -й год, млн руб.

Снижение косвенного углеродного следа за год рассчитывается по формуле (3):

$$CO_2_{\text{сниж}} = 1000 EF_{CO_2, \text{год}} E_{\text{ген}}, \quad (5)$$

где $EF_{CO_2, \text{год}}$ – коэффициент выбросов диоксида углерода CO_2 , т/МВт·ч, принятый по данным сайта АО «АТС»⁵.

В качестве условия для остановки расчета принято условие максимизации NPV :

$$\max NPV(P_{\PhiEC}, P_{BEC}, P_{CH3E}) \text{ при } \begin{cases} 0 \leq P_{\PhiEC} \leq P_{\PhiECmax}; \\ 0 \leq P_{BEC} \leq P_{BECmax}; \\ 0 \leq P_{CH3E} \leq P_{CH3Emax}, \end{cases} \quad (6)$$

где P_{\PhiEC} , P_{BEC} , P_{CH3E} – установленные мощности ФЭС, ВЭС и СНЭЭ, МВт; P_{\PhiECmax} , P_{BECmax} , $P_{CH3Emax}$ – максимальные значения установленной мощности ФЭС, ВЭС и СНЭЭ, ограничивающие область поиска оптимального решения, МВт.

Наряду с экономическими эффектами также рассчитывались социальные. Согласно статье [35], потенциал ФЭС к образованию новых рабочих мест составляет $0,27549 \cdot 10^{-7}$ кВт·ч/г.

• Анализ чувствительности инвестиционного проекта. Определяется чувствительность срока окупаемости к изменению удельной стоимости установленной мощности ФЭС, ВЭС, СНЭЭ, ставки дисконтирования, стоимости электрической энергии и мощности. Разработанная программа для ЭВМ может быть использована для подбора оптимальной конфигурации генерации на ВИЭ на других промышленных предприятиях.

Обсуждение результатов. В качестве объекта исследования рассмотрена система электроснабжения угольной шахты. Для моделирования электропотребления использован временной ряд почасовых измерений потребляемой мощности за 2020 г., полученный от одной из угольных шахт Кемеровской обл. Данный массив охватывает временной период в один год и включает 8784 измерения. Дальнейший анализ выполнен при допущениях о том, что такой временной ряд с достаточной точностью характеризует профили электропотребления угледобывающих предприятий России, а также незначительно изменяется на горизонте оценки экономического эффекта представленных в работе решений. Рассматриваемая шахта работает в круглосуточном режиме. Среднегодовое потребление угольной шахты составляет 8,51 МВт. Сезонный и суточный профили нагрузки представлены на рис.3. По данным рис.3, *a* видно, что пики потребления угольной шахты чаще всего приходятся на период после полудня – 20 ч 00 мин по местному времени. При этом почасовые значения потребления могут колебаться от 2,6 до 17 МВт. Заметна цикличность технологического процесса угольной шахты. Наиболее нагруженными часами являются 3-4, 12 и 17 ч. Отмеченные интервалы максимальной нагрузки частично попадают в плановые часы пиковые нагрузки для оптового и розничного рынков, а также в час пиковых нагрузок в субъекте РФ. По данным рис.3, *b* видно, что нагрузка шахты имеет минимальное значение в летние месяцы и максимальное потребление в осенний и весенний периоды. Сезонные колебания потребления

⁵ Коэффициент выбросов диоксида углерода по Первой синхронной зоне ЕЭС России АО «АТС». URL: <https://www.atsenergo.ru/results/CO2> (дата обращения 05.08.2022). Для расчетов принято фактическое значение коэффициента выбросов CO_2 за 2022 год – 0,348 т/МВт·ч.

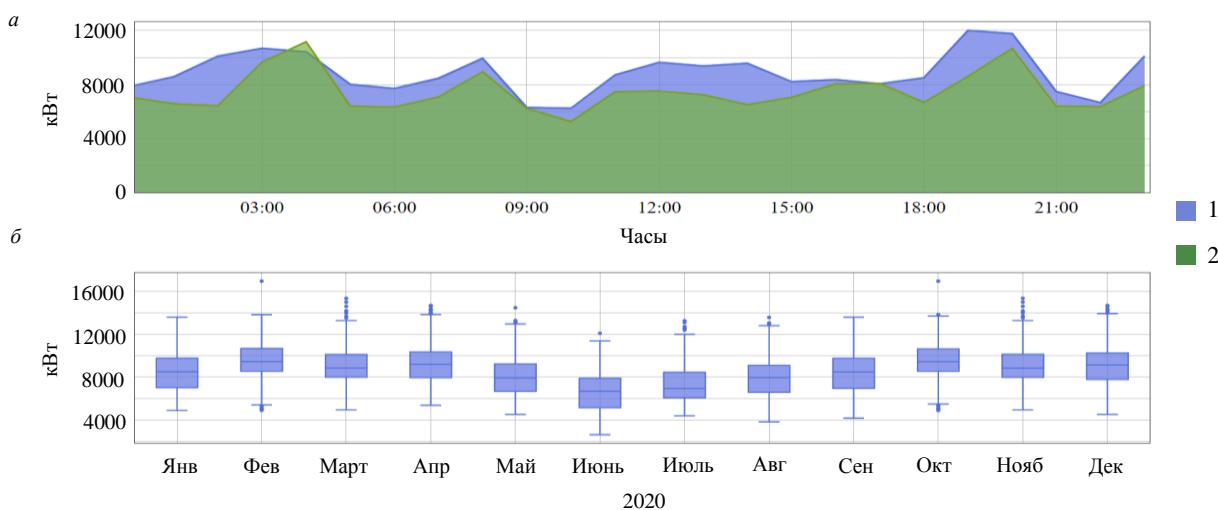


Рис.3. Профили нагрузки рассматриваемой угольной шахты: *а* – суточный профиль; *б* – годовой профиль
1 – зима; 2 – лето

угольной шахты составляют около 25 %. Дальнейшее рассмотрение эффективности внедрения ВИЭ производится для основных угледобывающих регионов РФ.

Среднегодовые значения параметров, характеризующих потенциал ВИЭ угледобывающих регионов, представлены в табл.1. Данные табл.1 показывают, что наибольшим потенциалом солнечной энергии обладает Ростовская обл. – суммарная солнечная инсоляция в ней выше на ~25-30 %, чем в остальных рассмотренных регионах. Отметим, что наибольшее значение солнечной активности фиксируется в июне, тогда как наименьшее в декабре. Индекс чистоты неба колеблется для регионов в пределах от 0,55 в зимние месяцы до 0,72 о.е. в весенний период.

Таблица 1

Среднегодовые значения параметров по регионам

Параметр	Ростовская обл.	Республика Саха	Кемеровская обл.	Сахалинская обл.	Забайкальский край	Приморский край	Красноярский край	Республика Коми	Республика Хакасия
Солнечная инсоляция за день, кВт·ч/м ²	3,85	2,98	3,01	3,09	3,36	3,62	2,66	2,29	3,31
Индекс чистоты неба, о.е.	0,66	0,66	0,66	0,69	0,72	0,7	0,66	0,61	0,68
Скорость ветра, м/с	6,80	3,66	5,57	5,26	4,89	4,54	5,52	4,76	5,25

Показатели скорости ветра были получены из базы данных NASA⁶ для высоты поверхности 50 м. На рассмотренных территориях значение средней скорости ветра в течение года варьируется от 3 до 9 м/с. Наибольшим потенциалом ветровой энергии обладает Ростовская обл. со среднегодовым значением скорости ветра 6,8 м/с, наименьшим – Республика Саха со значением 3,66 м/с, что ниже на 54 %. Наибольшая скорость ветра наблюдается в зимние и весенние месяцы.

Наиболее привлекательным регионом для внедрения ВЭС и ФЭС оказалась Ростовская обл., имеющая наибольший потенциал для ветро-гелиоэнергетики. Далее рассматривается установка генерации на ВИЭ только в Ростовской обл. как наиболее привлекательного региона с точки зрения потенциала ВИЭ.

Осуществляется имитационное моделирование и расчет балансов. Структурные схемы представлены на рис.4. Удельные значения капитальных и операционных затрат, принятые для имитационного моделирования, определены в результате анализа Приказа Минэнерго России⁷ и представлены в табл.2.

⁶ NASA Prediction of Worldwide Energy Resources. URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (дата обращения 01.03.2023).

⁷ Приказ Минэнерго России от 28.02.2022 № 146 «Об утверждении схемы и программы развития единой энергетической системы России на 2022-2028 годы».

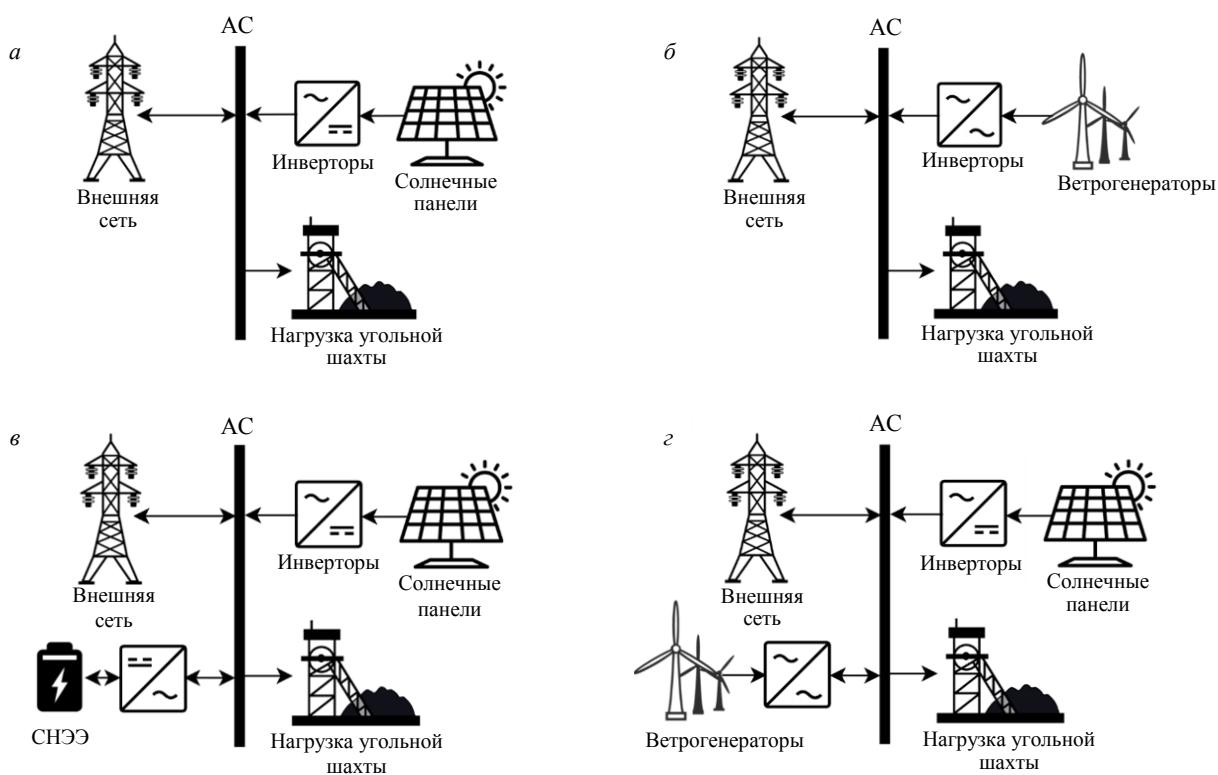


Рис.4. Рассматриваемые варианты гибридного энергетического комплекса: *а* – солнечная генерация; *б* – ветрогенерация; *в* – солнечная генерация и система накопления энергии; *г* – солнечная генерация и ветрогенерация

Таблица 2

Удельные значения капитальных и операционных затрат

Элемент гибридной СЭС	ФЭС	ВЭС	СНЭ
Капитальные затраты ⁸	800 дол./кВт/ 61850 руб./кВт	2000 дол./кВт/ 154650 руб./кВт	800 дол./кВт·ч/ 61850 руб./кВт
Операционные затраты за год	23 дол./кВт/ 1778 руб./кВт	100 дол./кВт/ 7732 руб./кВт	12 дол./кВт/ 928 руб./кВт

Для подбора установленной мощности солнечных панелей был использован метод покоординатного спуска [36] – постепенное уменьшение установленной мощности ФЭС, начиная со значения, равного пиковому потреблению рассматриваемой угольной шахты. При этом с помощью библиотеки *pvlib* осуществлялся подбор необходимого количества солнечных панелей и инверторов. Критерием для оптимизации выступал чистый дисконтированный доход за 10 лет (6). В процессе поиска оптимальной конфигурации было установлено, что оптимальная установленная мощность ФЭС для Ростовской обл. составляет 8 МВт (51040 поликристаллических солнечных панелей ET-P660255WWAC от компании ET Solar Industry мощностью 255 Вт и размером 1640×992 мм) с занимаемой площадью 15 га. На рис.5 приведен график энергетического баланса угольной шахты в период максимальной солнечной генерации. Подбор установленной мощности ВЭС выполнялся аналогичным образом. Оптимальным вариантом оказалась установка одной ветровой турбины марки E-53/800 суммарной установленной мощностью 0,8 МВт. В случае внедрения СНЭ и ФЭС в качестве исходной мощности для ФЭС было принято значение установленной мощности ФЭС, определенное в первом сценарии. При этом накопитель использовался для ценового арбитража и поглощения избыточной солнечной генерации в часы максимума солнечной активности с целью дальнейшего разряда в часы пиковой нагрузки. На рис.6 приведен график работы СНЭ. Данные на рисунке показывают, что накопитель заряжается в часы максимума солнца, разряд происходит

⁸ Принятый в расчетах курс – 77,32 руб./дол.

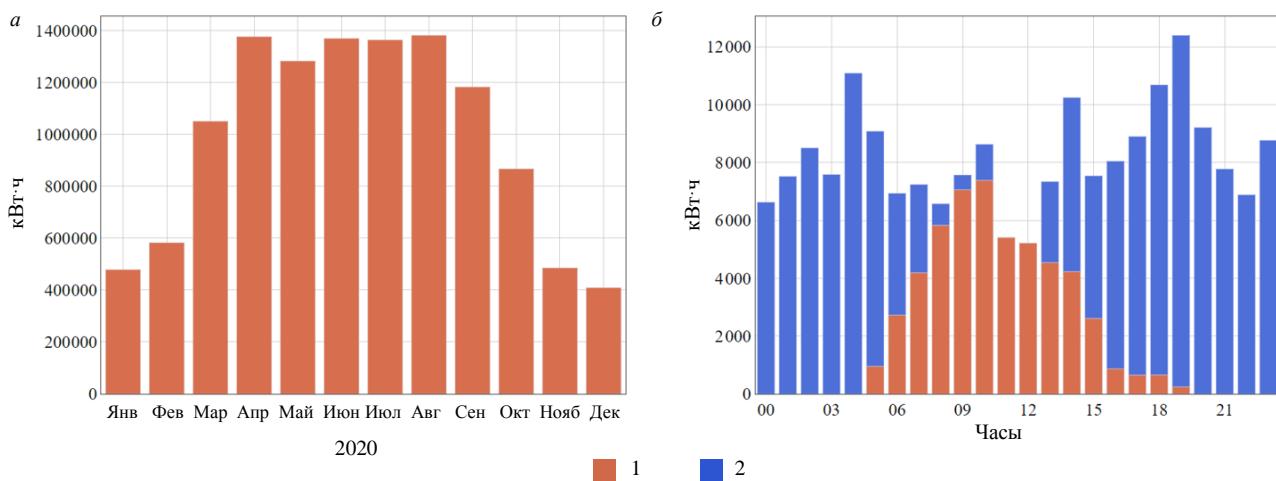


Рис.5. Сезонный (а) и суточный (б) профили генерации ФЭС установленной мощностью 8 МВт в Ростовской обл.
1 – солнечная генерация; 2 – потребление из сети

в час с признаком часа пиковой нагрузки для получения дополнительного эффекта. В табл.3 представлено сравнение рассмотренных вариантов. Значение LCOE находится в пределах от 0,07 до 0,1 дол./кВт·ч (от 5,41 до 7,73 руб./кВт·ч), что выше мирового уровня, составляющего 0,048 по данным IRENA в 2021 г.⁹ Рассматриваемые варианты не окупаются за изучаемый период в 20 лет, что главным образом вызвано невысокой стоимостью электроэнергии и символическими штрафами за выбросы CO₂ (16 руб. за 1 т CO₂).

Анализ чувствительности инвестиционного проекта приведен для рассматриваемого варианта внедрения СНЭЭ и ФЭС в Ростовской обл. Поскольку наибольшее влияние на NPC оказывает удельная стоимость ФЭС и СНЭЭ, а значения доходов зависят от стоимости квот на выбросы CO₂ и тарифов на электроэнергию, для расчетов были приняты параметры и значения, представленные в табл.4.

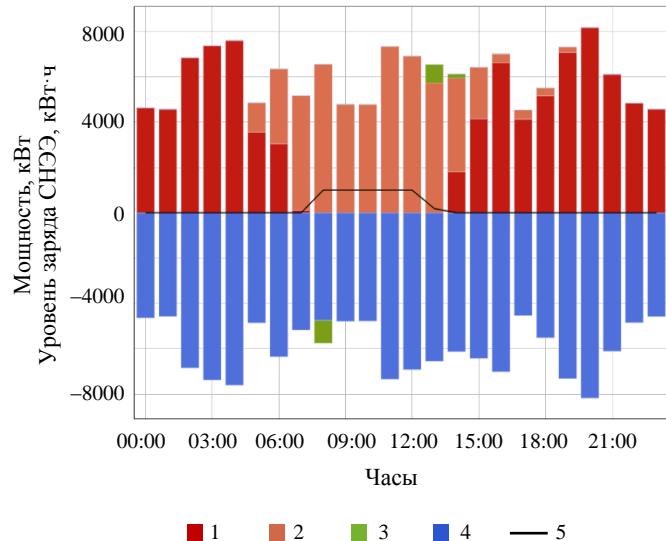


Рис.6. Суточный профиль работы гибридной системы электроснабжения с ФЭС установленной мощностью 9 МВт и СНЭЭ номинальной энергоемкостью 1 МВт·ч
1 – потребление из сети; 2 – солнечная генерация; 3 – СНЭЭ;
4 – нагрузка; 5 – уровень заряда СНЭЭ

Таблица 3

Сравнение вариантов внедрения ВИЭ для Ростовской обл.

Критерий	ФЭС 8 МВт	ВЭС 0,8 МВт	ФЭС 9 МВт + + СНЭЭ 1 МВт·ч	ФЭС 8 МВт + + ВЭС 0,8 МВт
Производство электроэнергии, ГВт·ч	11,82	2,42	13,32	14,18
Доля ВИЭ в потреблении, %	18,84	3,35	21,71	23,47
NPC, млн руб.	639,56	187,48	790,52	827,04
NPV за 20 лет, млн руб.	-14,35	-61,21	-85,69	-78,8
LCOE, руб./кВт·ч/дол./кВт·ч	5,11/0,066	7,32/0,093	5,60/0,071	5,51/0,07
Выбросы CO ₂ , кт	22,97	26,41	22,46	22,11
Снижение выбросов CO ₂ , кт	4,33	0,89	4,88	5,19
Создание дополнительных рабочих мест (за время жизни проекта)	9,77	2,00	11,01	11,72

⁹ Renewable Power Generation Costs in 2021. URL: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021> (дата обращения 01.04.2023).



Таблица 4

Исследуемые параметры в анализе чувствительности инвестиционного проекта

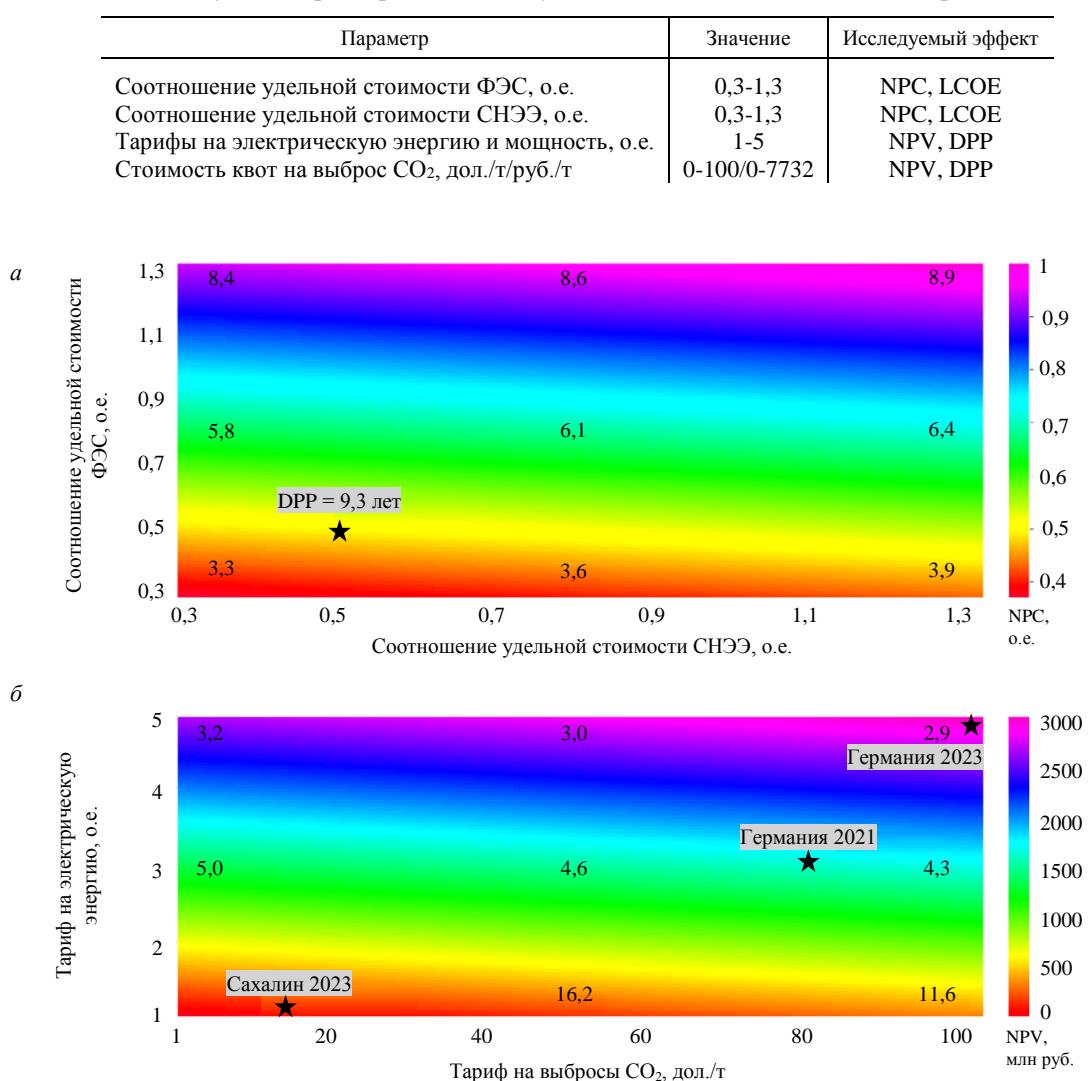


Рис.7. Результаты анализа чувствительности инвестиционного проекта: *а* – влияние удельной стоимости ФЭС и СНЭЭ на NPC и LCOE (значения LCOE указаны поверх диаграммы); *б* – влияние стоимости квот на выбросы CO_2 (NPC – const) и тарифов на электрическую энергию и мощность на NPV и DPP (значения DPP указаны поверх диаграммы)

Согласно расчетам, удельная стоимость ВИЭ и СНЭЭ значительно снизилась за последние 10 лет. На рис.7, *а* показан эффект изменения капитальных затрат и LCOE по отношению к текущим условиям.

Данные рис.7, *а* показывают, что значения LCOE и NPC могут быть снижены до 50 % в случае, если удельные стоимости ФЭС и СНЭЭ снизятся на 70 %. Отметим, что в РФ удельная стоимость генерации на ВИЭ в 2-4 раза выше, чем в среднем по миру, что создает значительные барьеры для реализации подобных проектов. Однако даже двухкратное снижение цен позволит снизить срок окупаемости только до 9 лет.

Влияние стоимости электрической энергии и стоимости квот на выбросы продемонстрировано на рис.7, *б*.

Из рис.7, *б* видно, что при повышении стоимости квот на выбросы до европейского уровня (80-100 дол./т CO_2 /6186-7732 руб./т CO_2) уровень инвестиционной привлекательности проекта (DPP) остается недостаточным (≈ 11 лет). В случае установления стоимости квот на выбросы CO_2 равными значениям в Сахалинском эксперименте (1000 руб. $\approx 12,8$ дол./т CO_2) по ограничению



выбросов парниковых газов¹⁰ срок окупаемости снижается только до 18 лет, что также остается неприемлемым. Отметим, что наибольшее влияние на окупаемость таких проектов оказывают тарифы на электрическую энергию и мощность. При текущем уровне тарифов проект не окупается. При тарифах на электроэнергию на уровне цен для индустриальных потребителей в Германии в 2021 г.¹¹ (0,21 дол./кВт·ч/16,24 руб./кВт·ч) срок окупаемости снижается до 4,5 лет. При текущем уровне цен на электроэнергию (0,4 дол./кВт/30,93 руб./кВт в 2023 г.) в Германии условия становятся еще более благоприятными, что способствует ускорению развития возобновляемой энергетики. В России на данный момент такие условия не созданы, а программа по договору о предоставлении мощности ВИЭ не рассчитана на поддержку индустриальных потребителей. Таким образом, даже в условиях создания рынка квот на выбросы CO₂ и установлении цен на уровне Сахалинского эксперимента возобновляемая энергетика на предприятиях МСК в России остается малопривлекательной и требует дополнительной поддержки.

Заключение. Мировые цели по достижению углеродной нейтральности создают новые вызовы перед российскими предприятиями МСК. При этом возникают дополнительные проблемы, повышающие социальную напряженность, в частности сокращение рабочих мест, занятых на угледобывающих предприятиях, и, как следствие, активная депопуляция и снижение уровня жизни моногородов. Одним из вариантов решения вышеуказанных проблем является внедрение ВИЭ. С целью оценки потенциала такого подхода, авторами выполнен анализ потенциала ВИЭ девяти угледобывающих регионов России и для дальнейшей проработки выбрана Ростовская обл. Для оценки перспектив внедрения ВИЭ была использована авторская программа для ЭВМ, позволяющая моделировать электроэнергетические балансы при внедрении генерации на ВИЭ. В дальнейших исследованиях планируется произвести технико-экономическую оценку создания водородного кластера на базе инфраструктуры угольной шахты.

Представленное исследование имеет значение с точки зрения климатической повестки и достижения углеродной нейтральности в РФ к 2060 г. Оно показывает, что в условиях российского рынка электрической энергии и мощности, даже в случае создания рынка квот на выбросы CO₂, потребуется дополнительное финансирование проектов по внедрению ВИЭ на предприятиях МСК для обеспечения их окупаемости. Таким образом, по мнению авторов, целесообразно принять к рассмотрению меры по государственной поддержке декарбонизации предприятий МСК с целью стимулирования проектов по их «озеленению».

Эффективность внедрения ВИЭ зависит также от суточного профиля электрической нагрузки. При несовпадении пиков электропотребления и генерации (при наличии ограничений на выдачу мощности в сеть) во избежание ограничения генерируемой мощности следует использовать СНЭ для выравнивания графика генерации ВИЭ, что увеличивает инвестиции в гибридный энергетический комплекс и срок его окупаемости. В рассмотренном варианте внедрения гибридного энергетического комплекса на предприятии с круглосуточным режимом работы потенциал солнечной генерации используется максимально, так как в часы пиковой солнечной активности не наблюдается снижения потребляемой мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фатерина А.А. Способы обеспечения экономической и энергетической безопасности при декарбонизации российской экономики // Государственное управление. Электронный вестник. 2022. Вып. 95. С. 41-52. DOI: 10.24412/2070-1381-2022-95-41-52
2. Плакиткина Л.С., Плакиткин Ю.А., Дьяченко К.И. Декарбонизация экономики как фактор воздействия на развитие угольной промышленности мира и России // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 8. С. 902-912. DOI: 10.32339/0135-5910-2021-8-902-912
3. Зонова О.В., Шевелева О.Б., Слесаренко Е.В. Тренды развития угольной отрасли в условиях внешних шоков // Уголь. 2023. № 2. С. 26-30. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-2-26-30

¹⁰ Федеральный закон от 06.03.2022 № 34-ФЗ «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации».

¹¹ Industrial electricity prices including tax Germany 1998-2022. URL: <https://www.statista.com/statistics/1050448/industrial-electricity-prices-including-tax-germany/> (дата обращения 02.04.2023).



4. Nepsha F., Belyaevsky R., Efremenko V., Varnavskiy K. Modern Problems of Increasing Coal Mines Power Supply Efficiency // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 105. № 03026. DOI: [10.1051/e3sconf/201910503026](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910503026)
5. Varnavskiy K.A., Nepsha F.S., Kostomarov R.V., Qingguang Chen. Business Diversification of Coal Mining Enterprises Based on the Development of Coal Mine Methane Utilization Infrastructure // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), 11-13 November 2022, Yekaterinburg, Russian Federation. IEEE, 2022. C. 2060-2063. DOI: [10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016919](https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016919)
6. Smirnova A., Varnavskiy K., Nepsha F. et al. The Development of Coal Mine Methane Utilization Infrastructure within the Framework of the Concept «Coal-Energy-Information» // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 23. № 8948. DOI: [10.3390/en15238948](https://doi.org/10.3390/en15238948)
7. Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А. и др. Эффективность распределенной энергетики в условиях минерально-сырьевого комплекса // Промышленная энергетика. 2019. № 5. С. 8-16.
8. Igogo T., Awuah-Offei K., Newman A. et al. Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches // Applied Energy. 2021. Vol. 300. № 117375. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.117375](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117375)
9. Ampah J.D., Chao Jin, Agyekum E.B. et al. Performance analysis and socio-enviro-economic feasibility study of a new hybrid energy system-based decarbonization approach for coal mine sites // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 854. № 158820. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.158820](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158820)
10. Непша Ф.С., Воронин В.А., Ливен А.С., Корнеев А.С. Оценка целесообразности применения когенерационных установок на угольных шахтах Кузбасса // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 141-150. DOI: [10.31897/PMI.2023.2](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.2)
11. Schulz J., Scharmer V.M., Zaeh M.F. Energy self-sufficient manufacturing systems – integration of renewable and decentralized energy generation systems // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 43. P. 40-47. DOI: [10.1016/j.promfg.2020.02.105](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.105)
12. Beier J., Thiede S., Herrmann C. Energy flexibility of manufacturing systems for variable renewable energy supply integration: Real-time control method and simulation // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 141. P. 648-661. DOI: [10.1016/j.jclepro.2016.09.040](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.040)
13. Лебедева М.А., Идиятуллина Э.Ф., Чухлатый М.С., Набоков А.В. Целесообразность применения возобновляемых источников энергии на промышленных предприятиях // Инженерный вестник Дона. 2019. № 9. С. 1-9.
14. Islam M.M., Zeyi Sun. Onsite generation system sizing for manufacturing plant considering renewable sources towards sustainability // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2019. Vol. 32. P. 1-18. DOI: [10.1016/j.seta.2019.01.004](https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.01.004)
15. Jinze Li, Pei Liu, Zheng Li. Optimal design of a hybrid renewable energy system with grid connection and comparison of techno-economic performances with an off-grid system: A case study of West China // Computers & Chemical Engineering. 2022. Vol. 159. № 107657. DOI: [10.1016/j.compchemeng.2022.107657](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107657)
16. Абрамович Б.Н., Бельский А.А. Выбор параметров ветродизельной установки для энергообеспечения минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. 2012. Т. 195. С. 227-230.
17. Богданов И.А., Веприков А.А., Касьянова А.Н., Моренов В.А. Повышение энергоэффективности электротехнических комплексов когенерационных установок для электроснабжения объектов нефтегазовых предприятий // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 12-5 (66). С. 59-63. DOI: [10.23670/IRJ.2017.66.144](https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.144)
18. Renbo Gao, Fei Wu, Quanle Zou, Jie Chen. Optimal dispatching of wind-PV-mine pumped storage power station: A case study in Lingxin Coal Mine in Ningxia Province, China // Energy. 2022. Vol. 243. № 123061. DOI: [10.1016/j.energy.2021.123061](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123061)
19. Menéndez J., Loredo J., Galdo M., Fernández-Oro J.M. Energy storage in underground coal mines in NW Spain: Assessment of an underground lower water reservoir and preliminary energy balance // Renewable Energy. 2019. Vol. 134. P. 1381-1391. DOI: [10.1016/j.renene.2018.09.042](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.042)
20. Menéndez J., Ordóñez A., Fernández-Oro J.M. et al. Feasibility analysis of using mine water from abandoned coal mines in Spain for heating and cooling of buildings // Renewable Energy. 2020. Vol. 146. P. 1166-1176. DOI: [10.1016/j.renene.2019.07.054](https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.054)
21. Yao Tao, Xu Luo, Jianli Zhou et al. Site selection for underground pumped storage plant using abandoned coal mine through a hybrid multi-criteria decision-making framework under the fuzzy environment: A case in China // Journal of Energy Storage. 2022. Vol. 56. Part A. № 105957. DOI: [10.1016/j.est.2022.105957](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105957)
22. Pujades E., Jurado A., Orban P., Dassargues A. Parametric assessment of hydrochemical changes associated to underground pumped hydropower storage // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 659. P. 599-611. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.12.103](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.103)
23. Strazzabosco A., Gruenhagen J.H., Cox S. A review of renewable energy practices in the Australian mining industry // Renewable Energy. 2022. Vol. 187. P. 135-143. DOI: [10.1016/j.renene.2022.01.021](https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.021)
24. Maregedze L., Chingosho H., Madiye L. Use and cost optimization for underground mines electrical energy: A case of a mine in Zvishavane // Energy. 2022. Vol. 247. № 123374. DOI: [10.1016/j.energy.2022.123374](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123374)
25. Hejuan Hu, Xiaoyan Sun, Bo Zeng et al. Enhanced evolutionary multi-objective optimization-based dispatch of coal mine integrated energy system with flexible load // Applied Energy. 2022. Vol. 307. № 118130. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.118130](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118130)
26. Hongxu Huang, Rui Liang, Chaoxian Lv et al. Two-stage robust stochastic scheduling for energy recovery in coal mine integrated energy system // Applied Energy. 2021. Vol. 290. № 116759. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.116759](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116759)
27. Qin C., Loth E. Isothermal compressed wind energy storage using abandoned oil/gas wells or coal mines // Applied Energy. 2021. Vol. 292. № 116867. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.116867](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116867)
28. Limanskiy A.V., Vasilyeva M.A. Using of low-grade heat mine water as a renewable source of energy in coal-mining regions // Ecological Engineering. 2016. Vol. 91. P. 41-43. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2016.02.008](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.02.008)
29. Menéndez J., Ordóñez A., Álvarez R., Loredo J. Energy from closed mines: Underground energy storage and geothermal applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 108. P. 498-512. DOI: [10.1016/j.rser.2019.04.007](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.007)
30. Ting Bao, Meldrum J., Green C. et al. Geothermal energy recovery from deep flooded copper mines for heating // Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 183. P. 604-616. DOI: [10.1016/j.enconman.2019.01.007](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.007)
31. Burnside N.M., Banks D., Boyce A.J., Athresh A. Hydrochemistry and stable isotopes as tools for understanding the sustainability of minewater geothermal energy production from a ‘standing column’ heat pump system: Markham Colliery, Bolsover, Derbyshire, UK // International Journal of Coal Geology. 2016. Vol. 165. P. 223-230. DOI: [10.1016/j.coal.2016.08.021](https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.08.021)



32. Шклярский Я.Э., Батуева Д.Е. Разработка алгоритма выбора режимов работы комплекса электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 115-126. DOI: 10.31897/PMI.2022.7
33. Sinha S., Chandel S.S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 32. P. 192-205. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.035
34. Thirunavukkarasu M., Sawle Y. An Examination of the Techno-Economic Viability of Hybrid Grid-Integrated and Stand-Alone Generation Systems for an Indian Tea Plant // Frontiers in Energy Research. 2022. Vol. 10. № 806870. DOI: 10.3389/fenrg.2022.806870
35. Chauhan A., Saini R.P. Techno-economic feasibility study on Integrated Renewable Energy System for an isolated community of India // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 59. P. 388-405. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.290
36. Bagherian M.A., Mehranzamir K., Pour A.B. et al. Classification and Analysis of Optimization Techniques for Integrated Energy Systems Utilizing Renewable Energy Sources: A Review for CHP and CCHP Systems // Processes. 2021. Vol. 9. Iss. 2. № 339. DOI: 10.3390/pr9020339

Авторы: **Ф.С.Непша**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент, nepshafs@kuzstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7468-2548> (Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия; РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, Россия), **К.А.Варнавский**, д-р философии, заведующий лабораторией, <https://orcid.org/0000-0001-7116-8765> (Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия), **В.А.Воронин**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-7242-9100> (Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия), **И.С.Заславский**, техник, <https://orcid.org/0000-0001-9226-6022> (Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия), **А.С.Ливен**, техник, <https://orcid.org/0000-0001-9138-6858> (Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Повышение энергоэффективности автономной системы электроснабжения буровой установки при провалах напряжения

С.С.ЧЕРВОНЧЕНКО✉, В.Я.ФРОЛОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Червонченко С.С., Фролов В.Я. Повышение энергоэффективности автономной системы электроснабжения буровой установки при провалах напряжения // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 470-478. EDN MGAPVA

Аннотация. В статье рассматриваются аварийные режимы работы автономного электротехнического комплекса буровой установки. Раскрывается понятие провала напряжения и его влияние на технологический процесс промышленных предприятий. Представлено описание использующихся в электроснабжении промышленных предприятий способов и методов преодоления провалов напряжения и набросов нагрузки в автономных энергосистемах, из которых можно выделить ускоренный подъем ответственного оборудования для недопущения аварийных режимов, а также применение резервных накопителей, как правило аккумуляторных батарей. Разработан алгоритм взаимодействия аккумуляторной батареи и дизель-генераторной установки как резервных источников питания во время различных режимов работы электродвигателя с учетом набросов нагрузки, позволяющий успешно преодолеть провалы напряжения в системе как в переходном, так и в установленном режимах. Предложен комбинированный метод устранения провала напряжения, особенностью которого является применение комбинированной структуры источников резервного питания в составе дизель-генераторной установки и аккумуляторной батареи, действующий на основании предложенного алгоритма взаимодействия в автономных электротехнических комплексах. Способ позволяет преодолеть резкие набросы нагрузки и провалы напряжения, вызванные дефицитом резервной мощности в электрической системе. Применение аккумуляторной батареи в качестве переходного элемента позволяет переключаться между основным и резервным источниками питания без остановки технологического и расширить порог перегрузки автономного электротехнического комплекса до 60 %. При использовании комбинированного метода повышается энергоэффективность автономного комплекса вследствие уменьшения количества аварийного отключения оборудования, прерываний технологического процесса и дополнительного расхода электроэнергии.

Ключевые слова: энергоэффективность; провал напряжения; генератор; буровая установка; резервное питание

Благодарность. Результаты исследования получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту FSEG-2023-0012.

Поступила: 12.03.2023

Принята: 20.06.2023

Онлайн: 19.07.2023

Опубликована: 19.07.2023

Введение. Системы автономного электроснабжения высокой мощности, удаленные от высоковольтных электрических сетей, получают питание, в основном, от автономных электростанций с двумя дизель-генераторными установками, одна из которых является основной, а другая – резервной [1-3]. Применение автономных электротехнических комплексов распространено в районах Дальнего Востока и Крайнего Севера, куда по экономическим и техническим причинам трудно провести централизованное электроснабжение. На удаленные изолированные энергорайоны приходится 60 % территории РФ с обширными запасами полезных ископаемых: 70 % нефти, 90 % природного газа, 90 % драгоценных металлов и камней. В изолированных районах общее количество источников генерации составляет примерно 5000 с суммарной мощностью около 2500 МВт.

Автономные электротехнические комплексы разделяются по следующим критериям [4].

- Назначение и характер потребителей: для применения в электроснабжении основных технологических потребителей (промышленное производство и т.п.); для обеспечения электроснабжения вспомогательных потребностей промышленных объектов (производственные и коммунально-бытовые нужды).



• По режиму работы: основные – энергокомплексы с наработкой за год более 3000 ч, с числом пусков за год менее 20, временем непрерывной работы более 350 ч, временем пуска и приема 100 % нагрузки до 30 мин; резервные – энергокомплексы с наработкой за год от 200 до 3000 ч, числом пусков от 20 до 50 и временем пуска и приема 100 % нагрузки не более 5 мин; аварийные – энергокомплексы с наработкой за год до 200 ч, числом пусков за год свыше 50 и временем пуска и приема 100 % нагрузки от 5 до 30 сек. Аварийные энергокомплексы используются для аварийного электроснабжения потребителей первой категории и первой категории особой группы, для которых перерыв в электроснабжении допустим только на время действия АВР, при отключении основного или резервного источника питания.

• По типу первичных двигателей: дизельные; газопоршневые; газотурбинные; микротурбинные; комбинированные с возобновляемыми источниками энергии.

В системах с низкой мощностью нагрузки резервным источником питания является, как правило, аккумуляторная батарея [5]. В таких изолированных системах особое внимание необходимо уделять показателям качества электроэнергии, от которого зависят работоспособность, надежность и эффективность функционирования оборудования [6].

Провал напряжения по ГОСТ 32144-2013 – это уменьшение напряжения в электрической сети ниже порогового значения 0,9 до минимального 0,1 от номинальной величины напряжения. Характеризуется такими параметрами как глубина провала и его длительность [7, 8]. После провала напряжения через промежуток времени от 10 мс должно идти восстановление напряжения до значения 90 % и выше от номинального. Падение напряжения ниже 0,1 от номинального на определенный промежуток времени является кратковременным прерыванием питания. Однако провалы являются наиболее критичными аварийными нарушениями, которые приводят к отключениям, перегрузке и выходу из строя электрооборудования генераторов и потребителей электроэнергии.

Из-за коротких электрических связей, отсутствия возможности маневра мощностями, а также небольшого резерва мощности, системы автономного электроснабжения чувствительны к провалам напряжения. Также на работоспособность энергокомплексов оказывают большое влияние высокий уровень загрязнения изоляции на производствах со стадией дробления/измельчения руды, несанкционированное прикосновение к токоведущим частям предметами, ошибки при операционном обслуживании персонала, природные факторы, например, удары молний. Запуск высокомощных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором приводит к снижению частоты и, соответственно, провалам напряжения в изолированных электрических сетях, что оказывает непосредственное влияние на режим работы других потребителей [9]. При уменьшении величины напряжения в электрической сети ниже допустимого по ГОСТу уровня, возможно отключение защищой по минимальному напряжению контакторов электродвигателей [10]. При этом, что актуально для добывающей промышленности, провалы напряжения могут происходить из-за различных аварийных ситуаций ввиду особенностей работы электротехнических комплексов, таких как застревание оборудования во время выполнения буровых работ и т.п. [11]. Провал напряжения может быть также вызван возникновением и окончанием короткого замыкания или резким увеличением значения протекающего тока в электросистеме или электроустановке, подключенной к электросети, а также отключением источников питания [12, 13].

Для автономных электротехнических комплексов можно выделить три основные причины возникновения провалов напряжения: аварийное отключение источников питания; резкое увеличение нагрузки, вызванное внешними технологическими обстоятельствами; короткие замыкания в системе.

При бурении скважин довольно часто происходят прихваты бурового инструмента. Одной из причин, ведущей к прихвату бурильных колонн, является провал напряжения и неспособность преодолеть прихват, а также последующее отключение электроэнергии. Для преодоления данных аварийных режимов, на долю которых приходится существенный процент общего количества аварийных ситуаций, требуются значительное время (минимум 4 ч) и свободные резервные мощности в изолированной электрической сети. Для компенсации негативного влияния провалов напряжения на непрерывные технологические процессы промышленных предприятий добывающей промышленности и повышения надежности и устойчивости изолированных сетей электроснабжения



требуется разработка комплексных способов защиты, учитывающих различные возмущения в системах питания электроприводов буровых установок [14, 15].

Главными сложностями при решении проблем электроснабжения удаленных автономных систем энергоснабжения промышленных предприятий являются удаленное расположение месторождений полезных ископаемых от централизованных энергосистем, распределенное расположение производственных объектов в пределах одного ГОКа (до 10 км) и непрерывный технологический процесс, нарушение которого ведет к значительным экономическим затратам предприятия [16].

Анализ литературы и практического опыта различных промышленных предприятий в ликвидации провалов напряжения позволяет выделить основные и самые распространенные способы и устройства: накопители энергии (источники бесперебойного питания, аккумуляторные батареи), активный фильтр, статический компенсатор (СТАТКОМ), повышающий преобразователь и маховик [17-19].

В системах электропривода буровых установок при провалах напряжения снижается скорость вращения бурильной колонны, а из-за большой глубины земных пород и относительно небольшого момента инерции происходит моментальный (до 2-3 с) «прихват» механизмов. Соответственно, в условиях ограничения получения дополнительной мощности из внешней сети поиск способов преодоления провалов напряжения в изолированных системах с помощью задействования резервов имеющегося оборудования за короткий промежуток времени актуален для минимизации убытков и повышения надежности электроснабжения предприятий [20, 21]. Ликвидация каждого «прихвата» требует повторного запуска технологического процесса, что занимает до 4 ч и требует значительного расхода электроэнергии и финансовых ресурсов [22].

Комбинированный метод [23, 24] рассматривается на примере буровой установки, установленной на золоторудном месторождении в Магаданской обл. По статистике на данном месторождении за 2022 г. зафиксировано в среднем по 19 аварийных отключений на каждую из восьми буровых установок. Время повторного восстановления технологического режима составляет 4 ч. С учетом того, что мощность буровой установки составляет 500 кВт, а приблизительная стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой на дизель-генераторной установке (ДГУ) – 25 руб., суммарные годовые дополнительные затраты на электроэнергию составляют 7,6 млн руб. Таким образом, очевидно, что задача по повышению энергоэффективности автономной системы электроснабжения буровой установки при провалах напряжения имеет важное прикладное и научное значение [25].

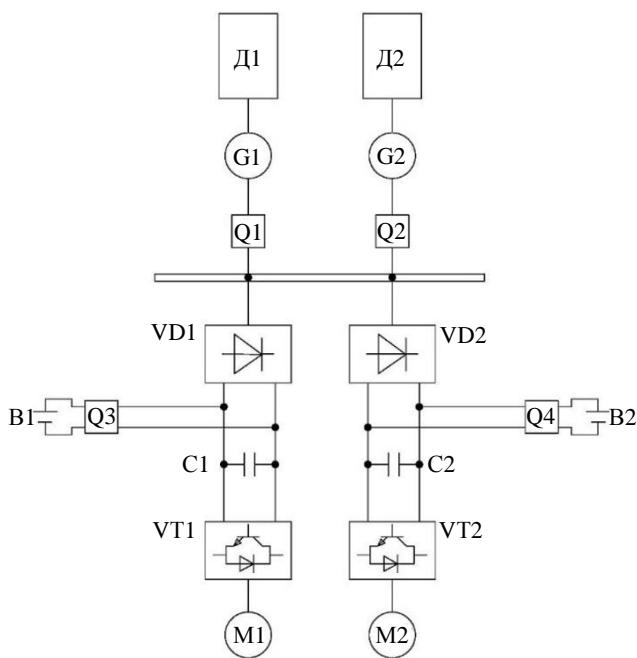


Рис.1. Принципиальная схема автономного электротехнического комплекса (составлено авторами)

Методы. На рис.1 представлена принципиальная схема автономного электротехнического комплекса, состоящая из дизель-генераторов, выключателей, частотного преобразователя и асинхронных электродвигателей нагрузки [26-28]. На схеме (рис.1) использованы следующие обозначения: Д1-Г1, Д2-Г2 – дизель-генераторы; Q1, Q2, Q3, Q4 – коммутационные аппараты; VD1, VD2 – выпрямители в составе частотного преобразователя; В1, В2 – аккумуляторные батареи; С1, С2 – конденсаторы (фильтры) в составе частотного преобразователя; VT1, VT2 – управляемые igt-транзисторы в составе преобразователя частоты; М1, М2 – электродвигатели нагрузки.

Буровая установка находится на значительном расстоянии от основного энергокомплекса (около 3 км), потому питание приходит от собственной дизель-генераторной установки, расположенной в непосредственной



близости от потребителя [29]. В качестве звена постоянного тока частотного преобразователя используются неуправляемые выпрямители [30, 31].

В данном электротехническом комплексе используются двухполюсные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором 5АМН315М2 мощностью 250 кВт, основные параметры которого приведены ниже [32]: полная мощность электродвигателя 284,5 кВА; номинальное скольжение 0,0083 %; номинальный ток обмотки статора 431 А; предварительное активное сопротивление статора 0,017 Ом; активное сопротивление ротора 0,0043 Ом; критическое скольжение 0,044 %; активное сопротивление статора 0,012 Ом; индуктивное сопротивление рассеяния статора 0,102 Ом; индуктивное сопротивление цепи намагничивания 1,968 Ом; индуктивность цепи намагничивания 0,0063 Гн.

Приведенные расчетные параметры используются для моделирования электродвигателей в программном комплексе Simulink [33]. Применяется стандартный блок Asynchronous Machine.

В качестве дополнительного резервного источника питания в электротехническом комплексе предусматривается стационарная малообслуживаемая свинцово-кислотная аккумуляторная батарея (OPzS). Применение данного типа аккумуляторной батареи обусловлено большим опытом эксплуатации, высокой надежностью и низкой стоимостью по сравнению с другими типами АБ, например, литий-ионной [34].

Емкость аккумуляторной батареи рассчитывается по формуле

$$C_{AB} \geq \frac{I_{AB} t_{AB}}{K_g K_p}, \quad (1)$$

где I_{AB} – величина тока, потребляемого аккумуляторной батареей во время нагрузки, А; t_{AB} – промежуток времени работы аккумуляторной батареи во время нагрузки, $t_{AB} = 0,5$ ч с учетом особенностей работы и категорийности потребителей; K_g – коэффициент доступной емкости, $K_g = 0,9-1$ о.е.; K_p – коэффициент глубины разряда аккумуляторной батареи, $K_p = 0,5-0,7$ о.е.

Величина тока, потребляемого от аккумуляторной батареи во время нагрузки

$$I_{AB} = \frac{P_{нагр}}{\eta_i U_{AB}}, \quad (2)$$

где $P_{нагр}$ – средняя величина мощности нагрузки, Вт; η_i – КПД преобразования постоянного тока в переменный с помощью инвертора, $\eta_i = 0,9-0,95$; U_{AB} – номинальное напряжение аккумуляторной батареи, В;

$$I_{AB} = \frac{500000}{0,93 \cdot 380} = 1414,8 \text{ А},$$

$$C_{AB} \geq \frac{1414,8 \cdot 0,5}{0,95 \cdot 0,6} = 1241 \text{ А} \cdot \text{ч.}$$

Время работы аккумуляторной батареи и, соответственно, расчетная емкость приняты, исходя из требуемого времени обеспечения надежности электроснабжения, по критерию вероятной предельной длительности провала напряжения с учетом необходимого резерва для ликвидации набросов нагрузки значительной величины.

Исходя из расчетов (1), (2), для дальнейшего исследования провала напряжения выбирается ближайшая величина емкости аккумуляторной батареи по данным заводских каталогов – 1500 А·ч (тип 12 OPzS 1500) со следующими параметрами: напряжение одного элемента – 2 В; внутреннее сопротивление – 0,21 мОм; тип – свинцово-кислотная; вид положительного электрода – трубчатая пластина.

Расчет необходимой мощности дизель-генераторов проведен по ГОСТ Р 53987-2010, согласно которому длительная мощность автономных дизель-генераторов переменного тока выбирается с резервом 30 % от величины установленной мощности нагрузки. Установленная мощность

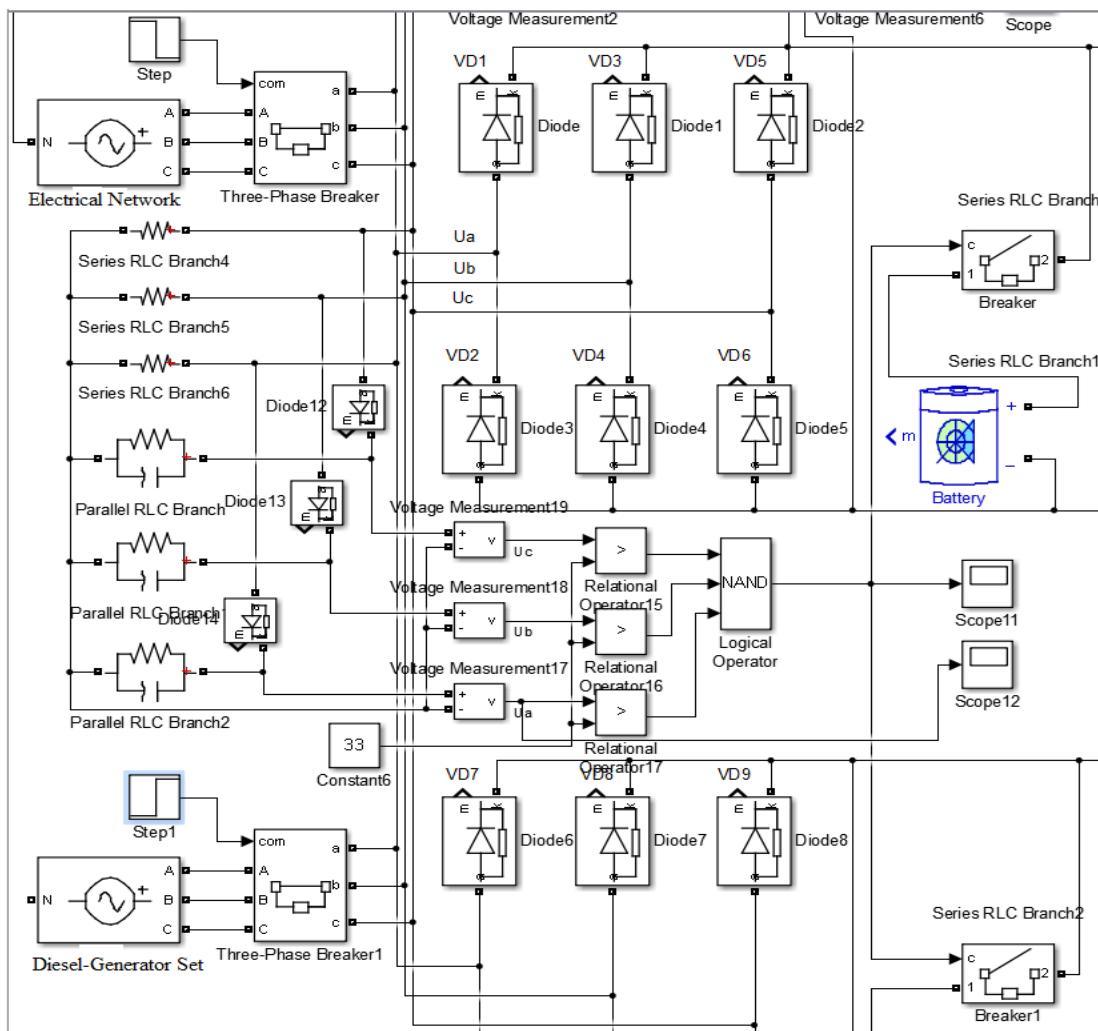


Рис.2. Компьютерная модель комбинированного состава источников резервного питания

нагрузки автономного электротехнического комплекса составляет 500 кВт от двух электродвигателей 5АМН315М2 мощностью 250 кВт. Согласно ГОСТ Р 53987-2010 величина расчетной мощности дизель-генераторной установки должна быть не менее $500 \cdot 1,3 = 650$ кВт.

На рис.2 представлена компьютерная модель комбинированного состава источников резервного питания (дизель-генераторная установка и аккумуляторная батарея) в составе автономного электротехнического комплекса буровой установки в программном комплексе Simulink.

Для обеспечения надежного электроснабжения и непрерывности технологических процессов предлагается рассмотреть комбинированную совместную работу различных источников резервного питания путем введения соответствующего алгоритма (рис.3) [35, 36].

Алгоритм комбинированного метода устранения провалов напряжения заключается в следующем: в установившемся режиме работы электродвигателей при питании от одной основной дизель-генераторной установки происходит резкое увеличение (наброс) нагрузки на вал. Например, для буровых колонн – застревание в твердых подземных породах. Соответственно при набросе нагрузки автоматическая система управления посыпает два параллельных управляющих сигнала: первый на запуск резервного дизель-генератора, который будет готов к приему нагрузки после выхода на номинальные обороты (примерно 3 с), второй на моментальное подключение дополнительного источника резервного питания – аккумуляторной батареи. Задача данной аккумуляторной батареи – обеспечить кратковременный прием нагрузки совместно с основным дизель-генератором путем выдачи пиковой мощности – бесшовный переход с поддержанием необходимого уровня величины напряжения в сети до разгона, выхода на номинальные обороты и приема нагрузки резервного дизель-генератора [37]. Затем происходит отключение аккумуляторной батареи, нагрузка распределяется между двумя (основным и резервным) ДГУ.



Далее выполняется компьютерное моделирование процесса провала напряжения и его устранения с помощью описанного выше алгоритма взаимодействия дизель-генераторной установки и аккумуляторной батареи в программном комплексе MatLab Simulink.

В процессе моделирования разгон электродвигателей длится 3 с до момента выхода на номинальную скорость вращения времени, затем происходит резкий наброс нагрузки. Согласно алгоритму (рис.3) в момент времени $t = 3$ с происходит подключение аккумуляторной батареи. Одновременно от управляющего воздействия запускается резервная дизель-генераторная установка. Далее в момент времени $t = 5$ с происходит перевод питания на запущенную резервную дизель-генераторную установку и режим работы продолжается до $t = 8$ с.

Обсуждение результатов. Выполнено моделирование режимов с различными величинами наброса нагрузки. На рис.4 приведены графики при набросе нагрузки 1600 Н·м.

Во время разгона электродвигателя наибольшая величина нагрузки составляет 1000 Н·м, соответственно данное значение принимаем в качестве номинальной мощности электродвигателя.

Согласно проведенным расчетам, при набросе нагрузке 30 % сохраняется работоспособный режим работы электросистемы с минимальным отклонением значения напряжения (в допустимых пределах по ГОСТу), при этом скорость вращения электродвигателя не уменьшается. При таком значении нагрузки величина тока статора составляет примерно 1750 А.

Данные, приведенные на рис.4, показывают, что совместная работа предложенного состава источников резервного питания, а именно дизель-генераторная установка и аккумуляторная батарея, на основе предложенного алгоритма управления позволяет преодолеть наброс нагрузки 60 % от номинальной мощности основного дизель-генератора без прерывания технологических процессов. Из рис.4, б видно, что при включении аккумуляторной батареи скорость вращения электродвигателя поддерживается в допустимом диапазоне и необходимом временном промежутке (3 с) для запуска, разгона и подключения резервной дизель-генераторной батареи.

Дальнейшие расчеты были выполнены для исследования режима работы при набросе нагрузки 65 и 70 % от номинальной мощности системы. При таком режиме расчетная емкость аккумуляторной батареи не в состоянии обеспечить плавное перенос нагрузки на резервную дизель-генераторную установку, так как происходит разряд батареи за 2 с. При этом ток статора достигает максимальных (пусковых) значений, что свидетельствует о перегрузке автономного электротехнического комплекса. Также практически моментально происходит замедление вращения электродвигателей. В таком случае по стандартной методике необходимо применить экстренный подъем буровых механизмов для сохранения оборудования и минимизации финансовых затрат.

Проведены аналогичные исследования режимов работы автономного электротехнического комплекса при набросах нагрузки различной величины с увеличенной емкостью свинцово-кислотной аккумуляторной батареи до значения 2500 А·ч.

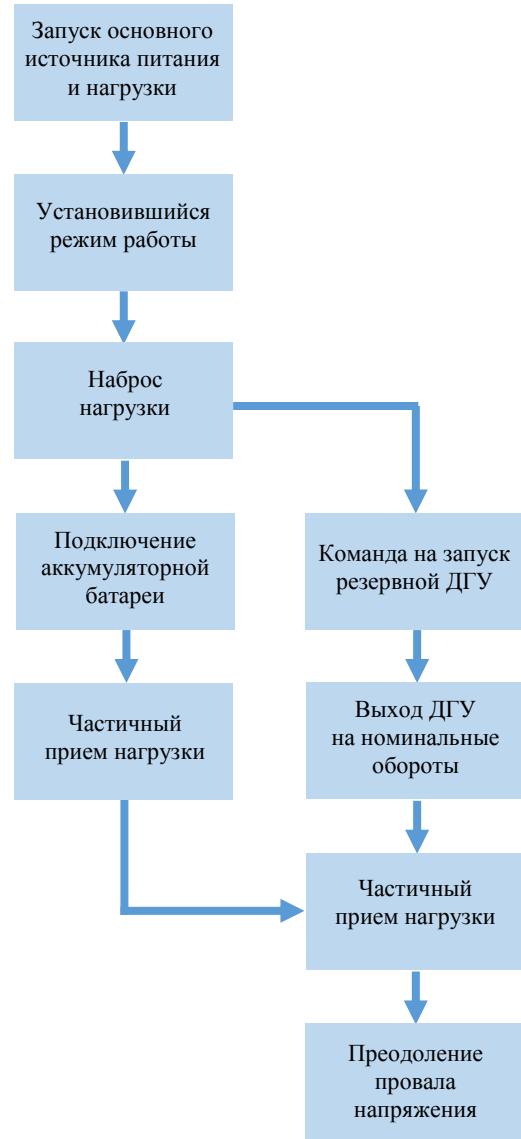


Рис.3. Алгоритм подключения источников резервного питания (составлено авторами)

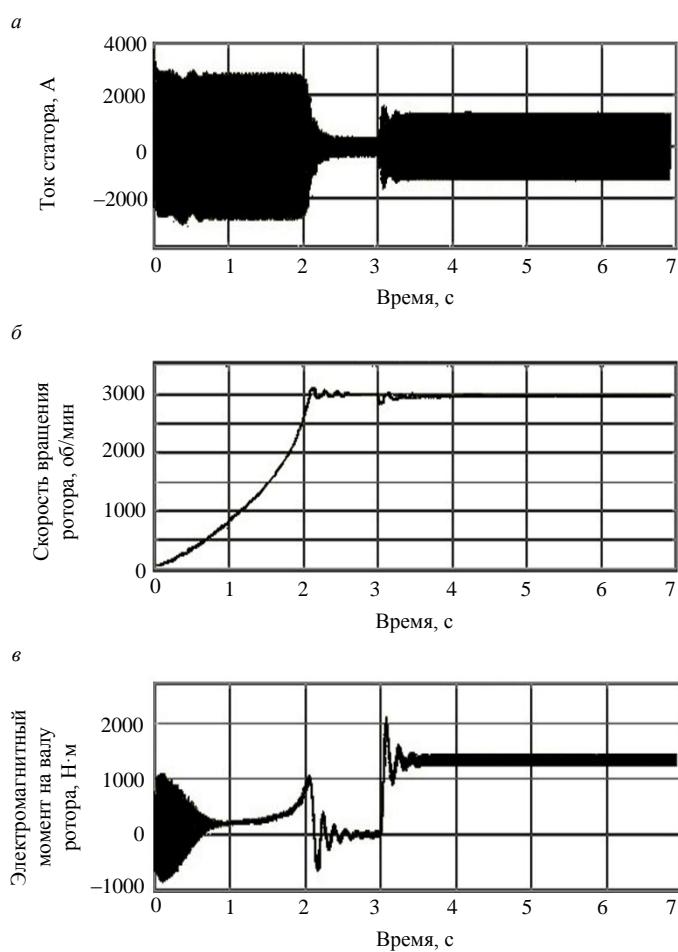


Рис.4. Графики при набросе нагрузки 1600 Н·м:
а – ток статора, А; б – скорость вращения ротора, об/мин;
в – электромагнитный момент на валу ротора, Н·м

способности энергосистемы преодолевать провалы напряжения:ность затраченных ресурсов на достигнутые технические результаты.

Заключение. В результате применения комбинированной структуры источников резервного питания, действующих на основании предложенного алгоритма взаимодействия для преодоления возникающих провалов напряжения в автономных электротехнических комплексах буровых установок, установлено, что применение аккумуляторной батареи позволяет повысить на 23 % допустимую величину перегрузочной способности системы при одновременном обеспечении непрерывности технологического процесса и переключениях между основной и резервной дизель-генераторной установкой при провалах напряжения.

В то же время увеличение емкости аккумуляторной батареи на 66 % относительно полученной расчетной величины (с 1500 до 2500 А·ч) позволяет увеличить максимальную величину наброса нагрузки, с которой справляется автономная система электроснабжения при провале напряжения, на 3,1 % (с 1600 до 1650 Н·м).

Показано, что при применении комбинированного состава источников резервного питания совместно с алгоритмом взаимодействия уменьшается количество отключений, повторных запусков и, соответственно, дополнительный расход электроэнергии. Совместные результаты приводят к уменьшению операционных затрат и повышению энергоэффективности комплекса.

Доказано, что при увеличении емкости аккумуляторной батареи сверх расчетного значения не обеспечивается значительное улучшение характеристик автономного электротехнического комплекса для способности энергосистемы преодолевать провалы напряжения. Данное решение приводит к увеличенным капитальным затратам без должного технического и экономического эффекта.

С набросом нагрузки $T_m = 1650$ Н·м энергосистема, в том числе числе аккумуляторная батарея, справляется. Скорость вращения двигателей слегка замедляется, но без влияния на непрерывный технологический процесс. Соответственно, при увеличении емкости аккумуляторной батареи с 1500 до 2500 А·ч (на 66 %) расширяется порог перегрузки и работоспособности системы на 3,1 % (с 1600 до 1650 Н·м). По сравнению со значением по ГОСТу перегрузочная способность энергокомплекса выросла до 65 %.

Дополнительно был проработан режим с набросом нагрузки 70 % ($T_m = 1700$ Н·м) от номинального значения мощности дизель-генератора. Результаты показывают, что для аккумуляторной батареи с увеличенной емкостью данная нагрузка является критичной, электродвигатели уходят в резкое замедление (скорость вращения равна 0 об/мин через 1,2 с после наброса нагрузки) и не обеспечивается поддержание технологического процесса.

Полученные результаты показывают, что при увеличении емкости аккумуляторной батареи сверх расчетного значения не обеспечивается значительное улучшение характеристик автономного электротехнического комплекса для спо-



ЛИТЕРАТУРА

1. *Georgilakis P.S., Hatziargyriou N.D.* A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research // *Electric Power Systems Research*. 2015. Vol. 121. P. 89-100. DOI: [10.1016/j.epsr.2014.12.010](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.12.010)
2. *Tavares B., Soares F.J.* An innovative approach for distribution network reinforcement planning: Using DER flexibility to minimize investment under uncertainty // *Electric Power Systems Research*. 2020. Vol. 183. № 106272. DOI: [10.1016/j.epsr.2020.106272](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106272)
3. *Gouin V., Alvarez-Hérault M.-C., Raison B.* Innovative planning method for the construction of electrical distribution network master plans // *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2017. Vol. 10. P. 84-91. DOI: [10.1016/j.segan.2017.03.004](https://doi.org/10.1016/j.segan.2017.03.004)
4. *Yu Yang, Fan Jinfu, Wang Zhongjie et al.* A dynamic ensemble method for residential short-term load forecasting // *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Vol. 63. P. 75-88. DOI: [10.1016/j.aej.2022.07.050](https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.07.050)
5. *Bo Yang, Junting Wang, Yixuan Chen et al.* Optimal sizing and placement of energy storage system in power grids: A state-of-the-art one-stop handbook // *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 32. № 101814. DOI: [10.1016/j.est.2020.101814](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101814)
6. *Саинев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф.* Развитие возобновляемой энергетики на востоке России в первой половине XXI века на фоне общероссийских тенденций // Энергетическая политика. 2016. Вып. 3. С. 66-73.
7. *Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Богомолов И.И.* Провалы напряжения в системах электроснабжения // Известия Тульского государственного университета. 2018. Вып. 12. С. 7-12.
8. *Ериков С.В., Пигалов М.С.* Анализ средств и способов ограничения влияния провалов напряжения // Известия Тульского государственного университета. 2017. Вып. 12-1. С. 95-104.
9. *Zarenia O., Salehpour M.J., Ghaedi R., Shafie-Khah M.* Markov-Based Reliability Assessment for Distribution Systems Considering Failure Rates // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 10018-10031. DOI: [10.1109/ACCESS.2023.3240778](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3240778)
10. *Postigo Marcos F., Domingo C.M., San Román T.G.* Improving distribution network resilience through automation, distributed energy resources, and undergrounding // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 141. № 108116. DOI: [10.1016/j.ijepes.2022.108116](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108116)
11. *Prathapaneni D.R., Detroja K.P.* An integrated framework for optimal planning and operation schedule of microgrid under uncertainty // *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2019. Vol. 19. № 100232. DOI: [10.1016/j.segan.2019.100232](https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100232)
12. *Besselmann T.J., Cortinovis A., Van de Moortel S. et al.* Increasing the Robustness of Large Electric Driven Compressor Systems During Voltage Dips // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018. Vol. 54. Iss. 2. P. 1460-1468. DOI: [10.1109/TIA.2017.2781638](https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2781638)
13. *Bagheri A., Bollen M.H.J., Gu I.Y.H.* Improved characterization of multi-stage voltage dips based on the space phasor model // *Electric Power Systems Research*. 2018. Vol. 154. P. 319-328. DOI: [10.1016/j.epsr.2017.09.004](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.004)
14. *Rastgou A., Moshtaghi J., Bahramara S.* Improved harmony search algorithm for electrical distribution network expansion planning in the presence of distributed generators // *Energy*. 2018. Vol. 151. P. 178-202. DOI: [10.1016/j.energy.2018.03.030](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.030)
15. *Kandasamy M., Thangavel R., Arumugam T. et al.* Strategic incorporation of DSTATCOM and distributed generations in balanced and unbalanced radial power distribution networks considering time varying loads // *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. P. 4345-4359. DOI: [10.1016/j.egyr.2023.03.076](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.076)
16. *Zhukovskiy Yu.L., Kovalchuk M.S., Batueva D.E., Senchilo N.D.* Development of an Algorithm for Regulating the Load Schedule of Educational Institutions Based on the Forecast of Electric Consumption within the Framework of Application of the Demand Response // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 24. № 13801. DOI: [10.3390/su132413801](https://doi.org/10.3390/su132413801)
17. *Червонченко С.С., Фролов В.Я.* Анализ провала напряжения буровой установки, подключенной к локальной энергетической сети // VII Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020», 23-24 апреля 2020, Санкт-Петербург, Россия. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. С. 630-634.
18. *Gukovskiy Yu.L., Sychov Yu.A., Pelenev D.N.* The Automatic Correction of Selective Action of Relay Protection System against Single Phase Earth Faults In Electrical Networks of Mining Enterprises // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. № 5. P. 833-838.
19. *Belsky A.A., Glukhanich D.Y., Carrizosa M.J., Starshaia V.V.* Analysis of specifications of solar photovoltaic panels // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 159. № 112239. DOI: [10.1016/j.rser.2022.112239](https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112239)
20. *Barelli L., Bidini G., Pelosi D. et al.* Comparative analysis of AC and DC bus configurations for flywheel-battery HESS integration in residential micro-grids // *Energy*. 2020. Vol. 204. № 117939. DOI: [10.1016/j.energy.2020.117939](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117939)
21. *Шонин О.Б., Новожилов Н.Г., Крыльцов С.Б.* Повышение устойчивости асинхронного электропривода с бездатчиковой скалярной системой управления при провалах напряжения сети // Известия Тульского государственного университета. 2016. Вып. 11-2. С. 507-519.
22. *Bardanov A.I., Solovev S.V., Alvarez R. et al.* Upgrading the Power Capacity of a Three-Conductor MVAC Line by Converting to DC // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 3. № 1080. DOI: [10.3390/en15031080](https://doi.org/10.3390/en15031080)
23. *Муньос-Гихоса Х.М., Крыльцов С.Б., Соловьев С.В.* Применение активного выпрямителя в качестве компенсатора токов искажений в распределительных сетях 6-10 кВ // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 229-238. DOI: [10.31897/PMI.2019.2.229](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.2.229)
24. *Iakovleva E.V., Guerra D.D.* Improving the efficiency of the use of photovoltaic stations in the republic of Cuba // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1753. № 012056. DOI: [10.1088/1742-6596/1753/1/012056](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012056)
25. *Васильков О.С., Батуева Д.Е., Хомяков К.А., Паланичин П.С.* Выравнивание графика нагрузки предприятий за счет применения гибридных накопителей электроэнергии // Известия МГТУ «МАМИ». 2020. № 1 (43). С. 27-34. DOI: [10.31992/2074-0530-2020-43-1-27-34](https://doi.org/10.31992/2074-0530-2020-43-1-27-34)
26. *Абрамович Б.Н.* Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 31-40. DOI: [10.25515/PMI.2018.1.31](https://doi.org/10.25515/PMI.2018.1.31)
27. *Abramovich B., Sychov Yu.A., Pelenev D.N.* Invariant protection of high-voltage electric motors of technological complexes at industrial enterprises at partial single-phase ground faults // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327. Iss. 5. № 052027. DOI: [10.1088/1757-899X/327/5/052027](https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052027)

28. Васильев Ю.Б., Шпенст В.А., Калашников О.В., Ульянов Г.Н. Обеспечение энергетической развязки электроприводов и сетей электроснабжения промышленных электротехнических комплексов // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 41-49. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.41
29. Forcan J., Forcan M. Optimal placement of remote-controlled switches in distribution networks considering load forecasting // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2022. Vol. 30. № 100600. DOI: 10.1016/j.segan.2021.100600
30. Ngom I., Mboup A.B., Thiaw L. et al. An Improved Control for DC-Link Fluctuation during Voltage Dip based on DFIG // 9th International Renewable Energy Congress (IREC), 20-22 March 2018, Hammamet, Tunisia. IEEE, 2018. P. 1-6. DOI: 10.1109/IREC.2018.8362458
31. Pazouki E., Sozer Y., De Abreu-Garcia J.A. Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Operation of Nonisolated DC-DC Converters // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. Iss. 1. P. 310-320. DOI: 10.1109/TIA.2017.2751547
32. Zhukovskiy Y.L., Korolev N.A., Koteleva N.I. About increasing informativity of diagnostic system of asynchronous electric motor by extracting additional information from values of consumed current parameter // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015. Iss. 3. № 032158. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032158
33. Malarev V.I., Kopteva A.V., Nogtev R.A. Electric Drive Simulation for Drilling Machine Spinner // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 194. Iss. 5. № 052012. DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052012
34. Savard C., Iakovleva E., Ivanchenko D., Rassolkin A. Accessible Battery Model with Aging Dependency // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 12. № 3493. DOI: 10.3390/en14123493
35. Шклярский Я.Э., Батуева Д.Е. Разработка алгоритма выбора режимов работы комплекса электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 115-126. DOI: 10.31897/PMI.2022.7
36. Zhukovskiy Yu.L., Batueva D.E., Buldysko A.D. et al. Fossil Energy in the Framework of Sustainable Development: Analysis of Prospects and Development of Forecast Scenarios // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 17. № 5268. DOI: 10.3390/en14175268
37. Akbari K., Rahmani E., Abbasi A., Askari M.-R. Optimal placement of distributed generation in radial networks considering reliability and cost indices // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. 2016. Vol. 30. Iss. 2. P. 1077-1086. DOI: 10.3233/IFS-151883

Авторы: С.С.Червонченко, аспирант, sergeychervonchenko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-2839-9068> (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия), В.Я.Фролов, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-1744-4375> (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Научная статья

Повышение энергоэффективности автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии на основании адаптивной регулировки режимов работы

В.А.ШПЕНСТ, А.А.БЕЛЬСКИЙ, Е.А.ОРЕЛ✉

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Шпенст В.А., Бельский А.А., Орел Е.А. Повышение энергоэффективности автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии на основании адаптивной регулировки режимов работы // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 479-492. EDN SNUKNA

Аннотация. Возобновляемые источники энергии постепенно обретают свою нишу использования в минерально-сырьевом комплексе. Их активно применяют в отдаленных малонаселенных районах для питания вахтовых поселков, геологоразведочных и метеорологических станций, аппаратуры трубопроводов, сотовых вышек, освещения вертолетных площадок и т.д. По сравнению с питанием от дизельгенераторных установок, системы с возобновляемыми источниками не требуют транспортировки топлива, характеризуются малыми сроками окупаемости и гибкой настройкой под разные категории потребителей. Основные препятствия к их распространению – нестабильность генерации и высокая себестоимость производимого электричества. Первый способ решения этих проблем заключается в развитии технологий, увеличении удельной мощности объектов генерации и систем накопления энергии. Второй способ – энергосбережение и рациональное использование ресурсов. Предложены решения для реализации второго способа. Объектом исследования являются автономные электротехнические комплексы постоянного тока с фото- и ветроэнергетическими установками. Переток мощности от источников генерации к потребителям в таких системах осуществляется через промежуточную шину постоянного тока, уровень напряжения которой влияет на потери мощности в процессе энергопередачи. Проблемой большинства комплексов является то, что напряжение шины жестко задано, в то время как оптимум, для которого будут характерны наименьшие потери, изменяется в зависимости от объемов генерации и потребления. Поэтому электротехнические комплексы теряют часть передаваемой энергии. Во избежание этого в комплекс добавляют алгоритм автоподстройки уровня напряжения шины под изменяющиеся условия работы. Дополнительный вклад в повышение эффективности способно внести динамическое изменение рабочей частоты преобразователей в составе комплекса в зависимости от нагрузки. Оценка по результатам имитационного компьютерного моделирования показала, что потери активной мощности в комплексе с выработкой 10 кВт на протяжении срока службы сокращаются на 2-5 %.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика; энергоэффективность; КПД; солнечные панели; силовая электроника

Поступила: 02.03.2023 Принята: 20.06.2023 Онлайн: 19.07.2023 Опубликована: 19.07.2023

Введение. Мировая энергетика стремительно меняется. Благодаря развитию технологий изменения носят не только количественный, но и качественный характер, необратимо меняя облик энергетических систем будущего. Ключевыми направлениями развития становятся децентрализация, цифровизация и интеллектуализация процессов генерации, распределения и потребления электрической энергии.

Новые веяния оказывают влияние и на минерально-сырьевую комплекс (МСК). На передний план выходят задачи оптимизации технологических цепочек и повышения производительности труда [1-3]. Достаточно остро встает проблема обеспечения электроэнергией отдаленных и малонаселенных территорий, богатых перспективными месторождениями природных ископаемых. Высокая стоимость электроэнергии затормаживает процессы развития, вынуждая потребителей искать новые способы генерации, а также образовывать свои, более эффективные малые электросети (англ. microgrids) [4, 5].

В нашей стране с развитой централизованной системой электроснабжения использование автономных энергосистем с собственными источниками генерации оправдано в основном в северных и северо-восточных регионах [6-8]. Включение их в систему централизованного электроснабжения в прошлом было признано неэффективным и слишком дорогостоящим. В результате электроснабжение этих территорий осуществлялось от дизельных электростанций, имеющих низкий КПД и высокую стоимость выработки электроэнергии, которая доходит до 80-120 руб./кВт·ч [9].

Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с жизненным циклом 20-25 лет позволяет снизить стоимость до 25-35 руб./кВт·ч [10]. Себестоимость зависит не только от материальных затрат, но и эффективности преобразования и передачи энергии потребителю. Целью данного исследования является предложить способ повышения энергоэффективности автономных электротехнических комплексов с ВИЭ. Актуальность работы связана с важностью темы энергосбережения для потребителей МСК отдаленных северных территорий, получающей поддержку на высоком государственном уровне.

Методы. Жизненный цикл электротехнического комплекса (ЭТК) с ВИЭ составляет более 20 лет. Расходы включают капитальные затраты на старте проекта, ежегодные – на обслуживание и утилизационные – по окончании проекта. Себестоимость электроэнергии СОЕ (англ. cost of energy) равна отношению суммарных денежных расходов к суммарной потребленной электроэнергии. При этом потребленная электроэнергия $W_{\text{потреб}}$ не равна выработанной $W_{\text{ген}}$ из-за наличия потерь в энергосистеме:

$$W_{\text{потреб}} = \eta W_{\text{ген}}, \quad (1)$$

где η – КПД при передаче электроэнергии. Чем выше η , тем ниже себестоимость СОЕ, у современных ЭТК $\eta = 0,8-0,85$ [11].

Для минерально-сырьевого сектора использование ВИЭ наиболее оправдано для питания объектов малой мощности (1-10 кВт), удаленных от основных линий электропередачи на десятки и сотни километров [12-14]. Такими потребителями являются небольшие вахтовые поселки, геологоразведочные и метеорологические станции, сотовые вышки, аппаратура трубопроводов, двигатели небольших насосных установок, системы защиты от коррозии, системы освещения вертолетных площадок, средства охраны, связи, обнаружения утечек веществ и т.д.

Для ЭТК с ВИЭ характерно разнообразие архитектур и принципов управления. Система может быть построена на постоянном или переменном токе [15], управляясь централизованно или децентрализованно [16], работать автономно или обмениваться энергией с другими сетями [17, 18]. Простейший автономный ЭТК с ВИЭ показан на рис.1, а. Согласование источников генерации и потребителей производится через промежуточную шину постоянного тока с напряжением U_{DC} . Аккумуляторная батарея (АКБ) напрямую подключена к шине. Заряд батареи осуществляется энергией, получаемой от солнечных панелей и ветроэнергетической установки и преобразуемой импульсными DC/DC и AC/DC преобразователями. Все преобразователи работают независимо друг от друга.

Однако прямое подключение АКБ к шине постоянного тока быстрее приводит к ее износу [19]. Импульсные токи случайной величины и формы от множества подключенных к шине генераторов и потребителей сокращают срок службы батареи. В зависимости от степени износа АКБ и уровня ее заряда напряжение шины может сильно меняться, из-за чего возникают проблемы со стабильностью работы системы. Практика показывает, что большинство неисправностей автономных сетей заключается именно в износе аккумуляторов [20]. При этом стоимость замены АКБ может составлять до 60 % стоимости всей системы.

Чтобы продлить срок службы АКБ, ее подключают к шине постоянного тока не напрямую, а через двунаправленный DC/DC преобразователь, управляющий процессами заряда и разряда [21]. Преобразователь поддерживает стабильность уровня напряжения шины и контролирует ток батареи. Введение централизованного управления (рис.1, б) обеспечивает согласованность работы всех преобразователей. Условием стабильной работы комплекса является баланс мощности генерации $P_{\text{ген}}$ и потребления $P_{\text{потреб}}$, который с учетом потерь $P_{\text{пот}}$ имеет вид:

$$P_{\text{ген}} - P_{\text{потреб}} - P_{\text{пот}} = 0. \quad (2)$$

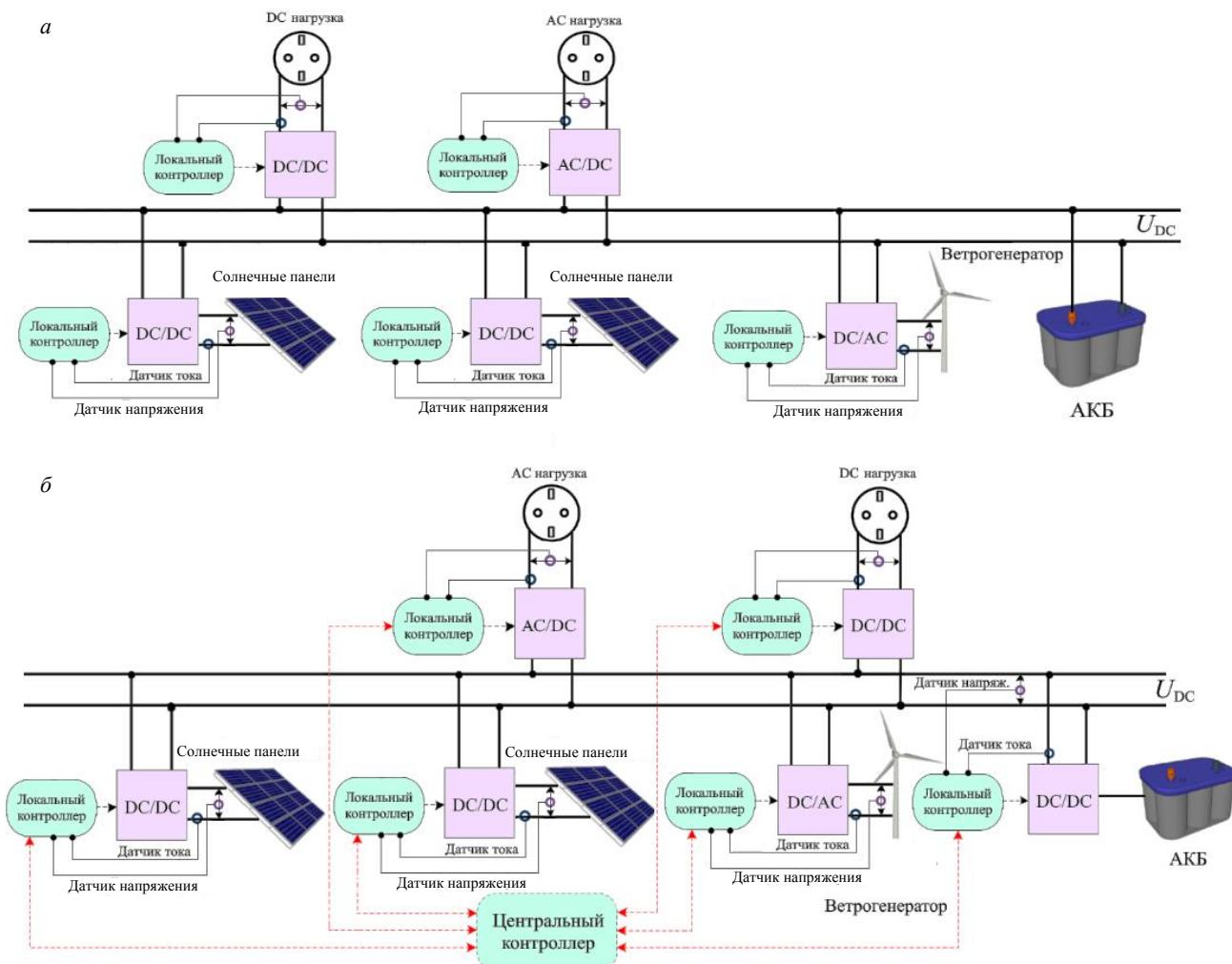


Рис.1. Электротехнический комплекс с ВИЭ: АКБ подключена напрямую (a), через двунаправленный DC/DC преобразователь (b)

Преобразователи напряжения, подключенные к ВИЭ, работают в режиме отбора максимальной мощности MPPT (англ. maximum power point tracking) [22-24]. В данном режиме их входное сопротивление регулируется таким образом, чтобы получать с ВИЭ максимум мощности [25, 26]. Так, например, рабочая точка солнечной панели с выходной мощностью P_{PV} (рис.2, a) будет установлена в положение А, а при изменении объема генерации автоматически переместится в положение В (рис.2, б).

В качестве DC/DC преобразователей с MPPT-режимом чаще всего используются повышающие схемы (англ. boost converters [27]). Повышение необходимо, так как выходное напряжение ВИЭ обычно невелико, особенно при низком уровне генерации. Выходной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) преобразователя, работающего в MPPT-режиме, является гипербола (рис.2, в), мощность во всех точках которой одинакова (рис.2, г). Максимальный выходной ток ограничен током короткого замыкания I_{kz} панели. Максимальное выходное напряжение ограничено уровнем U_{op} защитой от перенапряжения. Выходной ток преобразователя зависит от уровня напряжения шины постоянного тока U_{DC} и обратно пропорционален

$$I_{\text{вых}} = \frac{P_{\text{max}}}{U_{DC}}. \quad (3)$$

Рассматривая по аналогии работу остальных преобразователей комплекса, можно выявить общие закономерности. Принцип работы двунаправленного DC/DC преобразователя заряда-разряда АКБ описан в работах [28, 29], инвертора [30, 31]. В процессе работы комплекса у каждого из

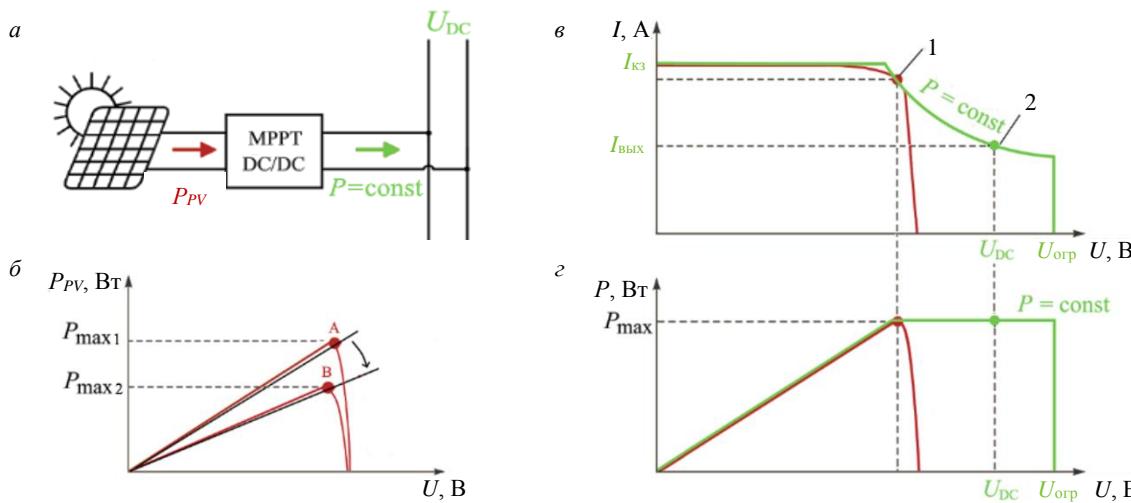


Рис.2. Работа солнечной панели с повышающим преобразователем: *а* – схема; *б* – принцип MPPT; *в* – выходная ВАХ панели и преобразователя; *г* – мощностная характеристика панели и преобразователя
 1 – рабочая точка солнечной панели; 2 – преобразователя

преобразователей задана своя рабочая точка. Поскольку все они подключены к общей шине постоянного тока, на положение точек будет влиять уровень напряжения шины U_{DC} .

Нижний предел допустимых значений U_{DC} должен быть выше максимального генерируемого ВИЭ напряжения. Верхний предел ограничен экономическим критерием – с ростом напряжения удороожаются электронные компоненты преобразователей. Вопросу выбора напряжения шины посвящены работы [32-34]. Для бытовых сетей мощностью до 10 кВт наиболее распространенными являются уровни 12, 24 и 48 В [35], для сетей большей мощности – уровни 380 и 400 В [36].

Для подавляющего большинства ЭТК с ВИЭ уровень напряжения шины является жестко заданным. При работе комплекса допускается его отклонение в пределах не более $\pm 10\%$ от名义ного значения. При этом в работах [26, 37] показано, что оптимум напряжения, для которого будут характерны наименьшие потери при энергопередаче, изменяется в зависимости от объемов генерации и потребления. В результате комплексы с жестко заданным уровнем теряют часть передаваемой мощности.

Авторы работ [26, 37] не показали, как реализовать автоматическую настройку уровня напряжения шины на оптимум, поэтому данный вопрос требует изучения. Как мы уже знаем, эффективность работы преобразователей в составе ЭТК зависит от уровня напряжения шины постоянного тока U_{DC} . Располагая математической моделью потерь мощности в каждом преобразователе, эту зависимость можно вычислить. Модель потерь повышающего преобразователя получена в работе [38], понижающего [39], инвертора [40, 41], двунаправленного преобразователя заряда-разряда АКБ [42, 43].

Потери активной мощности в импульсных преобразователях, если известны параметры элементов схемы и рабочая частота преобразования, могут быть сведены к функции от трех переменных

$$P_{loss} = f(U_{bx}, I_{vых}, U_{vых}), \quad (4)$$

где U_{bx} , $U_{vых}$ – входное и выходное напряжения преобразователя; $I_{vых}$ – выходной ток преобразователя. Для DC-преобразователей эти переменные характеризуют постоянный ток. Для AC-преобразователей являются действующими значениями фазных токов и напряжений.

Поскольку все преобразователи в рамках рассматриваемого ЭТК подключены к шине постоянного тока, одной из трех переменных будет являться напряжение шины U_{DC} . Переток реактивной мощности в комплексе, благодаря использованию шины постоянного тока и импульсных преобразователей напряжения, практически сведен к нулю. Поэтому расчеты реактивной мощности в дальнейшем не рассматриваются. КПД преобразователя будет связан с величиной активных потерь P_{loss} по формуле

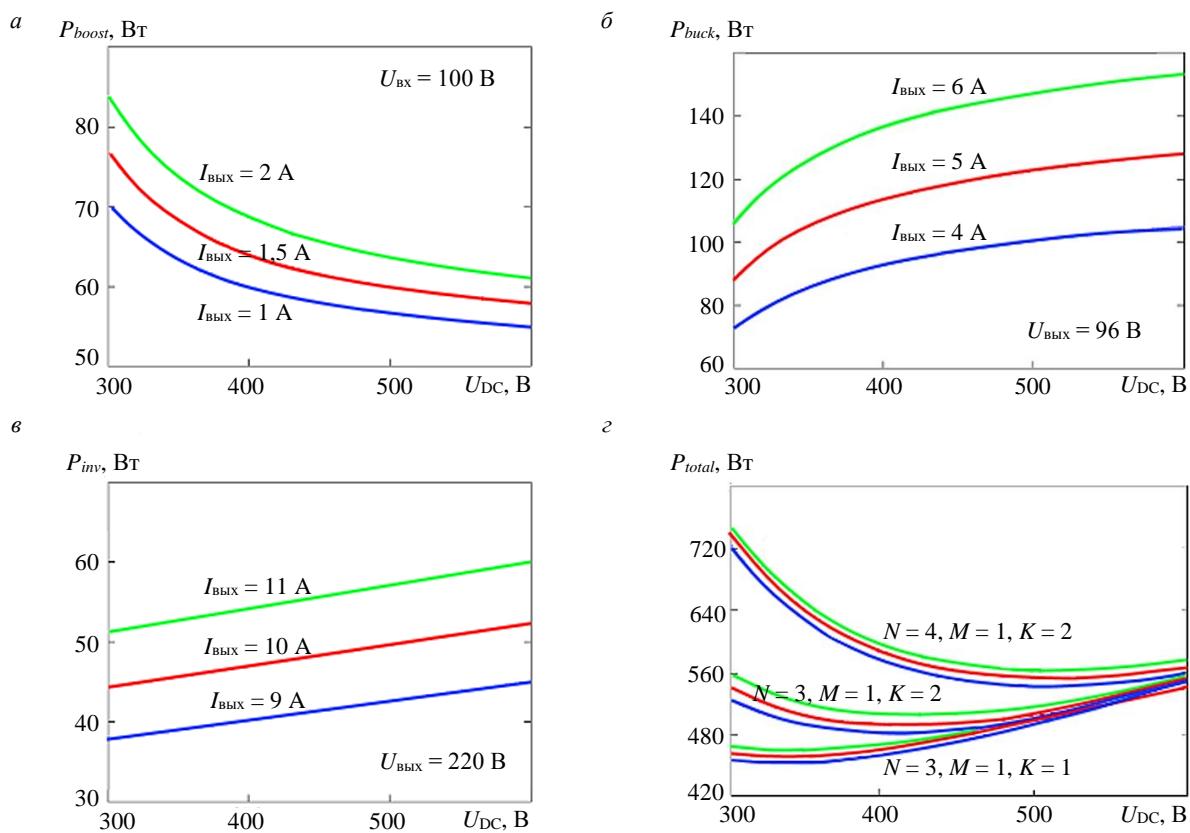


Рис.3. Графики зависимости потерь активной мощности от напряжения шины постоянного тока:
 a – повышающего преобразователя; $б$ – преобразователя заряда-разряда АКБ; $в$ – инвертора; $г$ – суммарные потери ЭТК

$$\eta(U_{bx}, I_{вых}, U_{вых}) = \frac{1}{1 + \frac{P_{loss}}{I_{вых} U_{вых}}}. \quad (5)$$

На основе математических моделей потерь по формуле (4) были построены зависимости P_{loss} от напряжения шины U_{DC} для повышающего преобразователя, преобразователя заряда-разряда АКБ и инвертора (рис.3, a - $в$). Для построения рассматривался ЭТК с суммарной мощностью генерации 4 кВт. Напряжение на выходе ВИЭ было задано равным 100 В постоянного тока, напряжение АКБ – 96 В, действующее напряжение на выходе инвертора – 220 В, диапазон напряжения шины постоянного тока U_{DC} составлял 310-600 В. Графики потерь строились при трех разных нагрузках на преобразователи, т.е. путем задания трех разных значений их выходного тока $I_{вых}$. Потери мощности всей системы будут равны сумме потерь преобразователей:

$$P_{total}(U_{DC}) = NP_{boost}(U_{DC}) + MP_{buck}(U_{DC}) + KP_{inv}(U_{DC}), \quad (6)$$

где N – число работающих повышающих преобразователей; M – число работающих преобразователей заряда-разряда АКБ; K – число инверторов.

Суммированием графиков потерь преобразователей по формуле (6) определяется график зависимости потерь $P_{total}(U_{DC})$ всего комплекса. Графики потерь $P_{total}(U_{DC})$ строились при разных значениях N , M и K (рис.3, $г$).

Из рис.3, $г$ видно, что точка минимума потерь при разном составе комплекса и разной нагрузке на преобразователи будет разной. Проводя настройку уровня напряжения шины U_{DC} на этот минимум в процессе работы комплекса, возможно добиться повышения его энергоэффективности.

Кроме того, потери в системе можно сократить не только варьированием напряжения шины, но и изменением рабочей частоты преобразователей в зависимости от их нагрузки. Активная мощность нагрузки преобразователя

$$P = Ef_s, \quad (7)$$

где E – энергия, преобразуемая за один рабочий такт, Дж; f_s – рабочая частота преобразования, Гц.

Рабочая частота влияет на динамические потери, связанные с переключением полупроводниковых элементов. Чем она выше, тем выше потери. Если мощность нагрузки изменяется, то при $E = \text{const}$ по формуле (7) рабочая частота также может быть изменена. Таким образом, если нагрузка уменьшается, то КПД преобразователя может быть улучшен снижением его рабочей частоты.

Предлагаемый алгоритм адаптивной регулировки режимов работы ЭТК, повышающий энергоэффективность, основан на оценке активных потерь мощности преобразователей при помощи их математических моделей.

Для проведения расчетов в комплекс добавлен вычислительный блок (ВБ), в памяти которого хранятся модели потерь мощности всех преобразователей (рис.4, а). Кроме того, там же хранится массив возможных значений напряжения шины постоянного тока U_{DC} , из которых в результате вычислений определяется наилучшее.

Между локальными контроллерами (ЛК) преобразователей и ВБ установлены каналы связи. Локальные контроллеры при помощи датчиков тока и напряжения проводят измерения переменных, необходимых для расчета потерь, по формулам (4) и (6). По измеренному значению тока ЛК оценивают нагрузку на преобразователь и по формуле (7) настраивают рабочую частоту преобразования.

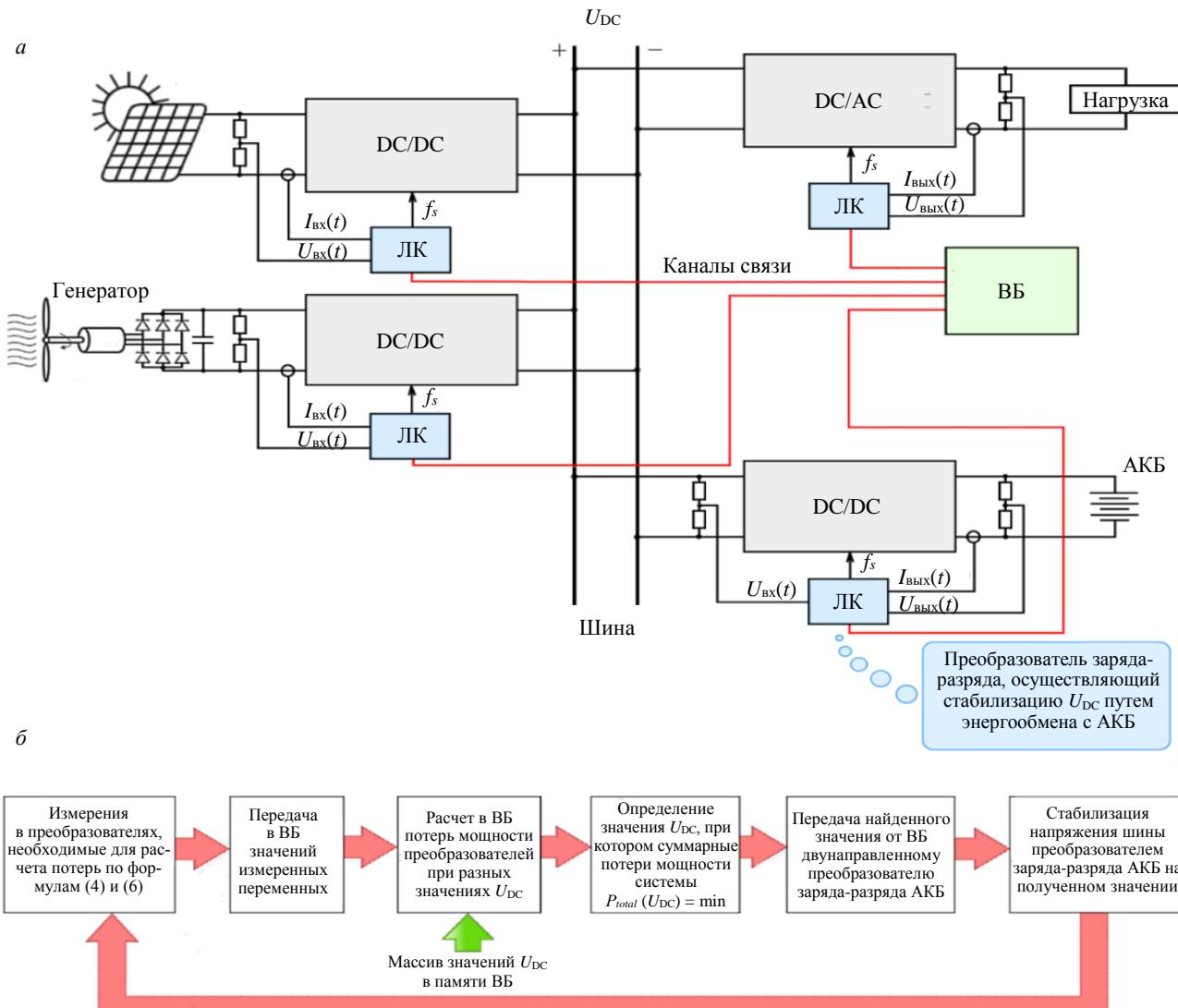


Рис.4. Электротехнический комплекс с поиском оптимального режима работы: а – схема;
 б – алгоритм поиска оптимального уровня напряжения шины



Далее измеренные значения переменных через каналы связи передаются в ВБ, который высчитывает потери мощности преобразователей при разных вариантах напряжения шины U_{DC} и выбирает то значение, при котором суммарные рассчитанные потери системы $P_{total}(U_{DC})$ окажутся минимальны. Найденное значение ВБ передает в ЛК преобразователя заряда-разряда АКБ, который стабилизирует напряжение шины U_{DC} на полученном значении. Блок-схема алгоритма представлена на рис.4, б. Для проверки предлагаемой идеи в программном комплексе MatLab Simulink была создана имитационная компьютерная модель автономного ЭТК с ВИЭ мощностью 10 кВт.

Модели солнечной панели и АКБ были взяты из работы [44]. Модель ветрогенератора составлена на основе статьи [45], где рассматривалась работа ветроустановки с диодным мостовым выпрямителем. Авторами было показано, что если после выпрямителя включена фильтрующая емкость, то напряжение на выходе выпрямителя в точке максимальной генерируемой мощности P_{max} связано с этой мощностью выражением

$$U_{WT} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} K_V \sqrt[3]{\frac{P_{max}}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \theta) \left(\frac{R}{\lambda} \right)^3}} \right) - U_d, \quad (8)$$

где K_V – конструктивный коэффициент пропорциональности, $K_V = 0,69$ [45]; ρ – плотность воздуха, $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$; R – длина лопастей ветроустановки; C_p – коэффициент использования энергии ветра, зависящий от быстроходности λ и угла атаки лопасти θ , лежащий в диапазоне 0-0,6; U_d – падение напряжения на диодном выпрямителе.

При этом максимальная снимаемая с ветрогенератора мощность зависит от скорости ветра v

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \theta). \quad (9)$$

Имитационная компьютерная модель комплекса показана на рис.5. Она включает три массива солнечных панелей и одну ветроэнергетическую установку, выдающую уже выпрямленное

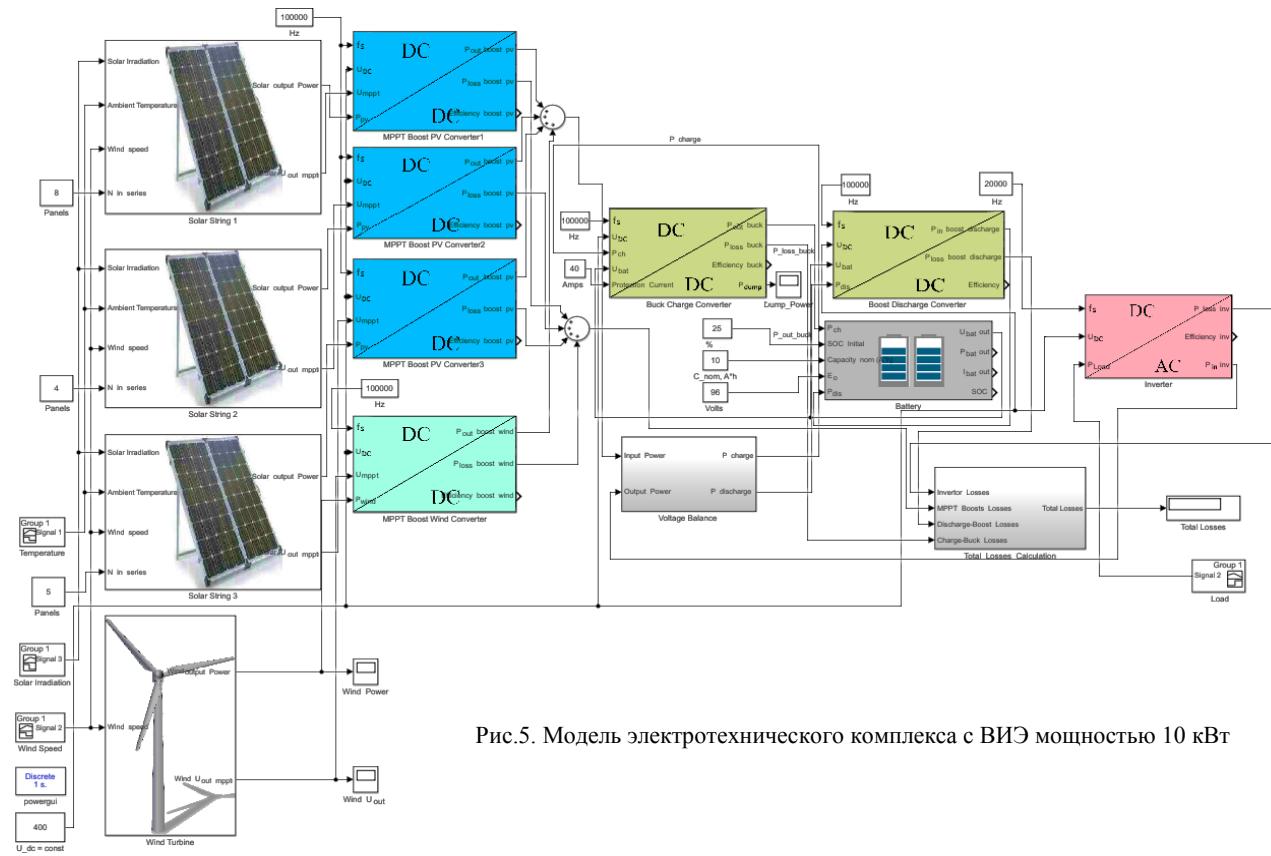


Рис.5. Модель электротехнического комплекса с ВИЭ мощностью 10 кВт

напряжение постоянного тока. Потребители имитируются блоком *Load*, питаемым DC/AC преобразователем напряжения. Мощность, снимаемая с возобновляемых источников, преобразуется импульсными DC/DC преобразователями. Выходная мощность преобразователей суммируется, в результате чего определяется суммарная мощность выработки. После этого в блоке *Voltage Balance* производится вычитание потребляемой нагрузками мощности из суммарной мощности выработки. Если разность оказывается положительной, она идет на заряд АБ. Если отрицательной – восполняется путем ее разряда. Двунаправленный преобразователь заряда-разряда батареи представлен двумя DC/DC блоками: *Buck Charge Converter* – осуществляющий заряд и *Boost Charge Converter* – осуществляющий разряд. Параметры моделей ВИЭ и АКБ приведены в табл.1, модели импульсных преобразователей напряжения – в табл.2.

Таблица 1

Параметры моделей ВИЭ и АКБ

Солнечная панель	Ветроэнергетическая установка	АКБ
Номинальная мощность 250 Вт	Номинальная мощность 7500 Вт	Напряжение холостого хода 96 В
Напряжение холостого хода 37,98 В	Напряжение холостого хода 240 В	Емкость 10 А·ч
Ток короткого замыкания 9,04 А	Быстроходность $\lambda = 7$	Внутреннее сопротивление 0,0048 Ом
Напряжение в точке максимальной мощности 30,63 В	Длина лопасти 1,6 м	Допустимый уровень заряда 20-100 %
Ток в точке максимальной мощности 8,79 А	Допустимая скорость ветра 3-14 м/с	Начальный заряд 25 %

Таблица 2

Параметры моделей импульсных преобразователей

Показатели	DC/DC солнечных панелей	DC/DC ветроэнергетической установки	DC/DC заряда-разряда АКБ	DC/AC
Режим работы	MPPT	MPPT	Стабилизация напряжения U_{DC}	Стабилизация напряжения потребителей
Схема	Повышающая (boost converter) [22]	Повышающая (boost converter) [43]	Повышающе-понижающая (buck-boost converter) [28]	Мостовая (full-bridge converter) [30]
Транзисторы				
Тип	MOSFET	MOSFET	MOSFET	IGBT
Рабочая частота	100 кГц	100 кГц	100 кГц	20 кГц
Сопротивление канала/падение напряжения в открытом состоянии	0,002 Ом	0,002 Ом	0,002 Ом	1,8 В
Среднее время переключения	30 нс	30 нс	30 нс	42 нс
Выходная емкость	100 пФ	100 пФ	100 пФ	200 пФ
Пороговое напряжение затвора	12 В	12 В	12 В	12 В
Диоды				
Противо-ЭДС	0,3 В	0,3 В	0,3 В	1 В
Динамическое сопротивление	0,9 Ом	0,9 Ом	0,9 Ом	0,7 Ом
Время обратного восстановления	45 нс	45 нс	45 нс	60 нс
Дроссель				
Индуктивность	70 мкГн	50 мкГн	50 мкГн	30 мГн
Резистивное сопротивление	0,3 Ом	0,2 Ом	0,15 Ом	0,8 Ом
Электролитические конденсаторы				
ESR	0,02 Ом	0,02 Ом	0,02 Ом	0,02 Ом

На вход модели солнечных панелей поступают данные о почасовой интенсивности солнечного излучения (рис.6, *а*) и температуре окружающей среды (рис.6, *б*) на протяжении года. На вход модели ветрогенератора поступают данные о почасовой скорости ветра (рис.6, *в*). Все они представляют собой усредненные за час значения, взятые из метеорологической базы NASA. Для моделирования использовались метеоданные севера Забайкальского края за 2022 год.

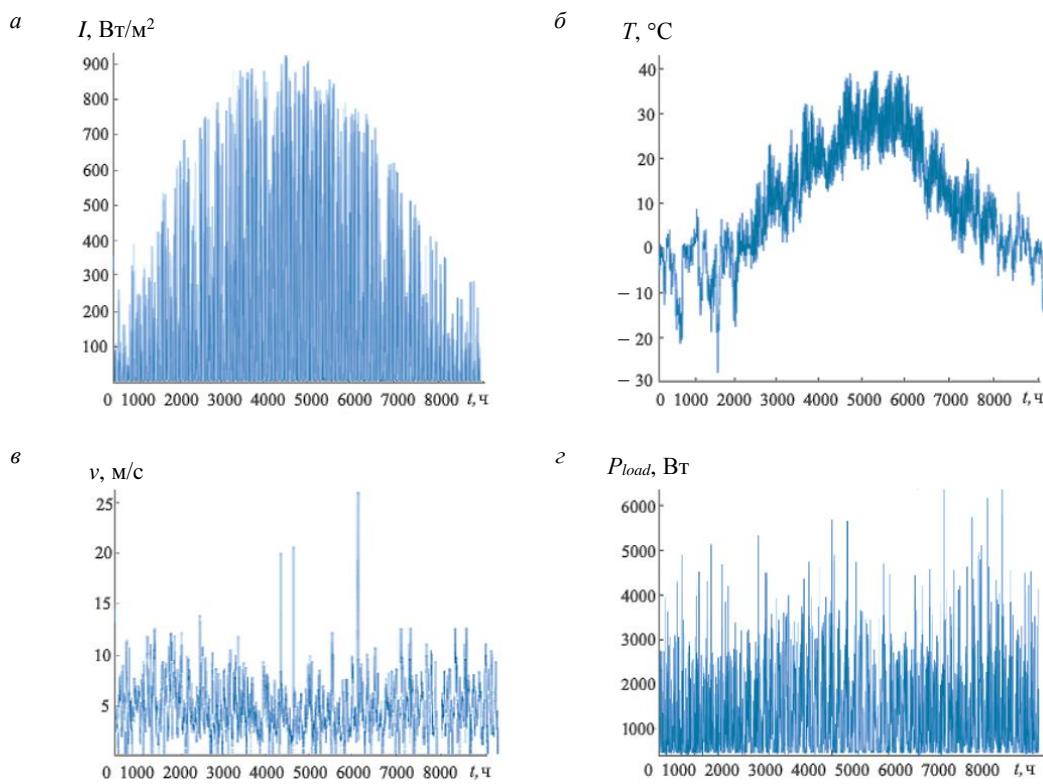


Рис.6. Данные для моделирования работы ЭТК: *а* – интенсивность солнечного излучения; *б* – температура воздуха; *в* – скорость ветра; *г* – почасовой профиль потребления нагрузки

Снимаемая с массивов солнечных панелей мощность поступает на DC/DC преобразователи MPPT *Boost PV Converter*, модель потерь мощности которых составлена на основе формул из работы [38]. Входными данными для модели являются рабочая частота преобразования f_s , напряжение шины постоянного тока U_{DC} , генерируемое напряжение солнечных панелей V_{MPPT} и мощность P_{PV} . Выходные данные – вычисленные потери мощности $P_{loss\ boost\ PV}$, выходная мощность $P_{out\ boost\ PV}$ и КПД преобразования *Efficiency boost PV*.

Снимаемая с ветрогенератора мощность поступает на DC/DC преобразователь MPPT *Boost Wind Converter*, модель потерь которого также основана на работе [38]. Входными данными для модели являются сгенерированная ветроустановкой мощность P_{wind} и напряжение V_{MPPT} , рабочая частота f_s и напряжение шины постоянного тока U_{DC} . Выходные данные – потери $P_{loss\ boost\ wind}$, выходная мощность $P_{out\ boost\ wind}$ и КПД преобразования *Efficiency boost wind*.

Модель потерь мощности DC/AC преобразователя составлена на основе работ [40, 41]. На вход модели поступают данные о рабочей частоте преобразования f_s , почасовом потреблении нагрузки P_{load} (рис.6, *г*), уровне напряжения шины постоянного тока U_{DC} . В качестве нагрузки рассматривался небольшой вахтовый поселок из нескольких жилых сооружений, где основными потребителями являются электроприборы и освещение. Данные о потребляемой мощности брались из базы данных LoadProfileGenerator*. Выходными данными для модели DC/AC преобразователя являются потери мощности $P_{loss\ inv}$, КПД преобразования *Efficiency* и потребляемая с шины постоянного тока мощность $P_{in\ inv}$.

Модель шины постоянного тока представлена блоком *Voltage Balance*. В блоке производится сравнение суммарной мощности выработки *Input Power* и суммарной мощности потребления *Output Power*. Если их разница оказывается больше нуля, то избыточная мощность P_{ch} направляется на заряд АКБ, если меньше, то недостаток мощности P_{dis} будет браться из разряда АКБ.

* LoadProfileGenerator – modeling tool for residential energy consumption. URL: <https://www.loadprofilegenerator.de> (дата обращения 02.03.2023).

Двунаправленный DC/DC преобразователь заряда-разряда АКБ представлен в модели комплекса блоками *Buck Charge Converter* и *Boost Discharge Converter*. Модель потерь преобразователя в режиме заряда *Buck Charge Converter* составлена на основе работ [39, 42]. В преобразователе имеется защита по току, задающая предельный ток заряда *Protection Current*. Входные данные для модели – мощность заряда P_{ch} , напряжение шины постоянного тока U_{DC} , напряжение АКБ U_{bat} и рабочая частота f_s . Выходные данные – потери мощности $P_{loss\ buck}$, выходная мощность $P_{out\ buck}$, КПД преобразования *Efficiency buck* и рассеиваемая на балластной нагрузке избыточная мощность P_{dump} .

Модель потерь преобразователя в режиме разряда АКБ *Boost Discharge Converter* составлена на основе работы [43]. Входные данные – рабочая частота f_s , напряжение шины постоянного тока U_{DC} , напряжение АКБ U_{bat} и отдаваемая на шину постоянного тока мощность P_{dis} . Выходными данными являются снимаемая с батареи мощность $P_{bat\ dis}$, потери $P_{loss\ boost\ dis}$ и КПД работы *Efficiency*.

Расчет суммарных потерь мощности комплекса осуществляется в блоке *Total Losses Calculation*. На вход блока поступает информация о потерях мощности всех преобразователей, после чего эти потери суммируются.

Результаты. В процессе имитационного компьютерного моделирования была воспроизведена работа комплекса на протяжении года, включающего 8760 ч. Результаты моделирования приведены на рис.7. Чтобы представить осцилограммы в увеличенном масштабе, показана работа комплекса во временном интервале с 2000 по 2600 ч. Выработка от ВИЭ (рис.7, *a*) представлена двумя графиками: P_{PV} – мощность генерации солнечных панелей, P_{WT} – мощность генерации ветроэнергетической установки. График P_{load} – активная мощность потребления нагрузки SOC (англ. state of charge) – уровень заряда АКБ.

Осцилограммы напряжения U_{PV} и тока I_{PV} , генерируемые массивом солнечных панелей, приведены на рис.7, *b*. Осцилограммы U_{WT} и I_{WT} ветрогенератора – на рис.7, *c*. Напряжение и ток заряда-разряда АКБ представлены на рис.7, *г*. Оценка энергоэффективности комплекса производилась по измерению суммарных потерь мощности P_{total} . Первоначально были измерены потери мощности при жестко заданном напряжении шины 400 В и рабочей частоте преобразователей: 100 кГц для DC/DC преобразователей и 20 кГц для DC/AC преобразователя. После этого были измерены потери при настраиваемых на минимум потерях ($P_{total} = \min$) рабочей частоты преобразователей (рис.7, *д*) и напряжении шины (рис.7, *е*). В качестве диапазона значений напряжения шины использовались 370-600 В. Рабочая частота DC/DC преобразователей варьировалась в пределах 20-100 кГц в зависимости от их нагрузки.

График суммарных потерь мощности системы P_{total} приведен на рис.7, *ж*. В результате внедрения предлагаемого технического решения потери комплекса снизились. Для количественной оценки этого снижения было произведено суммирование потерь мощности P_{total} на протяжении 8760 ч, в результате чего определялись полные потери за год. Прирост в энергоэффективности комплексом за год рассчитывался следующим образом:

$$\Delta P_{total} = \left(\frac{P_{total2}}{P_{total1}} - 1 \right) \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где P_{total1} – суммарные потери активной мощности за год при жестко заданном напряжении шины и рабочей частоте преобразователей; P_{total2} – суммарные потери активной мощности за год при изменяющемся напряжении шины и рабочей частоте преобразователей.

Оценка ΔP_{total} показала, что в результате внедрения технического решения потери мощности за год сократились на 2 % при варьировании напряжения шины и на 5 % при одновременном варьировании напряжения шины и рабочей частоты преобразователей. Поскольку потери на протяжении всего срока эксплуатации комплекса равны сумме потерь по годам, сокращение потерь за весь срок службы ЭТК в результате внедрения предлагаемого решения также оценивается в 2-5 %.

Обсуждение результатов. Отмечено повышение энергоэффективности автономного ЭТК с ВИЭ, благодаря адаптивному регулированию режимов его работы. Предлагаемый способ основан на использовании математических моделей потерь мощности преобразователей, поэтому для его осуществления требуется большой объем проводимых вычислений. Специально для этой цели в комплекс был добавлен отдельный ВБ, хранящий в памяти все математические модели. Данный

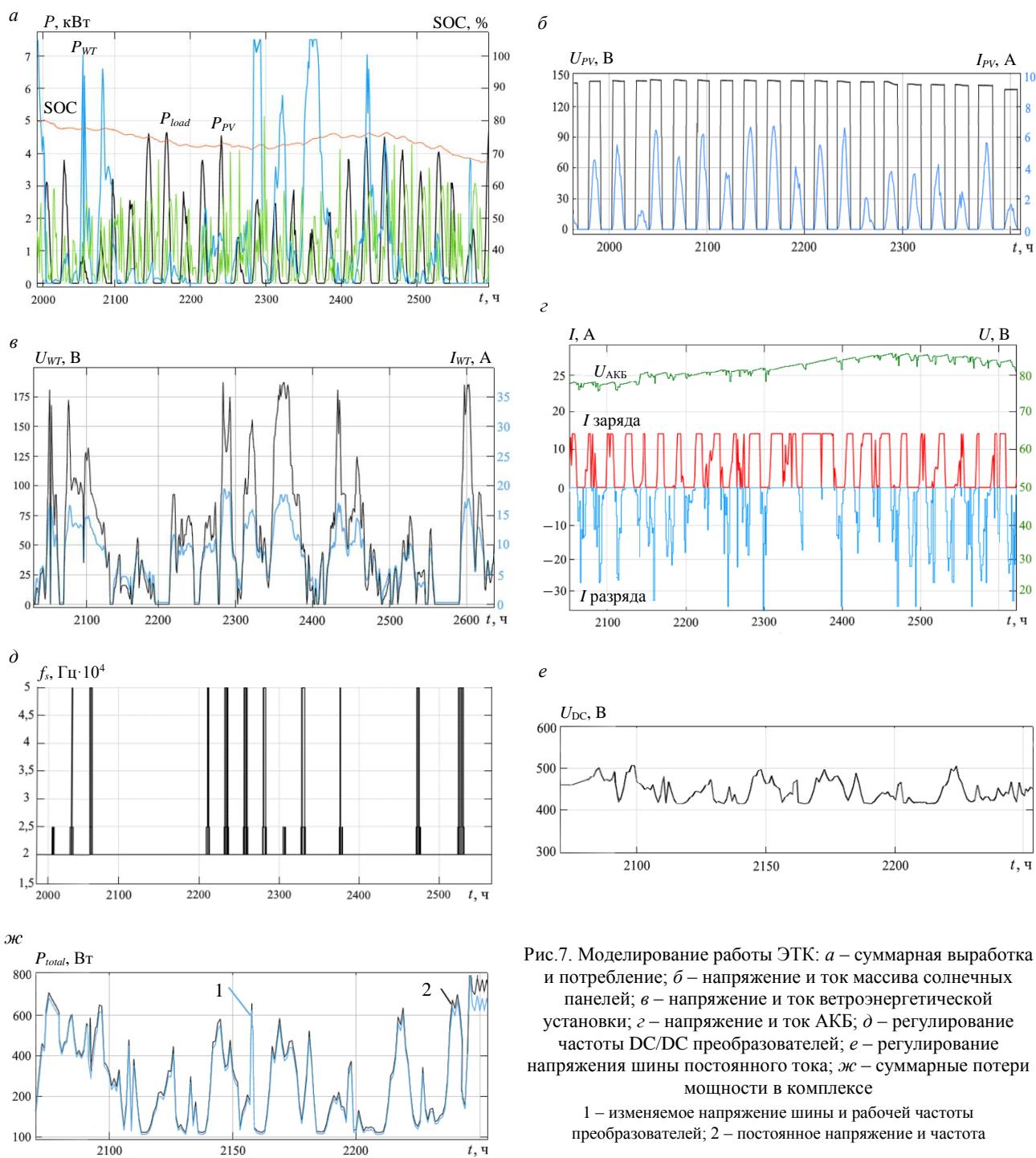


Рис.7. Моделирование работы ЭТК: *а* – суммарная выработка и потребление; *б* – напряжение и ток массива солнечных панелей; *в* – напряжение и ток ветроэнергетической установки; *г* – напряжение и ток АКБ; *д* – регулирование частоты DC/DC преобразователей; *е* – регулирование напряжения шины постоянного тока; *ж* – суммарные потери мощности в комплексе

1 – изменяемое напряжение шины и рабочей частоты преобразователей; 2 – постоянное напряжение и частота

блок связан с преобразователями каналами связи и непрерывно получает от них значения переменных, необходимые для проведения расчетов. Возникают следующие особенности функционирования системы:

- Требуется цифровое управление преобразователями с применением микроконтроллеров (МК) либо программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). При помощи датчиков тока и напряжения они измеряют переменные, необходимые для расчета потерь мощности, и передают их по каналу связи ВБ. На основании измеренного тока проводится регулировка рабочей частоты преобразования.

- Вычислительный блок – это цифровой блок, представляющий собой компьютер или отдельную плату со своим МК либо ПЛИС, в памяти которого хранятся математические модели потерь мощности всех преобразователей.

• Повышение энергоэффективности зависит от точности математических моделей. По этой причине на этапе проектирования комплекса желательна калибровка моделей с реальными преобразователями. Электрические схемы и параметры электронных компонентов преобразователей должны быть заранее известны. Проводить замену элементов можно только на полные функциональные аналоги.

• Скорость обмена данными между ВБ и ЛК преобразователей должна согласовываться со скоростью проведения вычислений, т.е. ВБ успевает провести вычисления прежде, чем получит на вход новые значения токов и напряжений преобразователей.

• Из-за перечисленных выше особенностей не получится использовать любые имеющиеся на рынке преобразователи. Для системы требуется целенаправленная разработка преобразователей, которая, впрочем, не отличается высокой сложностью.

Разработанный подход интеллектуального управления позволяет повысить энергоэффективность ЭТК с ВИЭ. К недостаткам следует отнести необходимость использования цифрового управления и добавление каналов связи для обмена данными между преобразователями и ВБ, что ведет к удорожанию комплекса. Кроме того, для системы будет характерна низкая гибкость, поскольку любое изменение ее структуры либо составных элементов будет приводить к несоответствию математической модели, заложенной в ВБ, с реальной работой комплекса. В этом случае в модель необходимо будет вносить правки.

Заключение. Новое время диктует новые требования. Минерально-сырьевой комплекс в современных условиях – это технологичный, эффективный, надежный, безопасный, постоянно совершенствующийся сектор экономики. В нашей стране большинство месторождений природных ископаемых находится в отдаленных, слабонаселенных районах, где нет легкодоступной электроэнергии. Использование топливных генераторов сопряжено с низкой экологичностью и высокой себестоимостью выработки электричества, что препятствует развитию, вынуждает добывающие компании нести постоянные материальные издержки. Использование ВИЭ является современным технологичным решением, способным дать «вторую жизнь» многим объектам добычающей отрасли и подстегнуть развитие новых проектов.

Несмотря на решение транспортных и экологических проблем, нестабильность генерации электроэнергии и слабая развитость систем ее накопления продолжают оставаться одним из главных препятствий для распространения автономных ЭТК с ВИЭ. Одним из путей решения этих проблем является повышение эффективности использования выработанной энергии. Предложено решение по повышению энергоэффективности комплекса путем адаптивного регулирования режимов его работы. В качестве регулируемых параметров рассматривались уровень напряжения промежуточной шины постоянного тока и рабочая частота преобразователей электроэнергии в составе комплекса. В условиях постоянно меняющихся объемов генерации и потребления, характерных для всех энергосистем с ВИЭ, точка оптимума потерь мощности также изменяется. В ходе исследования был разработан алгоритм автонастройки режима работы комплекса, основанный на использовании математических моделей потерь мощности преобразователей. Модели позволяют с учетом объемов генерации и потребления вычислить оптимальный уровень напряжения шины постоянного тока и рабочую частоту преобразователей для сложившихся условий работы.

Результаты показали, что в ЭТК мощностью 10 кВт сокращение потерь активной мощности за год эксплуатации составило порядка 2 % при варьировании напряжения шины и порядка 5 % при одновременном варьировании напряжения шины и рабочей частоты преобразователей.

Направление будущих исследований будет заключаться в оценке энергетической эффективности гибридных ЭТК с ВИЭ и дизельгенераторными установками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуковский Ю.Л., Королев Н.А., Малькова Я.М. Мониторинг состояния измельчения в барабанных мельницах по результатирующему моменту на валу // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 686-700. DOI: 10.31897/PMI.2022.91
2. Пряхин Е.И., Трошина Е.Ю. Изучение технологических и эксплуатационных особенностей высокотемпературостойких композитных пленок для лазерной маркировки деталей из черных сплавов // Черные металлы. 2023. № 4. С. 74-80. DOI: 10.17580/chm.2023.04.12



3. Сычев Ю.А., Костин В.Н., Сериков В.А., Аладын М.Е. Анализ несинусоидальных режимов в системах электроснабжения горных предприятий с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 1. С. 159-179. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_159
4. Gerasimova I.G., Oblova I.S., Golovina E.I. The Demographic Factor Impact on the Economics of the Arctic Region // Resources. 2021. Vol. 10. Iss. 11. № 117. DOI: 10.3390/resources10110117
5. Lavrik A., Zhukovskiy Yu., Tsvetkov P. Optimizing the Size of Autonomous Hybrid Microgrids with Regard to Load Shifting // Energies. 2022. Vol. 14. Iss. 16. № 5059. DOI: 10.3390/en14165059
6. Samylovskaya E., Makhovikov A., Lutonin A. et al. Digital Technologies in Arctic Oil and Gas Resources Extraction: Global Trends and Russian Experience // Resources. 2022. Vol. 11. Iss. 3. № 29. DOI: 10.3390/resources11030029
7. Khalturin A.A., Parfenchik K.D., Shpenst V.A. Features of Oil Spills Monitoring on the Water Surface by the Russian Federation in the Arctic Region // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11. Iss. 1. № 111. DOI: 10.3390/jmse11010111
8. Kopteva A.V., Ushkova T.O. Development of methods for determining the relative weight of physical factors in pipeline paraffinization // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 266. № 04008. DOI: 10.1051/e3sconf/202126604008
9. Змиеva К.А. Проблемы энергоснабжения арктических регионов // Российская Арктика. 2020. № 8. С. 5-14. DOI: 10.2441/2658-4255-2020-10086
10. Лебедева М.А. Состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики в регионах Крайнего Севера России // Проблемы развития территории. 2021. Т. 25. № 4. С. 139-155. DOI: 10.15838/ptd.2021.4.114.8
11. Hongwei Wu, Sechilaru M., Locment F. Influence of Dynamic Efficiency in the DC Microgrid Power Balance // Energies. 2017. Vol. 10. Iss. 10. № 1563. DOI: 10.3390/en10101563
12. Мартынов С.А., Масько О.Н., Федоров С.Н. Перспективные системы управления энергетическим режимом рудно-термических печей // Цветные металлы. 2022. № 4. С. 87-94. DOI: 10.17580/tsm.2022.04.11
13. Romasheva N., Dmitrieva D. Energy Resources Exploitation in the Russian Arctic: Challenges and Prospects for the Sustainable Development of the Ecosystem // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 24. № 8300. DOI: 10.3390/en14248300
14. Ilinova A., Solovyova V., Yudin S. Scenario-based forecasting of Russian Arctic energy shelf development // Energy Reports. 2020. Vol. 6. S. 9. P. 1349-1355. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.11.022
15. Dastgeer F., Gelani H.E. A Comparative analysis of system efficiency for AC and DC residential power distribution paradigms // Energy and Buildings. 2017. Vol. 138. P. 648-654. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.12.077
16. Elistratov V.V. Renewable Energy Trends within the Concept of Low-Carbon Development // Applied Solar Energy. 2022. Vol. 58. Iss. 4. P. 594-599. DOI: 10.3103/S0003701X22040077
17. Rizzato Lede A.M., Molina M.G., Martinez M., Mercado P.E. Microgrid Architectures for Distributed Generation: A Brief Review // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference – Latin America (ISGT Latin America), 20-22 September 2017, Quito, Ecuador. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ISGT-LA.2017.8126746
18. Abdallah W.J., Hashmi K., Faiz M.T. et al. A Novel Control Method for Active Power Sharing in Renewable-Energy-Based Micro Distribution Networks // Sustainability. 2023. Vol. 15. Iss. 2. № 1579. DOI: 10.3390/su15021579
19. Kumar D., Zare F., Ghosh A. DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications, and Standardizations Aspects // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 12230-12256. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2705914
20. Aaron St. Leger. Demand response impacts on off-grid hybrid photovoltaic-diesel generator microgrids // AIMS Energy. 2015. Vol. 3. Iss. 3. P. 360-376. DOI: 10.3934/energy.2015.3.360
21. Jiechao Lv, Xiaoli Wang, Guishuo Wang, Yuhou Song. Research on Control Strategy of Isolated DC Microgrid Based on SOC of Energy Storage System // Electronics. 2021. Vol. 10. Iss. 7. № 834. DOI: 10.3390/electronics10070834
22. Ayop R., Chee Wei Tan. Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications // Solar Energy. 2018. Vol. 160. P. 322-335. DOI: 10.1016/j.solener.2017.12.016
23. Seguel J.L., Selenme Jr S.I., Moráis L.M.F. Comparison of the performance of MPPT methods applied in converters Buck and Buck-Boost for autonomous photovoltaic systems // Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. 2021. Vol. 29. № 2. P. 229-244. DOI: 10.4067/S0718-33052021000200229
24. Hanzaei S.H., Gorji S.A., Ekteab M. A Scheme-Based Review of MPPT Techniques With Respect to Input Variables Including Solar Irradiance and PV Arrays' Temperature // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 182229-182239. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3028580
25. Pande J., Nasikkar P., Kotecha K., Varadarajan V. A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy Conversion Systems // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. Iss. 11. № 1187. DOI: 10.3390/jmse9111187
26. Belsky A., Dobush V., Ivanchenko D. Wind-PV-Diesel Hybrid System with flexible DC-bus voltage level // Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 11-13 June 2014, Rakvere, Estonia. IEEE, 2014. P. 181-184. DOI: 10.1109/PQ.2014.6866806
27. Honadia P.A.A., Barro F.I., Sané M. Performance Analysis of a Boost Converter with Components Losses // Energy and Power Engineering. 2018. Vol. 10. № 9. P. 399-413. DOI: 10.4236/epe.2018.109025
28. Yuan-Chih Chang, Hao-Chin Chang, Chien-Yu Huang. Design and Implementation of the Battery Energy Storage System in DC Micro-Grid Systems // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 6. № 1566. DOI: 10.3390/en11061566
29. Sayed Kh., Abo-Khalil A.G., Alghamdi A.S. Optimum Resilient Operation and Control DC Microgrid Based Electric Vehicles Charging Station Powered by Renewable Energy Sources // Energies. 2019. Vol. 12. Iss. 22. № 4240. DOI: 10.3390/en12224240
30. Ternifi T.Z., Atik L., Bachir G. et al. Quality improvement of the AC electrical energy produced by a modular inverter dedicated to photovoltaic applications // AIP Conference Proceedings. Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability (TMREES), 15-18 April 2016, Beirut, Lebanon. AIP Publishing, 2016. Vol. 1758. Iss. 1. № 030048. DOI: 10.1063/1.4959444
31. Hannan S., Aslam S., Ghayur M. Design and real-time implementation of SPWM based inverter // International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), 22-23 February 2018, Lahore, Pakistan. IEEE, 2018. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICEET1.2018.8338637

32. Castillo-Calzadilla T., Cuesta M.A., Olivares-Rodriguez C. et al. Is it feasible a massive deployment of low voltage direct current microgrids renewable-based? A technical and social sight // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 161. № 112198. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112198
33. Habibi S., Rahimi R., Ferdowsi M., Shamsi P. DC Bus Voltage Selection for a Grid-Connected Low-Voltage DC Residential Nanogrid Using Real Data with Modified Load Profiles // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 21. № 7001. DOI: 10.3390/en14217001
34. Siraj K., Khan H.A. DC distribution for residential power networks – A framework to analyze the impact of voltage levels on energy efficiency // Energy Reports. 2020. Vol. 6. P. 944-951. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.04.018
35. Лукутин Б.В., Муравьев Д.И. Перспективы децентрализованных систем электроснабжения постоянного тока с распределенной солнечной генерацией // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 6. С. 184-196. DOI: 10.18799/24131830/2020/6/2688
36. Zhikang Shuai, Junbin Fang, Fenggen Ning, Z. John Shen. Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. Part 3. P. 3670-3682. DOI: 10.1016/j.rser.2017.10.096
37. Elvira D.G., Blaví H.V., Pastor À.C., Salamero L.M. Efficiency Optimization of a Variable Bus Voltage DC Microgrid // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 11. № 3090. DOI: 10.3390/en11113090
38. Eichhorn T. Boost Converter Efficiency Through Accurate Calculations // Power Electronics Technology. 2008. Iss. 9. P. 30-35.
39. Das N., Kazimierczuk M.K. Power losses and efficiency of buck PWM DC-DC power converter // Proceedings Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 23-26 October 2005, Indianapolis, USA. IEEE, 2005. P. 417-423. DOI: 10.1109/EEIC.2005.1566330
40. Balikci A., Azizoğlu B.T., Durbaba E., Akpinar E. Efficiency Calculation of Inverter for PV Applications Using MATLAB and SPICE // International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), 25-27 May 2017, Brasov, Romania. IEEE, 2017. P. 593-598. DOI: 10.1109/OPTIM.2017.7975033
41. Geetha K., Sreenivasappa B.V. Power Loss Calculation for IGBT and SiC MOSFET // Journal of Xi'an University of Architecture & Technology. 2020. Vol. XII. Iss. VIII. P. 378-382. DOI: 10.37896/JXAT12.08/2637
42. Zheliazkov Y. Researching the efficiency of buck converter synchronous rectifier // Technology Audit and Production Reserves. 2020. Vol. 4. № 1(54). P. 44-50. DOI: 10.15587/2706-5448.2020.207893
43. Hinov N., Arnaudov D., Valchev V., Vuchev S. Comparative Loss Analysis of Boost and Synchronous Boost DC-DC Converters // XXVI International Scientific Conference Electronics (ET), 13-15 September 2017, Sozopol, Bulgaria. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ET.2017.8124347
44. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 6. С. 38-51.
45. Flores D.R.L., Gómez J.A.P., Herrera R.S., Alvarado M.S. Tracking Control of the Maximum Power Point (MPPT) in a Small Wind Turbine (SWT) for Isolated Residential Applications // WSEAS Transactions on Circuits and Systems. 2013. Vol. 12. Iss. 8. P. 253-261.

Авторы: В.А.Шпенст, д-р техн. наук, декан, <https://orcid.org/0000-0001-6091-6916> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.А.Бельский, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-2619-1496> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Е.А.Орел, аспирант, orel.geny@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4965-0998> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.