ISSN 2410-5031

Научно-практический журнал

АГРОТЕХНИКА И ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ



ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.В. ПАРАХИНА

№ 3 (48), 2025 г.

ОРЕЛ 2025

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – **А.В. Виноградов,** доктор технических наук, доцент,
главный научный сотрудник, заведующий лабораторией электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики ФГБНУ ФНАЦ ВИМ;
профессор кафедры "Электроснабжение" Орловского ГАУ,
профессор кафедры "Электроснабжение и теплоэнергетика" РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:
Буяров Виктор Сергеевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор ФГБОУ ВО Орловский ГАУ.
Большев Вадим Евгеньевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБНУ "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ".
Букреев Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник ФГБНУ "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ".
Виноградова Алина Васильевна, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории электроснабжения и теплообеспечения ФГБНУ "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ".
Шарупич Вадим Павлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, академик МАЭН, директор НИПИ «Градоагроэкопром».
Ковалев Михаил Михайлович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный научный центр лубяных культур (ФГБНУ ФНЦ ЛК).
Коломейченко Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ; заведующий отделом Управления перспективных технологий Центра сельскохозяйственного машиностроения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».
Кузнецов Юрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Надежность и ремонт машин» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ.
Лавров Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры механизации сельского хозяйства ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева.
Олин Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и эксплуатация электрооборудования» ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия».
Осокин Владимир Леонидович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрификация и автоматизация» ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет».
Черкасова Нина Ильинична, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Рубцовского индустриального института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул.
Шпиганович Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», член-корреспондент Российской Академии Естествознания.

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики» ФГБНУ ФНАЦ ВИМ **А.К. Букреева**
ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ – кандидат технических наук, доцент **Р.П. Беликов**

Зарегистрировано в федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), номер свидетельства ПИ № ФС 77-78888, дата регистрации 28.08.2020.
Договор с РИНЦ №410-07/2014 от 15.07.2014г. **ISSN 2410-5031**

Учредитель и издатель: ФГБОУ ВО Орловский ГАУ
Адрес издателя: 302019, Россия, г. Орел, ул. Генерала Родина, д. 69, тел.: +7(4862) 76-14-51; факс: +7(4862) 76-06-64.
Адрес редакции: 302019, Орловская обл., г. Орел, ул. Генерала Родина, д. 69, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, факультет агротехники и энергообеспечения, ауд. 2-211.
Тел.: 8(4862) 76-11-07

Адрес типографии: 302028, г. Орел, бульвар Победы, 19. ФГБОУ ВО Орловский ГАУ.
Тел.: 8(4862) 43-25-53 **E-mail: winaleksandr@yandex.ru**
Дата выхода журнала: 11.11.2025г.
© ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2025 **Тираж 100 экз.** Распространяется бесплатно



ОГЛАВЛЕНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 110 КВ С УЧЁТОМ СЕЗОННОСТИ ПРИЧИН ОТКЛЮЧЕНИЙ И КОСВЕННЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ УРОВНЯ АВТОМАТИЗАЦИИ 8

А.В. Виноградова[1,2]

[1] ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

[2] ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ СТРАТЕГИЙ ПО ЗАМЕНЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6-10/ 0,4 КВ В ЭЛЕКТРОСЕТЕВЫХ КОМПАНИЯХ 19

Е.В. Винокуров[1], Н.С. Сорокин[1], А.В. Виноградов[1,2], Р.А.Тендетник[1]

[1] ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

[2] ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

[3]РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева

НЕСИММЕТРОИЧНЫЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4 КВ, МЕТОДЫ РАСЧЁТА 31

Р.А. Тендетник, Е.В. Винокуров

ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 0,4 кВ В СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ENGEE 37

А.А. Лансберг

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

МЕТОДЫ ПОДДЕРЖАНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 48

И.О. Голиков

ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ УСТРОЙСТВА СИММЕТРИРОВАНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПРИ РАБОТЕ НА ОДНОФАЗНУЮ НАГРУЗКУ 59

С.В. Крамской[1], А.В. Виноградов [1,2,3], И.В. Поздняков[1]

[1]ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

[2]ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

[3]РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева

ЛИТИЙ КАК ОСНОВА РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ТРАНСПОРТА: ОЦЕНКА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА РОССИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РАЗВИТИЯ
А.И. Богачев 68
ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ РАБОТ
Н.В. Бабоченко[1], В.А. Краснов[1], С.А. Зубрилина[2] 74
[1]ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет»
[2]МОУ «СШ №77 Кировского района Волгограда»

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАШИН И ТЕХНОЛОГИЙ МОЙКИ КОРНЕКЛУБНЕПЛОДОВ
В.В. Бидогаев[1], С.Н. Шуханов[1], Д.Н. Голубев[2], А.С. Доржиев[3] 81
[1]ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ им. А.А. Ежевского
[2]ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет
[3]ФГБОУ ВО Бурятская ГСХА им. В.Р. Филиппова

ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРА



ПЕНДЖИЕВА АХМЕДА МЫРАДОВИЧА

11 ноября исполняется 70 лет ученому в области возобновляемой энергетики и агротехники выращивания тропических культур, доктору технических и доктору сельскохозяйственных наук, профессору, члену корреспонденту Российской академии естествознания (РАЕ), академику Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ) Пенджиеву Ахмеду Мырадовичу.

Родился 11 ноября 1955 года в селе Кызыл-Аяк, Керкинского района Лебапского велоята (область). После окончания средней школы поступил на физический факультет Туркменского государственного университета им. А.М. Горького (ныне ТГУ Махтумкули), после окончания которого в 1978 году был направлен в Туркменский филиал Всесоюзного научно-производственного объединения «Квант» (НПО «Квант»). Поступил заочно в аспирантуру НПО «Солнце». В 1981 году был избран секретарём комсомольской организации Академии наук Туркменистана, стал младшим научным сотрудником НПО «Солнце».

В 1987 году защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук по теме «Разработка, создание и исследования гелиотеплицы траншейного типа для выращивания кофейных деревьев», затем переведён в организационный отел Пролетарского РК КП Туркменистана, избран заведующим кафедрой «Основы вычислительной техники и биомеханики» Национального института спорта и туризма Туркменистана. В 1995 году соискатель – докторант НПО «Солнце».

В 2000 году защитил докторскую диссертацию на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук в Московском государственном университете леса на тему «Агротехника выращивания дынного дерева (Carica papaya L.) в условиях защищенного грунта в Туркменистане». В 2022 году защитил вторую докторскую диссертацию (технические науки) в Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ на тему «Научное обоснование использования энергетических технологий на основе возобновляемых источников энергии в Туркменистане».

Научная деятельность Пенджиева Ахмеда Мырадовича многогранна. Научно обоснована методология и разработана геоинформационная технологическая карта расчёта энерго- и водоснабжения пастбищных районов для размещения солнечных энергетических установок по мощности вырабатываемой энергии в зависимости от глубины колодцев, что позволяют рассчитать энергетические и водные ресурсы на пастбищах, сокращение объёма выбросов парникового газа, снижение расходов органического топлива для развития пастбищных хозяйств пустыни и создания социально-бытовых, экономических и экологических условий жизнедеятельности в Каракумах.

Составлена геоинформационная ветроэнергетическая ресурсная карта, распределение мощности ветрового потока по пустынным территориям с временной зависимостью средней скорости ветра. Оценены энергоэффективные районы использования геотермальных вод для теплоснабжения обогрева сооружений и тепличных хозяйств в различных регионах Туркменистана.

Обоснованы подходы к использованию энергии небольших водотоков и технические энергопотенциалы по экономии топлива и экологическим показателям мини-ГЭС.

Разработан и подтверждён авторским патентом автономный безотходный гелиобиотехнологический энергетический комплекс, который дает возможность выращивать тропические и субтропические культуры, сырье для производства биологически активных добавок с одновременным содержанием птиц и животных.

В настоящее время Ахмед Мырадович Пенджиев работает доцентом кафедры автоматизации производственных процессов в Туркменском государственном архитектурно-строительном институте. Под его руководством ведётся ряд научно-исследовательских работ по развитию использования возобновляемых источников энергии. Опубликовано боле 800 научных статьей, брошюр, книг, монографии, учебников и учебно-методических пособий, получены патенты на изобретение. Известны стали такие научные монографии Ахмеда Мырадовича, как: «Экоэнергетические ресурсы возобновляемых источников энергии», «Развитие солнечной энергетики в Туркменистане», «Экологические проблемы освоения пустынь», «Агротехника выращивания дынного дерева в условия защищенного дерева в Туркменистане», «Ресурсы и эффективность использования энергии геотермальных вод», «Изменение климата и возможности уменьшения антропогенных нагрузок», «Основы ГИС в развитии возобновляемой энергетики», а также учебники: «Nanotehnologiýanyň esaslary», «Önümçiligi gurnamak we dolandyrmak», «Elektrik ölçegler we metrologiýa» и многие другие книги.

Ахмед Мырадович является членом редакционного комитета Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология», «Гелиотехника» и «Научный результат: серия экономические исследования». За научные достижения среди молодежи в области использования возобновляемых источников энергетики стал Лауреатом премии Ленинского комсомола в области науки и техники.

За особые заслуги перед независимым государством и родным народом награжден медалью Туркменистана «Watana bolan söýgüsi üçin». За научно-методическую работу в подготовке спортсменов присвоено звание «Заслуженный тренер Туркменистана». За общественное признание и достижение в области фундаментальных и прикладных научных исследований и образования награжден Международными медалями и орденами медалями: М.В. Ломоносова, К. Ушинского, Н.И. Вавилова, А. Нобеля, К.А. Тимирязева, Гиппократа и LABORE ET SCIENTIA – ТРУДОМ И ЗНАНИЕМ.

Ахмед Мырадович пользуется авторитетом, заслуженным уважением и признанием не только в Туркменистане, но и среди зарубежных коллег. Его термин «экоэнергетика» включен в реестр, как новое научное направление по специальностям: 05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии; 03.02.08 – Экология (по отраслям Энергетика); 11.00.11 – Охрана окружающей среды и хозяйственное использования природных ресурсов. Его человеческие качества, такие как доброжелательность, прямолинейность, отзывчивость, стремление к познанию характеризуют трудолюбие и упорство в достижении поставленной цели. Все эти качества привлекают уважение коллег и молодежи.

Научная деятельность Пенджиева А.М. направлена на развитие использования возобновляемых источников в области освоения пустынь и снижения антропогенных нагрузок на окружающую среду.

Поздравляем Ахмеда Мырадовича с юбилеем, желаем крепкого здоровья, успехов и новых научных открытий и достижений, которым он посвятил свою жизнь.

С огромным и искренним уважением и наилучшими пожеланиями,
Коллективы:
Редакционная коллегия журнала «Агротехника и энергообеспечение»;
кафедра «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловского ГАУ;
лаборатория электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

УДК 621.3.019.3:621.315.1.027.7:621.3.064.2”321/324”:681.5

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 110 КВ С УЧЁТОМ СЕЗОННОСТИ ПРИЧИН ОТКЛЮЧЕНИЙ И КОСВЕННЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ УРОВНЯ АВТОМАТИЗАЦИИ

А.В. Виноградова[1,2]

[1] ФГБОУ ВО Орловский ГАУ
[2] ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Аннотация. *Количественные показатели надёжности электроснабжения необходимы для расчётов эксплуатационных показателей, которые способствуют выявлению узких мест систем электроснабжения, а также для разработки и обоснования мероприятий по усовершенствованию электрических сетей. Рассмотрен ряд показателей надёжности электрических сетей 110 кВ (количество отключений, время восстановления, суммарное время восстановления электроснабжения, суммарная отключенная мощность) с разбивкой по причинам отключений. Проанализирована сезонность отказов в электрических сетях по месяцам года. Предложен показатель, косвенно характеризующий уровень автоматизации и резервирования в электрических сетях. Он представляет собой отношение суммарного времени восстановления оборудования сети при отказах к времени восстановления потребителей при отключениях, вызванных теми же отказами. Для сетей 110 кВ данный показатель составил 17отн.ед, для сетей 35 кВ – 4,2 отн. ед., для сетей 10 кВ – 1,58 отн. ед., для сетей 0,4 кВ – 1,04 отн. ед., что отражает разную оснащённость данных сетей средствами автоматики и резервирования.*

Ключевые слова: *аварийные отключения, надежность, электроснабжение, воздушные линии, электрические сети, показатели надёжности электроснабжения, время восстановления, отключенная мощность.*

Введение. В электросетевом комплексе регулярно модернизируют электрические сети, внедряют новые технологии производства и подходы к управлению конфигурацией сетей. Однако своевременное обновление сетей происходит не повсеместно. В первую очередь обновляются, реконструируются сети с частыми отказами в них, требующие увеличения пропускной способности. Для контроля состояния сетей контролируют отключения, ведя журнал аварийных отключений, в котором указывают факты отключения и описания каждого из них. В это описание входит информация о времени начала и окончания отключения, время перерыва в электроснабжении, причина отключения и ряд других сведений. Это позволяет проводить дальнейший анализ данных по отключениям с получением значений суммарного количества отключений за анализируемый период, значений отключенной мощности и т.д. Система базовых показателей надёжности, получаемых из анализа журналов отключений приведена в [9].

Причины отключений в электрических сетях разнообразны. Часто они зависят от состояния сетей, уровня их эксплуатации. Анализу причин посвящены работы многих

авторов. Например, в работе [5] рассмотрены подходы к расчёту индекса технического состояния воздушных линий электропередачи с учётом причин утренних отключений ВЛ 110 кВ. В работах [1,8] исследуют причины аварийных отключений, последствия и рекомендации по устранению повреждений электрических сетей 110 кВ. Многие причины связаны с климатическими факторами и несвоевременной эксплуатацией [4, 6]. Например, в статье [7] проанализировано 475 аварийных отключений за период с 2017 по 2019 годам в Республике Татарстан. Выявлено, что наибольшее влияние на число отключений оказали недостатки конструкции, невыявленные причины, внешние воздействия.

Одним из показателей, характеризующих отключения, является время восстановления электроснабжения, в которое входят: время получения информации об отказе, время на его распознавание, время на ремонт повреждений и время на согласование и выполнение включений [2]. В разных сетях оно может достигать порядка 5 часов и более [3].

Важным является и анализ сезонности причин отключений, их последствий в разное время года. Эти последствия зависят, в том числе, от уровня автоматизации и резервирования в электрических сетях. Следует находить показатели, способные характеризовать этот уровень.

Цель исследования – на основе анализа статистических данных определить показатели надёжности электрических сетей 110 кВ по причинам отключений, исследовать сезонность причин и предложить показатель, косвенно характеризующий уровень автоматизации и резервирования в электрических сетях.

Материалы и методы исследования. Исследования выполнялись с использованием статистического материала по журналам отключений за 6 лет. Общая протяжённость исследуемых сетей составила 1736 км. Были рассмотрены такие показатели надёжности электроснабжения, как количество отключений, время восстановления, суммарное время восстановления электроснабжения, суммарная отключенная мощность.

Метод исследования включал в себя анализ журналов отключений по исследуемым сетям с целью сбора статистических данных и их структурирования. Использованы дескриптивные и диагностические методы анализа.

Результаты и обсуждение. При анализе аварийных отключений электрических сетей 110 кВ были определены показатели надёжности электроснабжения с учётом сезонности причин отключений такие как количество аварийных отключений, ед.; суммарное время восстановления электроснабжения, ч; время восстановления после аварийных отключений, ч; суммарная отключенная мощность, МВт. Полученные данные сведены в таблицы 1 – 4.

Таблица 1. Распределение количества аварийных отключений ВЛ 110 кВ по месяцам года и причинам

	Месяц											
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Отключение высоковольтного выключателя (ВВ) токовой защитой нулевой последовательности (ТЗНП)	1	6	3	0	12	11	21	22	4	5	3	2
Повреждение изолятора	0	0	0	2	4	7	6	17	5	2	0	1
Отключение ВВ дифференциальной защитой (ДФЗ)	2	0	0	4	7	7	5	4	9	1	1	2
Обрыв провода	1	1	1	2	3	4	1	1	0	2	0	0
Птицы	0	0	1	0	4	4	2	2	2	1	0	0
Отключение ВВ токовой отсечкой (ТО)	0	1	0	0	1	5	3	2	1	0	1	1

Отключение ВВ продольной дифференциальной направленной защитой (ПДНЗ)	0	0	1	0	0	3	1	1	0	0	0	0
Атмосферные перенапряжения	0	0	0	1	0	2	1	1	0	0	0	0
Отключение ВВ максимальной токовой защитой (МТЗ)	0	0	0	0	0	3	1	0	0	1	0	0
Деятельность сторонних лиц	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1
Отключение ВВ дуговой защитой (ДЗ)	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Падение деревьев, веток	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0
Прочие причины	1	1	1	2	1	1	2	1	1	0	7	7
Всего	5	9	8	11	34	47	44	53	23	12	8	8

В таблице 1 перечень причин отключений расположен в порядке убывания количества аварийных отключений за год. Рост количества отключений по всем причинам наблюдается с мая по сентябрь. На август приходится максимальное значение. Первопричины отключений связаны большей части с природно-климатическими факторами, такими как грозы, сильные ветра, перелёт птиц. Их воздействие приводит к срабатыванию защит на ВЛ.

В таблице 2 приведены данные по суммарному времени восстановления ВЛ 110 кВ. Под этим показателем понимается сумма времени обнаружения и устранения отключений ВЛ для рассматриваемого количества отключений за заданный период времени. При этом отключения ВЛ не всегда приводят к отключениям потребителей.

Таблица 2. Суммарное время восстановления ВЛ 110 кВ

Суммарное время восстановления, ч														
Причина и рассматриваемый год		**Месяц**												
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**Всего**
Деятельность сторонних лиц	*2018*	0	0	0	0	0	0	0	0	7,07	0	0,07	4,9	12,04
	2018-2023	0	0	0	0	0	0	0	0	7,07	0	0,07	4,9	12,04
Не выявлено	*2019*	0	11,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,13
	2018-2023	0	11,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,13
Обрыв провода	*2018*	0	0	0	0	16,13	9,6	0	8,38	0	0	0	0	34,12
	2019	9,02	14,9	0	0	0	0	0	0	0	12,12	0	0	36,03
	2020	0	0	0	0	0	7,92	0	0	0	0	0	0	7,92
	2021	0	0	0	28,18	21,53	0	0	0	0	0	0	0	49,71
	2022	0	0	0	16,98	0	0	0	0	0	0	0	0	16,98
	2018-2023	9,02	14,9	0	45,17	37,67	17,52	0	8,38	0	12,1	0	0	144,77
Оторание провода	*2018*	0	0	0	0	0	0	0,18	0	0	0	0	0	0,18
	2018-2023	0	0	0	0	0	0	0,18	0	0	0	0	0	0,18
Отключение ВВ ДФЗ	*2018*	0	0	0	0	0	1,27	0	0	0	0	0	0	1,27
	2019	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
	2020	0	0	0	0	0	0	0,92	0	0	31,25	0	0	32,17
	2021	0	0	0	0	0	1,58	0	0	0	0	0	0,15	1,73
	2022	9,57	0	0	24,42	32,92	0	0	0	53,3	0	0	0	120,2
	2023	0	0	0	0	0	0	12,32	0	2,17	0	0	0	14,48
	2018-2023	9,57	0	0	24,42	32,92	2,95	13,23	0	55,47	31,25	0	0,15	169,95

Отключение ВВ ДЗ	*2018*	0	0	10,95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,95
	2018-2023	0	0	10,95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,95
Отключение ВВ ТЗНП	*2018*	0	0	0	0	1,23	0	0	0	0	0	0	0	1,23
	2020	0	0	0	0	0	1,22	0	0	0	0	0	0	1,22
	2021	0	0,23	0	0	20,72	0	0	0	0	0	0	0	20,95
	2022	0	0	0	0	31,9	0	0	0	13,63	0,67	0	0	46,2
	2023	0,55	0	0	0	0	0,07	10,93	0	0	0	0,1	0	11,65
	2018-2023	0,55	0,23	0	0	53,85	1,28	10,93	0	13,63	0,67	0,1	0	81,25
Отключение ВВ ТО	*2021*	0	14,62	0	0	0	1,52	2,02	0	0,95	0	5,35	0	24,45
	2022	0	0	0	0	3,87	22,07	0,07	0	0	0	0	0	26
	2018-2023	0	14,62	0	0	3,87	23,58	2,08	0	0,95	0	5,35	0	50,45
Падение деревьев, веток	*2018*	0	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0,3
	2019	0	0	0	0	0	0	0	5,4	0	0	0	0	5,4
	2018-2023	0	0	0	0	0,3	0	0	5,4	0	0	0	0	5,7
Повреждение привода ВВ	*2022*	7,95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,95
	2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2018-2023	7,95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,95
Пожар	*2019*	0	0	0	0,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08
	2018-2023	0	0	0	0,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08
Пробой или повреждение изолятора	*2018*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,55	18,55
	2019	0	0	0	0	0	0	0	74,5	0	0	0	0	74,5
	2020	0	0	0	0	10,85	0	11,48	0,88	0	0	0	0	23,21
	2018-2023	0	0	0	0	10,85	0	11,48	75,38	0	0	0	18,55	116,27
Ошибка персонала	*2018*	0	0	0	0	17,98	0	0	0	0	0	0	0	17,98
	2018-2023	0	0	0	0	17,98	0	0	0	0	0	0	0	17,98
Всего	*2018*	0	0	10,95	0	35,65	10,87	0,18	8,38	7,07	0	0,07	23,45	96,62
	2019	9,0167	26,0333	0	0,0833	0	0,1	0	79,9	0	12,1167	0	0	127,25
	2020	0	0	0	0	10,85	9,13	12,4	0,88	0	31,25	0	0	64,52
	2021	0	14,85	0	28,18	42,25	3,1	2,02	0	0,95	0	5,35	0,15	96,85
	2022	17,52	0	0	41,4	68,68	22,07	0,07	0	66,93	0,67	0	0	217,33
	2023	0,55	0	0	0	0	0,07	23,25	0	2,17	0	0,1	0	26,13
	2018-2023	27,08	40,88	10,95	69,67	157,43	45,33	37,92	89,17	77,12	44,03	5,52	23,6	628,7

В таблице 2 приведены данные только по тем годам, когда встречалась та, или иная причина отключений. Например, такие причины, как отключение ВВ ДЗ, пожар и ошибка персонала встречались только в одном году из наблюдаемых шести, а причины отключение ВВ ТО, пробой или повреждение изолятора – по два года из шести. При этом последние две причины привели к одним из наибольших значений суммарного времени восстановления.

По отношению к таблице 1 расширен перечень причин, так как в таблице 1 ряд из них были вынесены в прочие. Если оценивать показатель в сумме по всем причинам, то максимальные значения его приходятся на апрель-май и август-сентябрь с пиком в мае. Наиболее значимыми причинами являются отключение ВВ ДФЗ – 169,95 ч; обрыв провода –

144,77 ч; пробой и повреждение изолятора - 116,27 ч; отключение ВВ ТЗНП – 81,25 ч; отключение ВВ ТО – 50,45 ч. По остальным причинам значение показателя суммарно менее 11 % от общего. Причины отключение ВВ ТО, обрыв провода, отключение ВВ ДФЗ имеют наименее выраженную по сравнению с другими сезонность. Хотя большие значения времени восстановления при отключениях по данным причинам имеют разные значения по месяцам. Есть и месяцы, когда отключений по указанным причинам не наблюдалось все шесть лет. Причина пробой или повреждение изолятора наиболее характерна для весенне-летнего периода, хотя в 2018 году она наблюдалась в декабре.

В таблице 3 показаны значения показателя суммарного времени восстановления электроснабжения, под которым понимается сумма времени обнаружения и устранения аварийного отключения в ВЛ 110 кВ (приведшего к отключениям потребителей) с момента отключения до момента восстановления электроснабжения потребителей для рассматриваемого количества аварийных отключений за заданный период времени (определяется по сумме длительностей перерывов в электроснабжении при аварийных отключениях в журнале отключений).

Таблица 3. Суммарное время восстановления электроснабжения

Суммарное время восстановления электроснабжения, ч														
		Месяц												
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**Всего**
Деятельность сторонних лиц	*2018*	0	0	0	0	0	0	0	0	0,45	0	0,07	0,88	1,4
	2018-2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0,45	0	0,07	0,88	1,4
Не выявлено	*2019*	0	1,47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,47
	2018-2023	0	1,47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,47
Обрыв провода	*2018*	0	0	0	0	0	0	0	0,52	0	0	0	0	0,52
	2019	0,8	0,35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,15
	2020	0	0	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0	0	0,75
	2021	0	0	0	0,05	0,22	0	0	0	0	0	0	0	0,27
	2022	0	0	0	1,65	0	0	0	0	0	0	0	0	1,65
	2018-2023	0,8	0,35	0	1,7	0,22	0,75	0	0,52	0	0	0	0	4,33
Отключение ВВ ДФЗ	*2018*	0	0	0	0	0	0,67	0	0	0	0	0	0	0,67
	2019	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
	2020	0	0	0	0	0	0	0,58	0	0	0,32	0	0	0,9
	2021	0	0	0	0	0	0,23	0	0	0	0	0	0	0,23
	2022	0,97	0	0	1,25	4,4	0	0	0	1,28	0	0	0	7,9
	2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0,35	0	0	0	0,35
	2018-2023	0,97	0	0	1,25	4,4	1	0,58	0	1,63	0,32	0	0	10,15
Отключение ВВ ДЗ	*2018*	0	0	0,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,58
	2018-2023	0	0	0,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,58
Отключение ВВ ТЗНП	*2018*	0	0	0	0	0,38	0	0	0	0	0	0	0	0,38
	2021	0	0,23	0	0	0,9	0	0	0	0	0	0	0	1,13
	2022	0	0	0	0	4,4	0	0	0	1,48	0,67	0	0	6,55
	2023	0	0	0	0	0	0,07	0	0	0	0	0	0	0,07
	2018-2023	0	0,23	0	0	5,68	0,07	0	0	1,48	0,67	0	0	8,13

Отключение ВВ ТО	*2021*	0	0,78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,78
	2022	0	0	0	0	3	1,02	0,07	0	0	0	0	0	4,08
	2018-2023	0	0,78	0	0	3	1,02	0,07	0	0	0	0	0	4,87
Падение деревьев, веток	*2018*	0	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0,3
	2019	0	0	0	0	0	0	0	2,08	0	0	0	0	2,08
	2018-2023	0	0	0	0	0,3	0	0	2,08	0	0	0	0	2,38
Повреждение привода ВВ	*2022*	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,13
	2018-2023	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,13
Пожар	*2019*	0	0	0	0,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08
	2018-2023	0	0	0	0,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08
Пробой или повреждение изолятора	*2018*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,42	0,42
	2019	0	0	0	0	0	0	0	0,18	0	0	0	0	0,1833
	2020	0	0	0	0	1,37	0	0,77	0,42	0	0	0	0	2,5501
	2018-2023	0	0	0	0	1,37	0	0,77	0,6	0	0	0	0,42	3,15
Ошибка персонала	*2018*	0	0	0	0	0,32	0	0	0	0	0	0	0	0,32
	2018-2023	0	0	0	0	0,32	0	0	0	0	0	0	0	0,32
Всего	*2018*	0	0	0,58	0	1	0,67	0	0,52	0,45	0	0,07	1,3	4,58
	2019	0,8	1,82	0	0,08	0	0,1	0	2,27	0	0	0	0	5,07
	2020	0	0	0	0	1,37	0,75	1,35	0,42	0	0,32	0	0	4,2
	2021	0	1,02	0	0,05	1,12	0,23	0	0	0	0	0	0	2,42
	2022	1,1	0	0	2,9	11,8	1,02	0,07	0	2,77	0,67	0	0	20,32
	2023	0	0	0	0	0	0,07	0	0	0,35	0	0	0	0,42
	2018-2023	1,9	2,84	0,58	3,03	15,28	2,83	1,42	3,2	3,57	0,98	0,07	1,3	37

Отличие значений показателя от приведённого выше времени восстановления в том, что он учитывает время восстановления именно электроснабжения, а не полное время восстановления ВЛ. Время восстановления электроснабжения как правило меньше времени восстановления ВЛ, так как при отказах включаются устройства резервирования, осуществляющие электроснабжение от других ВЛ. Так, суммарное значение времени восстановления электроснабжения составило 37 ч за период 2018 – 2023 гг., а суммарное значение времени восстановления ВЛ 110 кВ – 628,7 ч за тот же период, то есть оно больше в 17 раз. Такое соотношение характеризует высокую оснащённость сетей 110 кВ средствами автоматизации и резервирования. Данное соотношение можно считать показателем уровня автоматизации и резервирования сетей, $У_{авир}$, отн. ед., и определять для разных классов сетей следующим образом:

$$У_{авир} = \frac{T_в^{об}}{T_в} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{ав}} T_{вi}^{об}}{\sum_{i=1}^{n_{ав}} T_{вi}}, \quad (1)$$

где $T_в^{об}$ –суммарное время восстановления, ч;

$T_{вi}^{об}$ – время обнаружения и устранения i-го отказа элемента электрической сети (соответствует длительности событий при аварийных отключениях в журнале отключений), ч;

$n_{ав}$ – количество аварийных отключений, ед. за заданный период времени.

$T_в$ – суммарное время восстановления электроснабжения, ч;

$T_{вi}$ – время обнаружения и устранения i-го отказа в электрической сети с момента отключения до момента восстановления электроснабжения потребителей (соответствует

длительности перерыва в электроснабжении при i-м аварийном отключении в журнале отключений), ч.

Таким образом, для сетей 110 кВ данный показатель составил 17отн.ед. По итогам статистических исследований в сетях других классов напряжения (например, по данным из [10, 11]) выявлено, что для сетей 35 кВ – 4,2 отн. ед., для сетей 10 кВ – 1,58 отн. ед., для сетей 0,4 кВ – 1,04 отн. ед., что отражает разную оснащённость данных сетей средствами автоматики и резервирования.

Наиболее значимыми причинами по показателю суммарного времени восстановления электроснабжения являются отключение ВВ ДФЗ – 10,15 ч; отключение ВВ ТЗНП – 8,13 ч; отключение ВВ ТО – 4,87 ч; обрыв провода – 4,33 ч; пробой и повреждение изолятора - 3,15 ч; по остальным причинам суммарно значение показателя не превышает 17 % от суммарного его значения.

В таблице 4 приведены значения суммарной отключенной мощности при аварийных отключениях ВЛ 110 кВ, под которой понимается сумма отключенных мощностей при аварийных отключениях за заданный период времени, $\boldsymbol{P}_{\text{ав}}$, МВт:

$$\boldsymbol{P}_{\text{ав}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{ав}}} \boldsymbol{P}_{\text{ав}i}, \qquad (2)$$

где $\boldsymbol{P}_{\text{ав}i}$ – отключенная мощность при i-м аварийном отключении за заданный период времени, МВт.

Таблица 4. Суммарная отключенная мощность при аварийных отключениях ВЛ 110 кВ

Суммарная отключенная мощность при аварийных отключениях, МВт														
		Месяц												
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**Всего**
Деятельность сторонних лиц	*2018*	0	0	0	0	0	0	0	0	0,98	0	3,3	4,9	9,18
	2018-2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0,98	0	3,3	4,9	9,18
Не выявлено	*2019*	0	0,22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,22
	2018-2023	0	0,22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,22
Обрыв провода	*2018*	0	0	0	0	0	0	0	1,32	0	0	0	0	1,32
	2019	4,15	0,54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,69
	2020	0	0	0	0	0	1,83	0	0	0	0	0	0	1,83
	2021	0	0	0	3,5	3,3	0	0	0	0	0	0	0	6,8
	2022	0	0	0	2,68	0	0	0	0	0	0	0	0	2,68
	2018-2023	4,15	0,54	0	6,18	3,3	1,83	0	1,32	0	0	0	0	17,32
Отключение ВВ ДФЗ	*2018*	0	0	0	0	0	0,56	0	0	0	0	0	0	0,56
	2019	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	7
	2020	0	0	0	0	0	0	0,33	0	0	6,9	0	0	7,23
	2021	0	0	0	0	0	2,4	0	0	0	0	0	0	2,4
	2022	36,9	0	0	2,3	0,06	0	0	0	5,08	0	0	0	44,33
	2023	0	0	0	0	0	0	0	0	3,79	0	0	0	3,79
	2018-2023	36,9	0	0	2,3	0,06	9,96	0,33	0	8,87	6,9	0	0	65,32
Отключение ВВ ДЗ	*2018*	0	0	2,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,7
	2018-2023	0	0	2,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,7
Отключение ВВ ТЗНП	*2018*	0	0	0	0	2,12	0	0	0	0	0	0	0	2,12
	2021	0	1,2	0	0	1,49	0	0	0	0	0	0	0	2,69
	2022	0	0	0	0	0,56	0	0	0	0,4	1,47	0	0	2,43

	2023	0	0	0	0	0	0,7	0	0	0	0	0	0	0,7
	2018-2023	0	1,2	0	0	4,17	0,7	0	0	0,4	1,47	0	0	7,94
Отключение ВВ ТО	*2021*	0	3,98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,98
	2022	0	0	0	0	0,97	3,5	0,69	0	0	0	0	0	5,16
	2018-2023	0	3,98	0	0	0,97	3,5	0,69	0	0	0	0	0	9,14
Падение деревьев, веток	*2018*	0	0	0	0	2,04	0	0	0	0	0	0	0	2,04
	2019	0	0	0	0	0	0	0	2,4	0	0	0	0	2,4
	2018-2023	0	0	0	0	2,04	0	0	2,4	0	0	0	0	4,44
Повреждение привода ВВ	*2022*	3,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,7
	2018-2023	3,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,7
Пожар	*2019*	0	0	0	3,06	0	0	0	0	0	0	0	0	3,06
	2018-2023	0	0	0	3,06	0	0	0	0	0	0	0	0	3,06
Пробой или повреждение изолятора	*2018*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,73	0,73
	2019	0	0	0	0	0	0	0	5,6	0	0	0	0	5,6
	2020	0	0	0	0	2,1	0	0,28	0,98	0	0	0	0	3,36
	2018-2023	0	0	0	0	2,1	0	0,28	6,58	0	0	0	0,73	9,69
Ошибка персонала	*2018*	0	0	0	0	0,18	0	0	0	0	0	0	0	0,18
	2018-2023	0	0	0	0	0,18	0	0	0	0	0	0	0	0,18
Всего	*2018*	0	0	2,7	0	4,34	0,56	0	1,32	0,98	0	3,3	5,63	18,83
	2019	4,15	0,76	0	3,06	0	7	0	8	0	0	0	0	22,97
	2020	0	0	0	0	2,1	1,83	0,61	0,98	0	6,9	0	0	12,42
	2021	0	5,18	0	3,5	4,79	2,4	0	0	0	0	0	0	15,87
	2022	40,6	0	0	4,98	1,58	3,5	0,69	0	5,48	1,47	0	0	58,3
	2023	0	0	0	0	0	0,7	0	0	3,79	0	0	0	4,49
	2018-2023	44,75	5,94	2,7	11,54	12,81	15,99	1,31	10,31	10,25	8,37	3,3	5,63	132,89

Максимальное значение суммарной отключенной мощности приходится на январь. Это нельзя назвать закономерностью, так как связано с ураганом в 2022 году, когда произошло большое количество отключений. Более закономерным представляется достаточно равномерное распределение суммарных значений показателя в течение года и минимумами в марте, июле и ноябре. Наибольшие значения приходятся на апрель – июнь.

Наиболее значимыми причинами по показателю являются отключение ВВ ДФЗ – 65,32 МВт; обрыв провода – 17,32 МВт; пробой и повреждение изолятора - 9,69 МВт; деятельность сторонних лиц – 9,18 МВт; отключение ВВ ТО – 9,14 МВт; отключение ВВ ТЗНП – 7,94 МВт. Значение суммарной отключенной мощности по остальным причинам составляет менее 11 % от общего значения.

Выводы. В целом по итогам исследования, на примере сетей 110 кВ можно отметить, что к аварийным отключениям ВЛ 110 кВ приводят 13 видов причин. Только 6 из них являются наиболее значимыми по количеству отключений, суммарному времени восстановления, суммарному времени восстановления электроснабжения и суммарной отключенной мощности. Это следующие причины: отключение ВВ ДФЗ, обрыв провода, пробой и повреждение изолятора, деятельность сторонних лиц, отключение ВВ ТО, отключение ВВ

ТЗНП. При этом наблюдается сезонное количественное изменение рассматриваемых параметров надёжности. В период с мая по сентябрь наблюдаются наибольшие значения всех показателей.

Изучение разных показателей с учётом сезонности позволяет определить наиболее значимые причины отключений для разных месяцев года. Так, например, обрывы проводов наблюдались по количеству отключений во все месяцы за исключением сентября, ноября и декабря. Обрывы проводов потребовали восстановления ВЛ с общим временем 16,98 ч, при этом время восстановления электроснабжения в сумме составило 4,33 ч. Следует отметить и недостатки в ведении журналов отключений. Так, при анализе количества случаев обрыва проводов, как показано выше, они не наблюдались только 3 месяца. При этом в показателе времени восстановления отсутствует его значения в марте, июле и с сентября по декабрь. В исходной анализируемой информации отсутствуют сведения по поводу того, почему обрывы провода не потребовали восстановления ВЛ. Поэтому следует в дальнейшем совершенствовать формы журналов отключений и контроль за их ведением.

Предложен косвенный показатель уровня автоматизации и резервирования в электрических сетях, который для сетей 110 кВ составил 17отн.ед., для сетей 35 кВ – 4,2 отн. ед., для сетей 10 кВ – 1,58 отн. ед., для сетей 0,4 кВ – 1,04 отн. ед., что отражает разную оснащённость данных сетей средствами автоматики и резервирования.

Список использованных источников

1. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Abdullayeva S.A. Method and algorithm for quantitative analysis of average monthly values of the operational reliability of overhead power lines. // Reliability: Theory & Applications. 2024. Vol. 19. No. 2(78). Pp. 647-654.
2. Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Aleksandrov V.S., Shepeleva A.E. Monitoring of overhead power lines in real time. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2022. T. 15. No S3.3. Pp. 128-133.
3. Vinogradov A.V., Bolshev V.E., VinogradovaA.V. et al. Analysis of the power supply restoration time after failures in power transmission lines. Energies. 2020. V. 13. No. 11. P. 2736.
4. Ахмадеев А.А. Анализ статистики причин аварийных отключений линий электропередач и пути их снижения // Энергетические системы. 2019. № 1. С. 334-340.
5. Бобряков А.А. Подходы к расчету индекса технического состояния воздушных линий электропередачи // Промышленная энергетика. 2024. № 1. С. 8-16.
6. Гайворонский А.В., Котов С.П., Боровицкий В.Г. Аварийные отключения ВЛ 110 кВ // Новости электротехники. 2019. №2(116). С.1-11.
7. Назмиева З.К. Анализ аварийных отключений воздушных линий электропередачи в связи с повреждением изоляторов. Тинчуринские чтения. 2020 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 28–29 апреля 2020 года. Том 1. Казань: Казанский государственный энергетический университет. 2020. С.78-81.
8. Шишигин С.Л. Расчет числа грозовых отключений воздушной линии 110 кВ // Электричество. 2023. № 9. С. 22-30.
9. Виноградов А.В., Ван А.Г., Виноградова А.В. Сезонное резервирование электроснабжения потребителей, подключенных к одной электрической сети // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2025. Т. 72, № 1(58). С. 49-58. DOI 10.22314/2658-4859-2025-72-1-49-58. EDN VXDDSX.

10. Виноградова А.В., Лансберг А.А., Виноградов А.В. Энергосистема Орловской области: обзор статистической информации. Орёл: ООО Полиграфическая фирма «Картуш», 2023. 360 с. EDN FPQAEF.

11. Виноградова А.В., Виноградов А.В., Букреев А.В. Удельные показатели надежности электрических сетей 0,4 кВ // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 6. С. 77-85. DOI 10.26897/2687-1149-2024-6-77-85. EDN AZEIQF.

Bibliography

1. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Abdullayeva S.A. Method and algorithm for quantitative analysis of average monthly values of the operational reliability of overhead power lines. // Reliability: Theory & Applications. 2024. Vol. 19. No. 2(78). Pp. 647-654.

2. Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Aleksandrov V.S., Shepeleva A.E. Monitoring of overhead power lines in real time. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2022. T. 15. No S3.3. Pp. 128-133.

3. Vinogradov A.V., Bolshev V.E., VinogradovaA.V. et al. Analysis of the power supply restoration time after failures in power transmission lines. Energies. 2020. V. 13. No. 11. P. 2736.

4. Akhmadeev A.A. Analysis of Statistics on Causes of Emergency Power Line Outages and Ways to Mitigate Them // Energy Systems. 2019. No. 1. pp. 334-340.

5. Bobryakov A.A. Approaches to Calculating the Technical Condition Index of Overhead Power Lines // Industrial Power Engineering. 2024. No. 1. pp. 8-16.

6. Gaivoronsky A.V., Kotov S.P., Borovitsky V.G. Emergency Outages of 110 kV Overhead Lines // Electrical Engineering News. 2019. No. 2 (116). pp. 1-11.

7. Nazmieva Z.K. Analysis of Emergency Outages of Overhead Power Lines Due to Insulator Damage. Tinchurin Readings. 2020 "Energy and Digital Transformation": Proceedings of the International Youth Scientific Conference. In 3 volumes, Kazan, April 28-29, 2020. Volume 1. Kazan: Kazan State Power Engineering University, 2020. Pp. 78-81.

8. Shishigin S.L. Calculation of the Number of Lightning Outages of a 110 kV Overhead Line // Electricity. 2023. No. 9. Pp. 22-30.

9. Vinogradov A.V., Van A.G., Vinogradova A.V. Seasonal Backup of Power Supply to Consumers Connected to the Same Electrical Grid // Electrical Technologies and Electrical Equipment in the Agro-Industrial Complex. 2025. Vol. 72, No. 1(58). Pp. 49-58. DOI 10.22314/2658-4859-2025-72-1-49-58. EDN VXDDSX.

10. Vinogradova AV, Lansberg AA, Vinogradov AV Power system of the Oryol region: a review of statistical information. Oryol: Kartush Printing Company, 2023. 360 p. EDN FPQAEF.

11. Vinogradova AV, Vinogradov AV, Bukreev AV Specific reliability indicators of 0.4 kV electric networks // Agroinzheneriya. 2024. Vol. 26, No. 6. pp. 77-85. DOI 10.26897/2687-1149-2024-6-77-85. EDN AZEIQF.

Алина Васильевна Виноградова, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5. Доцент кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69. Тел. +79208079424, e-mail: alinawin@rambler.ru

RELIABILITY INDICATORS OF 110 kV ELECTRIC NETWORKS, TAKING INTO ACCOUNT THE SEASONALITY OF OUTAGE CAUSES AND AN INDIRECT INDICATOR OF THE LEVEL OF AUTOMATION

A.V. Vinogradova[1,2]

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Oryol State Agrarian University
[2]Federal State Budgetary Scientific Institution, Federal Scientific Center for Electrical Engineering and Mechanics

Abstract. Quantitative indicators of power supply reliability are necessary for calculating operational indicators that help identify bottlenecks in power supply systems, as well as for developing and justifying measures to improve power grids. A number of reliability indicators for 110 kV electric grids (number of outages, restoration time, total power restoration time, total interrupted capacity) are examined, broken down by outage cause. The seasonality of power grid failures by month of the year is analyzed. An indicator indirectly characterizing the level of automation and redundancy in electrical networks is proposed. It is the ratio of the total network equipment restoration time during failures to the consumer restoration time during outages caused by the same failures. For 110 kV networks, this indicator was 17 relative units, for 35 kV networks – 4.2 relative units, for 10 kV networks – 1.58 relative units, and for 0.4 kV networks – 1.04 relative units, reflecting the different levels of automation and redundancy in these networks.

Keywords: emergency outages, reliability, power supply, overhead lines, electrical networks, power supply reliability indicators, restoration time, interrupted capacity.

Alina Vasilievna Vinogradova, PhD in Engineering, Leading Researcher, Laboratory of Power Supply, Electrical Equipment, and Renewable Energy, Federal Scientific Center for VIM, 109428, Moscow, 1st Institutsky Proezd, Bldg. 5. Associate Professor, Department of Power Supply, Oryol State Agrarian University, 302019, Oryol, General Rodin Street, Bldg. 69. Tel.: +79208079424, e-mail: alinawin@rambler.ru

УДК 621.314.222.6

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ СТРАТЕГИЙ ПО ЗАМЕНЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6-10/ 0,4 КВ В ЭЛЕКТРОСЕТЕВЫХ КОМПАНИЯХ

Е.В. Винокуров[1], Н.С. Сорокин[1], А.В. Виноградов[1,2,3], Р.А.Тендетник[1]

[1]ФГБОУ ВО Орловский ГАУ
[2]ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
[3]РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева

Аннотация. *В статье проведён комплексный анализ научных трудов, нормативных документов и практических исследований, посвящённых эксплуатации, оптимизации работы и критериям замены силовых трансформаторов напряжением 6–10/0,4 кВ в электросетевом комплексе Российской Федерации. В ходе анализа выявлены ключевые факторы, оказывающие влияние на эффективность работы трансформаторов: технологические нарушения при эксплуатации, режимы перегрузок и недогрузок, а также физический и моральный износ оборудования. На примере Орловского района электрических сетей филиала ПАО «Россети Центр» — «Орелэнерго» проведена оценка эксплуатационного состояния трансформаторного парка, показавшая, что 74% обследованных трансформаторов работают с коэффициентом загрузки не выше 20%, что приводит к росту потерь электроэнергии и снижению надёжности электроснабжения. Дополнительно рассмотрено влияние схем соединения обмоток на эксплуатационные параметры трансформаторов 6–10/0,4 кВ, а также проанализирована разработанная стратегия технического перевооружения, предусматривающая ежегодную замену оборудования. Установлено, что наибольший технико-экономический эффект достигается при замене трансформаторов номинальной мощности 63, 400 и 630 кВА. Также особое внимание уделено вопросам внедрения энергоэффективных трансформаторов новых классов и цифровых систем мониторинга, обеспечивающих повышение эффективности и управляемости сетевого оборудования. Проведённый анализ показал, что существующие исследования и предложенные решения охватывают отдельные аспекты повышения энергоэффективности — оптимизацию загрузки, совершенствование схем соединения обмоток, применение энергоэффективных классов трансформаторов, цифровизацию процессов контроля и учёта. Однако отсутствует единая стратегия, в связи с этим обоснована необходимость разработки комплексной стратегии модернизации и замены силовых трансформаторов напряжением 6–10/0,4 кВ, которая станет основой для долгосрочного развития электросетевого комплекса, обеспечивая баланс между надёжностью, экономичностью и энергоэффективностью*

Ключевые слова: *силовые трансформаторы, электросетевой комплекс, энергоэффективность, потери электроэнергии, надёжность.*

Введение. В современных условиях развития электроэнергетической отрасли Российской Федерации стратегическое управление осуществляется на основе распоряжения [9]. Документ определяет государственные приоритеты в сфере электроэнергетики,

направленные на повышение энергоэффективности, надёжности и устойчивости энергетической инфраструктуры.

Наряду с государственной, действует и корпоративная стратегия ПАО «Россети», предусматривающая цифровизацию, модернизацию оборудования и оптимизацию сетевых процессов. Особое внимание уделяется внедрению энергоэффективных технологий, интеллектуальных систем учёта и снижению потерь электроэнергии. Филиалы ПАО «Россети Центр» и ПАО «Россети Центр и Приволжье» проводят техническое перевооружение распределительных сетей 6–10/0,4 кВ, внедряют современные трансформаторы и системы мониторинга, что способствует повышению эффективности электроснабжения.

В рамках реализации государственной политики Российской Федерации в области энергосбережения, основанной на положении [10], отечественные исследователи ведут активную работу по созданию научно обоснованных подходов к развитию и модернизации электросетевого комплекса. Их труды раскрывают различные аспекты эксплуатации, оптимизации работы и критериев замены силовых трансформаторов напряжением 6-10/0,4 кВ, так как силовые трансформаторы остаются ключевым элементом энергосистемы, от состояния и энергоэффективности которых напрямую зависят надёжность работы и потери в электрических сетях.

Так, исследования А.В. Виноградова, А.В. Виноградовой, А.В. Букреева и А.А. Лансберга позволили выявить ключевые причины неэффективной работы трансформаторов 6–10/0,4 кВ - недогрузку, нерациональный выбор мощности и отсутствие достоверных данных о реальных нагрузках. Работы Ю.Д. Волчкова, Н.С. Сорокина, А.А. Лансберга и других авторов показали влияние схем соединения обмоток на эксплуатационные характеристики и потери электроэнергии, а также в ней были предложены рекомендации по их рациональному применению. В исследовании А.А. Лансберга, Н.С. Сорокина и И.Н. Фомина разработана стратегия технического перевооружения трансформаторного парка филиала ПАО «Россети Центр» - «Орелэнерго». При выполнении выпускной квалификационной работы Е.В. Винокуровым проведено исследование по вопросу экономической целесообразности внедрения силовых трансформаторов различных классов энергоэффективности (Х2К2, Х3К2, Х4К3) в сравнении с самым низким классом - Х1К1. В работе А.А. Балабина «Разработка методики расчета потерь электроэнергии в магнитопроводах длительно эксплуатирующихся силовых трансформаторов» была предложена оригинальная методика расчёта потерь с учётом срока эксплуатации и капитального ремонта оборудования, что позволило повысить точность расчётов и выявить влияние срока службы трансформаторов на увеличение потерь электроэнергии.

Несмотря на наличие государственных и корпоративных программ, а также научных исследований в настоящее время отсутствует единая стратегия, направленная на системную модернизацию и поэтапную замену трансформаторов 6–10/0,4 кВ. В связи с этим необходимо разработать целевую стратегию по обновлению трансформаторного оборудования, которая станет частью общей стратегии развития электросетевого комплекса России, обеспечив повышение энергоэффективности, снижение потерь и устойчивое развитие энергетической инфраструктуры страны.

Материалы и методы исследования. В работе использовались аналитические методы, включающие систематизацию научно-технической литературы и нормативно-технической документации, касающейся статистических методов обработки эксплуатационных показателей и анализа коэффициентов загрузки трансформаторов, методов расчёта технико-экономических показателей и определения сроков окупаемости трансформаторов, влияния

схем соединения обмоток на эксплуатационные параметры трансформаторов, разработки комплексной стратегии технического перевооружения, моделирования процессов модернизации трансформаторного парка с учётом формирования аварийного запаса.

Результаты и обсуждение. В рамках реализации государственной политики Российской Федерации в сфере энергоэффективности, регламентируемой Федеральным законом [10], в современных условиях развития электроэнергетической отрасли приоритетное внимание уделяется повышению эффективности работы трансформаторного оборудования [11]. Силовые трансформаторы, являющиеся ключевым элементом электрических сетей и обеспечивающие преобразование электрической энергии между различными классами напряжения, характеризуются существенными технологическими потерями, которые возрастают вследствие естественной деградации оборудования, что обусловливает необходимость их поэтапной замены, причём в структуре существующего трансформаторного парка преобладают трансформаторы класса 6–10/0,4 кВ, для которых на данный момент отсутствует комплексная стратегия рациональной замены, хотя отдельные элементы такой стратегии представлены в ряде исследований.

В исследовании [1] представлен комплексный анализ эксплуатационных показателей силовых трансформаторов в электрических сетях в филиале ПАО «Россети Центр» - «Орелэнерго», а именно в Орловском РЭС за период 2016-2022 гг.

В ходе исследования [1] были выявлены основные причины неэффективной работы трансформаторов 6-10/0,4 кВ:

1. необоснованный выбор номинальной мощности трансформаторов;
2. отсутствие данных о фактических нагрузках сетей 0,4 кВ;
3. юридические факторы (единая плата за присоединение до 15 кВт).

За период 2016–2022 годов в Орловском РЭС филиала ПАО «Россети Центр» - «Орелэнерго» было выполнено 1194 оперативных замера нагрузок и напряжений на стороне низкого напряжения 0,4 кВ силовых трансформаторов. Установлено, что 74% от общего количества обследованных трансформаторов (880 единиц) работают с коэффициентом загрузки не более 20% [1].

Среди наиболее распространённых в Орловском РЭС трансформаторов 6-10/0,4 кВ с номинальными мощностями 63 кВА, 100 кВА, 160 кВА и 250 кВА выявлено, что 72–77% электроустановок имеют коэффициент загрузки не более 20%, 16–20% работают при коэффициенте 20–40%, а 3–5% — при коэффициенте 40–60% [1].

Кроме того, обнаружено, что в силовых трансформаторах 6-10/0,4 кВ Орловского РЭС годовые потери холостого хода превышают потери от составляющей короткого замыкания в 1,8–2,9 раза. Доля потерь электроэнергии от составляющей холостого хода для различных номинальных мощностей трансформаторов составляет 65–74% от общих годовых потерь электроэнергии [1].

В дополнение к проведённому исследованию, в работе [1] предложены практические решения по устранению недогрузки силовых трансформаторов.

Технические меры:

- внедрение систем мониторинга электрических параметров;
- использование интеллектуальных систем учёта электроэнергии;
- отключение малозагруженных трансформаторов [1].

Оптимизационные методы:

- параллельное включение трансформаторов разной мощности;

- точная оценка степени загрузки с помощью современных систем учёта;
- оптимизация количества трансформаторов в энергосистеме;
- замена недогруженных трансформаторов на оборудование меньшей мощности [1].

В статье [2] рассматриваются актуальные схемы соединения обмоток силовых трансформаторов, которые в настоящее время применяются в филиале ПАО «Россети Центр» - «Орелэнерго». В исследовании проанализированы особенности каждой схемы и составлены практические рекомендации по их эффективному использованию в различных эксплуатационных условиях.

Было установлено, что характеристики [2] схем соединения силовых трансформаторов с высшим напряжением 6–10 кВ оказывают существенное влияние на следующие эксплуатационные параметры: значения токов симметричного и несимметричных коротких замыканий в сети 0,4 кВ; потери электроэнергии и мощности; значения токов на стороне 10 кВ при установившихся коротких замыканиях в сети 0,4 кВ [2].

Следовательно, полученные результаты [2] позволяют сделать важные выводы о необходимости тщательного выбора схем соединения трансформаторов для оптимизации работы сельских электрических сетей и повышения их надежности.

Были выявлены преимущества и недостатки различных схем соединения обмоток силовых трансформаторов [2]:

1. Схема Y/Yн-0 (звезда /звезда с нулём):

Преимущества: минимальные потери электроэнергии; снижение издержек электросетевых организаций; низкие токи однофазного КЗ в сети 0,4 кВ; малые токи на стороне 10 кВ при несимметричных замыканиях [2].

Недостатки: возможное несрабатывание защиты ЗКА 0,4 кВ при ОКЗ; необходимость дополнительной настройки или замены ЗКА; потребность в секционировании сети [2].

2. Схема D/Yн-11 (треугольник /звезда с нулём):

Преимущества: высокая эффективность защиты трансформатора со стороны 10 кВ; высокая устойчивость изоляции на стороне высокого напряжения; широкая область применения для собственных нужд электростанций и подстанций [2].

Недостатки: повышенные потери электроэнергии; большие токи ОКЗ в сети 0,4 кВ; значительные токи в фазах на стороне 10 кВ при несимметричных замыканиях [2].

3. Схема Y/Zн-11(звезда /зигзаг с нулём):

Преимущества: эффективная защита трансформатора предохранителями на стороне 10 кВ; снижение несимметрии фазных напряжений в сельских сетях; обеспечение качества электроэнергии для потребителей [2].

Недостатки: максимальные потери среди рассмотренных схем; наибольшие токи однофазного КЗ в сети 0,4 кВ [2].

По итогам исследования [2] были составлены рекомендации по применению трансформаторов с разными схемами при сооружении, реконструкции и техперевооружении сельских электрических сетей 0,4 кВ:

- Y/Yн-0 рекомендуется использовать при небольших длинах ЛЭП 0,4 кВ и симметричной нагрузке [2];
- D/Yн-11 оптимален для длинных ЛЭП 0,4 кВ и собственных нужд ПС, ЭС [2];
- Y/Zн-11 эффективен при длинных ЛЭП 0,4 кВ и несимметричной нагрузке [2].

В работе [3], представлен прогресс современной науки и техники, который позволяет существенно снизить потери в трансформаторах за счет применения новых материалов в

магнитопроводе: электротехнических сталей, нанокристаллических сплавов и высокотемпературных сверхпроводников.

По результатам анализа трансформаторного парка филиала ПАО «Россети Центр» — «Орелэнерго» за 2022 год выявлено, что из общего количества оборудования, составляющего 6206 единиц, лишь 268 трансформаторов соответствуют современным требованиям энергоэффективности, при этом у значительной части эксплуатируемого оборудования, а именно у трансформаторов возрастом от 25 до 50 лет, зафиксированы существенные отклонения от нормативных показателей - потери холостого хода превышают установленные нормы в два раза [3].

В качестве решения проблемы разработаны несколько стратегий технического перевооружения, включая комплексную программу замены оборудования. Наиболее эффективным признано ежегодное обновление 33 трансформаторов мощностью 630 кВА, обеспечивающее экономический эффект 18,62 млн рублей за 10 лет. Оптимальным практическим решением стала комплексная стратегия с заменой 79 трансформаторов разных мощностей, дающая эффект 15,17 млн рублей за тот же период [3].

Практическая ценность исследования определяется возможностью реализации предложенных мероприятий, которые обеспечат снижение суммарных потерь электроэнергии на 2,3% [3] и формирование оптимального аварийного запаса оборудования. Наибольший экономический эффект достигается при модернизации трансформаторов номинальной мощностью 63, 400 и 630 кВА, что обосновывает эффективность выбранного направления технического перевооружения.

Тем не менее, процесс практического внедрения инновационных разработок характеризуется низкими темпами реализации. Так, по состоянию на 2022 год в филиале ПАО «Россети Центр» - «Орелэнерго» эксплуатируется лишь 18 аморфных трансформаторов, что свидетельствует о существенном разрыве между имеющимся потенциалом модернизации и реальными темпами её осуществления [3].

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы [8] осуществлено комплексное исследование [4,5,6], направленное на сравнительный анализ экономической эффективности внедрения энергоэффективных трансформаторов. Предметом исследования выступили трансформаторы классов Х2К2, Х3К2, Х4К3, которые были сопоставлены с базовым классом энергоэффективности Х1К1.

Была проведена сравнительная оценка эксплуатационных характеристик трансформаторов различных классов энергоэффективности. Основой исследования послужил стандарт организации ПАО «Россети Центр» СТО 34.01-3.2-011-2021, регламентирующий технические требования к силовым трансформаторам и разделяющий их на классы энергоэффективности.

Были рассмотрены трансформаторы производства ведущих российских и зарубежных предприятий, которые активно ведут сотрудничество с филиалом ПАО «Россети Центр» - «Орелэнерго». Среди этих производителей – завод «СВЭЛ» [12], «Электрощит Самара» [13], Минский электротехнический завод им. В. И. Козлова [14].

Данные производители представляют на рынке силовые трансформаторы всех исследуемых классов энергоэффективности Х1К1, Х2К2, Х3К2, Х4К3.

Произведен расчет сроков окупаемости дополнительных капиталовложений на установку энергоэффективных трансформаторов, а также расчет капитальных затрат, включающих стоимость оборудования, монтажные работы и транспортные расходы. Определены годовые потери электроэнергии в трансформаторах с учетом действующего

тарифа филиала ПАО «Россети Центр» - «Орелэнерго» на 2024 год, составляющего 3,445 рубля за киловатт-час электроэнергии, предназначенной для компенсации потерь.

Расчёты показали, что для трансформаторов мощностью 25 кВА срок окупаемости составляет от 20 до 58 лет; в данном классе наиболее целесообразно использовать трансформаторы Х1К1 при любой загрузке и Х2К2 при загрузке от 98%. Для трансформаторов мощностью 40 кВА срок окупаемости варьируется от 19 до 38 лет, при этом трансформаторы Х2К2 целесообразно применять при любой загрузке, а Х3К2 при загрузке от 40%. Для трансформаторов мощностью 100 кВА срок окупаемости составляет от 8 до 52 лет, и этом классе рекомендуется использовать трансформаторы Х2К2 и Х3К2 при любой загрузке. Для трансформаторов мощностью 160 кВА срок окупаемости изменяется в пределах от 5 до 98 лет; здесь оптимально применять трансформаторы Х2К2 при любой загрузке, а Х3К2 — при загрузке от 40%. Для трансформаторов мощностью 250 кВА срок окупаемости находится в диапазоне от 7 до 102 лет, при этом предпочтительнее использовать трансформаторы Х2К2 при загрузке от 10% и Х3К2 - при загрузке от 35%.

В работе [7] представлено комплексное исследование, направленное на повышение точности расчёта потерь электроэнергии в силовых трансформаторах (СТ), длительно находящихся в эксплуатации и прошедших капитальный ремонт с разборкой магнитопровода.

В исследовании [7] выполнен анализ состояния трансформаторного парка филиала ПАО «Россети Центр» - «Орелэнерго» (на 2008 год), согласно которому около 50 % оборудования эксплуатируется более 25 лет, а значительная часть трансформаторов прошла капитальный ремонт вне заводских условий, что вызывает увеличение потерь холостого хода до двукратного превышения паспортных значений. Установлено, что существующие методики расчёта потерь не учитывают длительность эксплуатации и факт разборки магнитопровода, что приводит к существенным погрешностям в оценке энергетической эффективности трансформаторов.

Для решения выявленных проблем разработаны регрессионные математические модели [7], учитывающие изменение потерь мощности в магнитопроводах в зависимости от срока эксплуатации и наличия капитального ремонта. Модели базируются на статистических данных замеров потерь в трансформаторах напряжением 6-10, 35 и 110 кВ, эксплуатируемых в энергосистемах Орловской, Курской и Белгородской областей.

Результаты показали, что увеличение срока службы трансформаторов и проведение капитального ремонта с разборкой магнитопровода вызывают рост потерь мощности в среднем на 30–50 % по сравнению с паспортными данными. В работе [7] предложена новая методика расчёта потерь электроэнергии в магнитопроводах, позволяющая скорректировать потери холостого хода с учётом этих факторов.

Для автоматизации расчётов созданы программные комплексы РПСТ 35-110 и РПСТ 6-10, реализующие разработанную методику. Программы внедрены в филиал ПАО «Россети Центр» - «Орелэнерго», что позволило повысить точность расчёта потерь на 30 % при учёте срока эксплуатации и на 6,5 % при учёте капитального ремонта.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения методики при:

- планировании замены недогруженных и устаревших трансформаторов;
- обосновании целесообразности проведения капитальных ремонтов;
- уточнении структуры технических и коммерческих потерь в электрических сетях.

Применение разработанных моделей и программных средств обеспечивает повышение энергетической эффективности трансформаторных парков, уменьшение эксплуатационных затрат и улучшение качества расчётов потерь электроэнергии в распределительных сетях.

Анализ показал, что исследования в области разработки стратегии по замене силовых трансформаторов напряжением 6-10/0,4 кВ ограничиваются неполным или односторонним рассмотрением технических, экономических и эксплуатационных аспектов, что затрудняет принятие обоснованных управленческих решений в области модернизации трансформаторного парка.

Так, например, в исследовании [1] отсутствует комплексный подход к оценке эффективности работы трансформаторов, основанный только на замерах при плановых и аварийных отключениях, что не даёт достоверной картины реальной загрузки оборудования. Экономические аспекты проработаны недостаточно: нет оценок ущерба от потерь электроэнергии, расчётов окупаемости решений и анализа затрат на их реализацию с учётом сезонности, географии и плотности населения.

В работе [2] технические аспекты требуют углублённого изучения: не исследованы вопросы электромагнитной совместимости, влияния качества электроэнергии и климатических факторов на работу трансформаторов. Ограниченность исследования одной моделью оборудования (ТМГ-11) не позволяет объективно оценить эффективность различных технических решений. Отсутствует комплексный анализ факторов внедрения энергоэффективного оборудования, включая региональные особенности эксплуатации и специфику нагрузок.

В научном труде [3] можно выделить следующие существенные недостатки. Отсутствует детальный анализ причин медленных темпов внедрения инновационных разработок при значительном разрыве между потенциалом модернизации и реальными показателями (всего 18 аморфных трансформаторов из 6206 единиц оборудования). Не проведена оценка рисков реализации предложенных стратегий технического перевооружения (финансовых, технических и организационных). Исследование не учитывает возможные изменения в стоимости оборудования и материалов в долгосрочной перспективе (10 лет), что может существенно повлиять на заявленный экономический эффект. Отсутствует сравнительный анализ с альтернативными стратегиями модернизации. Не представлены конкретные механизмы контроля за реализацией программы модернизации и методы оценки её эффективности в процессе внедрения. Исследование ограничивается только экономическим эффектом, не учитывая экологические и социальные аспекты модернизации трансформаторного парка. Не проведена оценка влияния модернизации на надёжность электроснабжения и качество электрической энергии. Отсутствует анализ чувствительности предложенных решений к возможным изменениям в энергосистеме и потребительском спросе. Не рассмотрены вопросы подготовки персонала к работе с новым оборудованием и его обслуживанию. А также исследование не учитывает возможные технологические изменения в отрасли за период реализации программы модернизации.

В представленном исследовании [8], можно выделить следующие существенные недостатки. Отсутствует анализ чувствительности расчётов к возможным изменениям тарифов на электроэнергию в долгосрочной перспективе, что критично при таких длительных сроках окупаемости (до 102 лет). Не учтена возможная инфляция при расчёте экономической эффективности внедрения энергоэффективных трансформаторов. Не проведена оценка рисков, связанных с длительным периодом окупаемости оборудования. В исследовании не рассмотрены альтернативные способы снижения потерь электроэнергии помимо замены

трансформаторов. Отсутствует анализ влияния предложенных решений на надёжность электроснабжения потребителей. Не учтён фактор морального и физического износа оборудования за период окупаемости. При расчётах не учтены возможные изменения в структуре потребления электроэнергии и загрузке трансформаторов в будущем. Не проведена оценка экологических преимуществ внедрения энергоэффективных трансформаторов. Отсутствует сравнительный анализ с зарубежным опытом внедрения подобных решений. Не рассмотрены вопросы подготовки персонала к работе с новым оборудованием и его обслуживанию. В исследовании не учтена возможность появления новых, более эффективных технологий за период окупаемости.

В исследовании [7] выявляется ряд проблемных аспектов, снижающих актуальность и универсальность полученных результатов. Прежде всего, используемые экспериментальные данные относятся к 2005–2008 годам, что делает выводы частично устаревшими, поскольку с тех пор в трансформаторостроении появились новые материалы магнитопроводов, технологии ремонта и методы диагностики. Кроме того, работа основана преимущественно на статистике филиала ПАО «Россети Центр» — «Орелэнерго», что ограничивает применимость разработанной методики для других регионов с отличающимися климатическими и эксплуатационными условиями. Методика учитывает главным образом технические факторы — срок службы и наличие капитального ремонта с разборкой магнитопровода, но не затрагивает экономические и организационные аспекты эксплуатации, такие как оценка ущерба от потерь, анализ окупаемости модернизации и сезонные особенности энергопотребления. Разработанные программы расчёта потерь (РПСТ 35–110 и РПСТ 6–10) имеют ограниченный функционал и не интегрированы с современными системами автоматизированного учёта и мониторинга (АСКУЭ, SCADA), что снижает возможности их практического применения. Также исследование не включает трансформаторы высших классов напряжения и не рассматривает влияние режимов нагрузки, несимметрии напряжений и сезонных факторов на изменение потерь, что сужает масштаб и достоверность расчётных результатов.

Полученные результаты подтверждают необходимость дальнейшего обновления трансформаторного парка с учётом современных стандартов энергоэффективности и стратегических целей ПАО «Россети» по модернизации распределительных сетей.

Выводы. Формирование комплексной стратегии развития энергоэффективного оборудования, базирующейся на всестороннем анализе эффективности внедряемых решений, тщательном экономическом обосновании целесообразности инвестиций, учёте региональных особенностей эксплуатации, грамотном управлении рисками реализации проектов, а также соблюдении экологических и социальных стандартов, выступает фундаментальным условием для успешного создания единой стратегии по замене силовых трансформаторов. Подобный подход не только обеспечит устойчивый переход к современным энергосберегающим технологиям, но и создаст прочную основу для долгосрочного развития региональной энергетической инфраструктуры, гарантируя оптимальное сочетание надёжности энергоснабжения, экономической эффективности и рационального энергопотребления.

Список использованных источников

1. Виноградов А.В., Виноградова А.В., Букреев А.В., Лансберг А.А. Анализ загрузки и распределения потерь электроэнергии в силовых трансформаторах напряжением 6-

10 кВ //Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 67-75. DOI 10.26897/2687-1149-2023-6-67-75. EDN CZWQAV.

2. Виноградов А. В., Волчков Ю.Д., Лансберг А.А., Сорокин Н.С. О влиянии схем соединения обмоток силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ на эксплуатационные параметры сельских электрических сетей // Агротехника и энергообеспечение. 2022. № 1(34). С. 16-34. EDN DTIZVJ.

3. Виноградов А.В., Виноградова А.В., Лансберг А.А., Сорокин Н.С. Анализ структуры парка силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ филиалов электросетевых компаний ПАО «Россети Центр» и ПАО «Россети Центр и Приволжье» // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2023.Т.19, № 2(72). С. 16-28. DOI 10.53015/18159958_2023_19_2_16. EDN HVFJCJ.

4. Винокуров Е. В., Сорокин Н. С., Псарев А. И., Беспалов Д. В. История развития трансформатора // Интеллектуальные системы в аграрном и строительном комплексе : Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Орел, 03–04 декабря 2024 года. Орел : Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, 2024. С. 450-459. EDN: SFOWCY.

5. Винокуров Е.В., Тендетник Р.А., Сорокин Н.С., Псарев А. И. Эволюция государственных стандартов в трансформаторостроении: от 1965 года до 1985 года // Профессия инженер : Сборник статей XIII Всероссийской молодежной научно-практической конференции, посвященной 80-летию Победы в Великой Отечественной войне, Орел, 17 апреля 2025 года. Орел : Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2025. С. 243–246. EDN: MBHAKY.

6. Винокуров Е.В., Тендетник Р.А., Сорокин Н.С., Псарев А.И. Эволюция стандартов в трансформаторостроении: от ГОСТ 401–41 до ГОСТ 12965–67 // Цифровая трансформация в энергетике : Сборник трудов конференции, Тамбов, 19 декабря 2024 года. Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2025. С. 102–104. EDN: DXMHUW. – eLIBRARY ID: 80579462. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80579462.

7. Волчков Ю.Д. Балабин А.А. Повышение достоверности оценки величины расхода электроэнергии на ее трансформацию в силовых трансформаторах // Энергообеспечение и безопасность : Сборник материалов Международной выставки-Интернет-конференции, Орел, 23–25 ноября 2005 года. Орел: Орловский государственный аграрный университет, 2005. С. 117-122. EDN WZSGWB.

8. Винокуров Е.В. Комплексное исследование экономической эффективности внедрения энергоэффективных трансформаторов при реконструкции восточной части с. Сосково Орловской области [рукопись] // Выпускная квалификационная работа. Орёл: ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина», 2024. 58 с.

9. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 3 апреля 2013 г. № 511-р «Об утверждении Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации» // Собрание законодательства Российской Федерации. 2013. № 15. Ст. 1881.

10. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // Собрание законодательства Российской Федерации. 2009. № 48. Ст. 5711.

11. Быстрицкий Г.Ф. Кудрин Б.И. Электроснабжение. Силовые трансформаторы: учебное пособие для среднего профессионального образования. 2-е изд., испр. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 2024. - 201 с. - (Профессиональное образование). 978-5-534- 10311-3. - Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: https://urait.ru/bcode/542061 (дата обращения: 10.10.2025). ISBN: 978-5-534-10311-3

12. СвердловЭлектро [Электронный ресурс]. URL: https://svel.ru/contacts/ (дата обращения: 11.10.2025).

13. Электрощит Самара [Электронный ресурс]. URL: https://elecshield.ru/ (дата обращения: 13.10.2025).

14. Минский электротехнический завод им. В. И. Козлова [Электронный ресурс]. – URL: http://metz.by (дата обращения: 19.10.2025).

Bibliography

1. Vinogradov A.V., Vinogradova A.V., Bukreev A.V., Lansberg A.A. Analysis of the load and distribution of electric power losses in power transformers with a voltage of 6-10 kV // Agroengineering. 2023. Vol. 25, No. 6. pp. 67-75. DOI 10.26897/2687-1149-2023-6-67-75. EDN CZWQAV.

2. Vinogradov A.V., Volchkov Yu.D., Lansberg A.A., Sorokin N.S. On the influence of connection schemes of windings of power transformers with a high voltage of 6-10 kV on the operating parameters of rural electrical networks // Agroengineering and energy supply. 2022. No. 1 (34). P. 16-34. EDN DTIZVJ.

3. Vinogradov AV, Vinogradova AV, Lansberg AA, Sorokin NS Analysis of the structure of the fleet of high-voltage power transformers 6-10 kV of the branches of the electric grid companies PJSC Rosseti Centre and PJSC Rosseti Centre and Volga Region // News of higher educational institutions of the Black Earth Region. 2023. Vol. 19, No. 2 (72). P. 16-28. DOI 10.53015/18159958_2023_19_2_16. EDN HVFJCJ.

4. Vinokurov E. V., Sorokin N. S., Psarev A. I., Bespalov D. V. History of the development of the transformer // Intelligent systems in the agricultural and construction complex: Collection of materials of the International scientific and practical conference, Oryol, December 3–4, 2024. Oryol: Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin, 2024. Pp. 450–459. EDN: SFOWCY.

5. Vinokurov E.V., Tendetnik R.A., Sorokin N.S., Psarev A.I. Evolution of state standards in transformer engineering: from 1965 to 1985 // Profession engineer: Collection of articles of the XIII All-Russian youth scientific and practical conference dedicated to the 80th anniversary of Victory in the Great Patriotic War, Orel, April 17, 2025. Orel: Closed Joint-Stock Company "University Book", 2025. Pp. 243–246. EDN: MBHAKY.

6. Vinokurov E.V., Tendetnik R.A., Sorokin N.S., Psarev A.I. Evolution of standards in transformer engineering: from GOST 401-41 to GOST 12965-67 // Digital transformation in energy: Collection of conference papers, Tambov, December 19, 2024. Tambov: Tambov State Technical University, 2025. pp. 102-104. EDN: DXMHUW. – eLIBRARY ID: 80579462. Access mode: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80579462.

7. Volchkov Yu.D. Balabin A.A. Improving the reliability of assessing the amount of electricity consumption for its transformation in power transformers // Energy supply and safety: Collection of materials of the International exhibition-Internet conference, Orel, November 23-25, 2005. Orel: Oryol State Agrarian University, 2005. pp. 117-122. EDN WZSGWB.

8. Vinokurov E.V. Comprehensive Study of the Economic Efficiency of Implementing Energy-Efficient Transformers in the Reconstruction of the Eastern Part of the Village of Soskovo, Oryol Region [manuscript] // Graduation Thesis. Oryol: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin", 2024. 58 p.

9. Order of the Government of the Russian Federation of April 3, 2013 No. 511-r "On Approval of the Strategy for the Development of the Electric Grid Complex of the Russian Federation" // Collected Legislation of the Russian Federation. 2013. No. 15. Article 1881.

10. Federal Law of November 23, 2009 No. 261-FZ "On Energy Saving and Improving Energy Efficiency, and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation" // Collected Legislation of the Russian Federation. 2009. No. 48. Art. 5711.

11. Bystritsky G.F. Kudrin B.I. Electricity Supply. Power Transformers: A Textbook for Secondary Vocational Education. 2nd ed., corr. and add. Moscow: Yurait Publishing House, 2024. - 201 p. - (Vocational Education). 978-5-534-10311-3. - Text: electronic // Yurait Educational Platform [website]. - URL: https://urait.ru/bcode/542061 (accessed: 10.10.2025). ISBN: 978-5-534-10311-3

12. SverdlovElektro [Electronic resource]. URL: https://svel.ru/contacts/ (accessed: 11.10.2025).

13. Samara Electrical Panel [Electronic resource]. URL: https://elecshield.ru/ (accessed: 13.10.2025).

14. V.I. Kozlov Minsk Electrotechnical Plant [Electronic resource]. URL: http://metz.by (accessed: 19.10.2025).

Евгений Владимирович Винокуров, студент 1 курса магистратуры факультета «Агротехники и энергообеспечения» направления подготовки 13.04.02. «Электроэнергетика и электротехника», ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69Vinokurov.228@bk.ru;

Николай Сергеевич Сорокин, старший преподаватель ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69, тел. 89051680833, e-mail: sorokinnc@rambler.ru;

Александр Владимирович Виноградов, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 109428 г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5; профессор кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69; профессор кафедры «Электроснабжение и теплоэнергетика», РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 127434, г.Москва, улица Тимирязевская, д.49. Тел. 8(920)2879024 e-mail: winaleksandr@gmail.com;

Роман Андреевич Тендетник, студент, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 302019, г.Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69 e-mail: tendetnick.rom@yandex.ru

RATIONALE FOR THE NEED TO DEVELOP STRATEGIES FOR REPLACING 6-10/0.4 kV POWER TRANSFORMERS IN ELECTRIC GRID COMPANIES

E.V. Vinokurov[1], N.S. Sorokin[1], A.V. Vinogradov[1,2,3], R.A. Tendetnik[1]

[1] Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Oryol State Agrarian University

[2] Federal State Budgetary Scientific Institution, Federal Scientific Center for VIM

[3]RGAU-MSHA named after. K.A. Timiryazeva

Abstract. This article provides a comprehensive analysis of scientific papers, regulatory documents, and practical research on the operation, optimization, and replacement criteria of 6-10/0.4 kV power transformers in the Russian Federation's electric grid. The analysis identified key factors affecting transformer performance: operational irregularities, overload and underload conditions, as well as equipment wear and tear. Using the Oryol district of the Oryolenergo branch of PJSC Rosseti Centre as an example, an assessment of the operational condition of the transformer fleet was conducted. It revealed that 74% of the surveyed transformers operate with a load factor of no more than 20%, leading to increased energy losses and reduced power supply reliability. The impact of winding connection schemes on the operating parameters of 6-10/0.4 kV transformers was also examined, and the developed technical refurbishment strategy, which provides for annual equipment replacement, was analyzed. It was found that the greatest technical and economic benefits are achieved by replacing transformers with rated capacities of 63, 400, and 630 kVA. Particular attention was also paid to the implementation of new energy-efficient transformers and digital monitoring systems, which improve the efficiency and manageability of network equipment. The analysis revealed that existing research and proposed solutions cover specific aspects of energy efficiency improvement, including load optimization, improved winding connection schemes, the use of energy-efficient transformer classes, and the digitalization of control and metering processes. However, a unified strategy is lacking, necessitating the development of a comprehensive strategy for the modernization and replacement of 6–10/0.4 kV power transformers. This strategy will serve as the foundation for the long-term development of the electric grid complex, ensuring a balance between reliability, cost-effectiveness, and energy efficiency.

Keywords: power transformers, electric grid complex, energy efficiency, power losses, reliability.

Evgeny Vladimirovich Vinokurov, first-year master's student, Faculty of Agricultural Engineering and Energy Supply, major 13.04.02. "Electric Power Engineering and Electrical Engineering," Oryol State Agrarian University, 69 General Rodina St., Oryol, 302019; Vinokurov.228@bk.ru

Nikolay Sergeevich Sorokin, Senior Lecturer, Oryol State Agrarian University, 69 General Rodina St., Oryol, 302019; Tel. 89051680833, e-mail: sorokinnc@rambler.ru

Alexander Vladimirovich Vinogradov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Chief Researcher, Laboratory of Power Supply, Electrical Equipment, and Renewable Energy, Federal Scientific Center for VIM, 5 1st Institutsky Proezd, Moscow, 109428; Professor, Department of Power Supply, Oryol State Agrarian University, 69 General Rodina Street, Oryol, 302019; Professor, Department of Power Supply and Heat Power Engineering, Timiryazev Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Street, Moscow, 127434. Tel. 8(920)2879024, e-mail: winaleksandr@gmail.com

Roman Andreevich Tendetnik, student, Oryol State Agrarian University, 69 General Rodin Street, Oryol, 302019, e-mail: tendetnick.rom@yandex.ru

УДК 621.316.11

НЕСИММЕТРОИЧНЫЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4 КВ, МЕТОДЫ РАСЧЁТА

Р.А. Тендетник, Е.В. Винокуров

ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

Аннотация: *В представленной работе рассматриваются особенности симметричных и несимметричных режимов работы трёхфазных электрических сетей напряжением 0,4 кВ. Отмечено, что симметрия фазных напряжений и токов является ключевым условием эффективной и надёжной работы электрооборудования, тогда как несимметрия, возникающая вследствие неравномерного распределения однофазных нагрузок, повреждений или переходных процессов, приводит к увеличению потерь, перегреву обмоток электродвигателей, сокращению срока службы электрооборудования и снижению качества электроэнергии. В работе проанализированы методы оценки несимметрии на основе теории симметричных составляющих для напряжений и токов, приведены расчётные зависимости коэффициентов несимметрии и указаны нормативные значения, установленные ГОСТ 32144-2013. Рассмотрены также современные подходы к исследованию несимметричных режимов на основе компьютерного моделирования в специализированных программных комплексах - RastrWin3, DIgSILENT PowerFactory, ETAP и NEPLAN.*

Ключевые слова: *трёхфазные электросети, симметричный режим, несимметричный режим, несимметрия напряжений, коэффициент несимметрии, симметричные составляющие, фазные напряжения, моделирование, RastrWin3, DIgSILENT PowerFactory, ETAP, NEPLAN, сельские сети 0,4 кВ, фазировка, неравномерная нагрузка, ГОСТ 32144–2013.*

Введение. В трёхфазных сетях различают симметричный и несимметричный режимы работы. В симметричном режиме фазные напряжения и токи равны, что обеспечивает стабильность и минимальные потери. На практике часто возникает несимметрия из-за неравномерного распределения нагрузок или повреждений в сети.

Несимметрия напряжений приводит к ряду негативных последствий: сокращается срок службы асинхронных двигателей из-за неравномерных токов и перегрева обмоток, возрастает риск выхода из строя трёхфазных электроприборов, увеличиваются потери и снижается точность учёта электроэнергии. Для однофазных потребителей это выражается в повышенном или пониженном напряжении, что может вызвать некорректную работу и повреждение бытовых приборов, особенно энергосберегающих ламп [1].

Материалы и методы исследования. Для анализа несимметрии применяются:

метод симметричных составляющих - вычислительный инструмент для оценки и анализа несимметрии;

моделирование в программных комплексах - средство прогнозирования для оптимизации электрических сетей.

Понятие симметричного и несимметричного режимов.

Симметричный режим работы характеризуется равенством токов и напряжений во всех фазах, что достигается при равенстве величины нагрузки по фазам. В таком случае ток в

нейтральном проводнике равен нулю, а система фазных напряжений представляет собой идеальную симметричную систему с минимальными потерями.

Несимметричный режим работы характеризуется различием по величине токов и напряжений в отдельных фазах. Основные причины несимметрии - неравномерное распределение однофазных нагрузок, повреждения в линии или оборудовании, а также переходные процессы, например, при несимметричных коротких замыканиях [2].

При несимметричном режиме ток в нейтральном проводнике становится отличным от нуля, что вызывает дополнительные потери энергии и нагрев проводников. Кроме того, несимметрия напряжений отрицательно сказывается на работе трёхфазных электродвигателей, вызывая вибрации, перегрев обмоток и снижение срока службы. Для количественной оценки несимметрии применяется коэффициент несимметрии, представляющий собой отношение действующего значения обратной или нулевой последовательности напряжений или токов к действующему значению прямой последовательности.

Поддержание симметричного режима является одной из важных задач для правильной эксплуатации электрических сетей 0,4 кВ. Для минимизации несимметрии напряжения применяются всевозможные методы, а также создаются технические решения.

Результаты и обсуждение. Для оценки несимметрии в электрических сетях возможно применение следующих методов:

Метод симметричных составляющих для напряжений.

Суть метода заключается в том, что любую несимметричную систему напряжений можно разложить на три симметричные системы [3,4]:

прямой последовательности U_1,

обратной последовательности U_2,

нулевой последовательности U_0.

Выражение для метода симметричных составляющих имеет следующий вид [3,4]:

$$\begin{cases} U_1 = \frac{1}{3} \cdot (U_A + a \cdot U_B + a^2 \cdot U_C) \\ U_2 = \frac{1}{3} \cdot (U_A + a^2 \cdot U_B + a \cdot U_C) \\ U_0 = \frac{1}{3} \cdot (U_A + U_B + U_C) \end{cases}, \quad (1)$$

где U_1 – напряжение прямой последовательности;

U_2 – напряжение обратной последовательности;

U_0 – напряжение нулевой последовательности;

U_A – напряжение на фазе А;

U_B – напряжение на фазе В;

U_C – напряжение на фазе С.

$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ}$.

Коэффициент несимметрии по напряжению обратной и нулевой последовательностей рассчитывается как [3,4]:

$$K_{U_2} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%; \quad (2)$$

$$K_{U_0} = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Согласно нормативу значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности KU2 и несимметрии напряжений по нулевой последовательности KU0 не должны превышать 2% в течение 95% времени интервала в одну неделю и 4% в течение 100% времени [5].

Метод симметричных составляющих для токов

Если измеряются токи, можно использовать аналогичные преобразования, оценивая несимметрию токов. В таком случае формула примет вид [3,6]:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{1}{3} \cdot (I_A + a \cdot I_B + a^2 \cdot I_C) \\ I_2 = \frac{1}{3} \cdot (I_A + a^2 \cdot I_B + a \cdot I_C) \\ I_0 = \frac{1}{3} \cdot (I_A + I_B + I_C) \end{cases}, \quad (4)$$

где I_1 – ток прямой последовательности;

I_2 – ток обратной последовательности;

I_0 – ток нулевой последовательности;

I_A – ток на фазе А;

I_B – ток на фазе В;

I_C – ток на фазе С.

В сетях с большим сопротивлением нулевого провода перекос по токам сильнее отражается на напряжении.

Коэффициент несимметрии по токам обратной и нулевой последовательностей рассчитывается как [3,4]:

$$K_{I_2} = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100\%; \quad (5)$$

$$K_{I_0} = \frac{I_0}{I_1} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Методы на основе моделирования в программных комплексах.

RastrWin3 - отечественный программный комплекс, предназначенный для расчёта, анализа и оптимизации режимов электрических сетей различной сложности и уровней напряжения (0,4–1150 кВ). Система выполняет расчёты установившихся режимов с учётом частоты, анализ потоков и потерь мощности, эквивалентирование сетей, а также оптимизацию по потерям и распределению реактивной мощности. Кроме того, реализованы функции определения положений регуляторов трансформаторов и анализа предельных режимов энергосистем [7].

DIgSILENT PowerFactory - программный продукт немецкой компании DIgSILENT GmbH для моделирования, расчёта и планирования электроэнергетических систем любого масштаба. Комплекс поддерживает анализ потокораспределения при различных схемных состояниях, расчёт токов короткого замыкания по стандарту IEC 60909, RMS- и EMT-симуляции переходных процессов, гармонический анализ, оптимальное потокораспределение (OPF) и стохастическую оценку надёжности методом Монте-Карло [8].

ETAP - интегрированный проприетарный пакет для проектирования, моделирования, мониторинга и автоматизации электроэнергетических систем. Программная среда реализует концепцию цифрового двойника, обеспечивая построение однолинейных и геопространственных моделей, анализ установившихся и переходных режимов, расчёт

коротких замыканий, пуск двигателей и координацию релейной защиты. В состав ETAP входят также инструменты гармонического анализа и оценки качества электроэнергии [9].

NEPLAN - универсальная система анализа и моделирования энергетических сетей, применяемая для планирования и оптимизации электроэнергетических объектов. Комплекс обеспечивает расчёт потоков мощности, коротких замыканий, устойчивости, надёжности и гармоник, а также координацию защиты и динамическое моделирование. Благодаря масштабируемости NEPLAN используется как для малых распределительных сетей, так и для крупных межсистемных энергокомплексов [10,11].

Практическая значимость исследуемых методов.

Математические расчёты и моделирование с использованием программных комплексов позволяют получить наглядное представление об уровне несимметрии в рассматриваемой сети, оценить её текущее состояние и принять меры по оптимизации распределения нагрузок. Это способствует снижению потерь при передаче электроэнергии и повышению её качества до нормативного уровня для потребителей. А также обоснование для планирования реконструкции или модернизации проблемной сети.

Выводы. Симметрия трёхфазных систем - ключевое условие эффективной и безопасной работы электрических сетей. Несимметрия напряжений и токов вызывает повышенные потери, сбои оборудования и снижение качества электроэнергии. Для её оценки применяют метод симметричных составляющих, позволяющий количественно определить коэффициент несимметрии и сопоставить его с нормативами. Программное моделирование используется при анализе сложных или протяжённых сетей на этапах проектирования, оптимизации и реконструкции. Применение этих методов позволит объективно оценивать уровень несимметрии в сетях и принимать меры для её снижения.

Список используемых источников

1. Дулепов Д.Е., Тюндина Т.Е. Расчет несимметрии напряжений СЭС // Вестник НГИЭИ. 2015. №4 (47). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-nesimmetrii-napryazheniy-ses (дата обращения: 11.10.2025).
2. Методические указания для самостоятельной работы аспирантов по дисциплине «Несимметричные режимы работы распределительных электрических сетей» составлены на основе монографии: И.В. Наумов. Несимметричные режимы работы распределительных электрических сетей»: Монография (теоретические обобщения). Иркутск: Изд-во ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 2022- 152 с. (протокол № 5 от 11.01.2022 г.).
3. Метод симметричных составляющих. [Текст]: методические указания к самостоятельному изучению раздела курса ТОЭ и к выполнению расчетно-графического задания / Н.Ю.Ушакова, Л.В.Быковская; Оренбургский гос. ун-т. Оренбург : ОГУ, 2010. 59 с.
4. Аполлонский С.М., Леонтьев В.В. Электротехника и электроника. Трехфазные электрические цепи: Учеб. пособие. СПб.: СЗТУ, 2002 - 59 с.
5. ГОСТ 32144-2013 «электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» (дата обращения 12.10.2025).
6. Дед А. В., Паршукова А.В. Метод расчета дополнительных потерь мощности при несимметрии режима работы системы электроснабжения // Инновационная наука. 2015. №10-1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metod-rascheta-dopolnitelnyh-poter-moschnosti-pri-nesimmetrii-rezhima-raboty-sistemy-elektrosnabzheniya (дата обращения: 11.10.2025).

7. RastrWin3 [Электронный ресурс] // Официальный сайт разработчиков – ООО «ИнЭнерго». Режим доступа: [https://rastrwin.ru/] (https://rastrwin.ru/) (дата обращения: 12.10.2025).

8. DIgSILENT PowerFactory [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании DIgSILENT GmbH. – Режим доступа: [https://www.digsilent.de/] (https://www.digsilent.de/) (дата обращения: 12.10.2025).

9. ETAP [Электронный ресурс] // Официальный сайт разработчиков Operation Technology, Inc. – Режим доступа: https://etap.com/ (дата обращения: 13.10.2025).

10. Проектирование и эксплуатация систем электроснабжения: учебно-методическое пособие / С.В. Родыгина, Д.А. Павлюченко. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2017 – 47 с.ISBN 978-5-7782-3299-0.

11. NEPLAN [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании NEPLAN AG. – Режим доступа: [https://www.neplan.ch/] (https://www.neplan.ch/) (дата обращения: 14.10.2025).

12.

Bibliography

1. Dulepov D.E., Tyundina T.E. Calculation of voltage asymmetry of solar power plants // Bulletin of NGIEI. 2015. No. 4 (47). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-nesimmetrii-napryazheniy-ses (date of access: 11.10.2025).

2. Methodological guidelines for independent work of postgraduate students in the discipline "Asymmetrical operating modes of distribution electrical networks" are compiled based on the monograph: I.V. Naumov. "Asymmetrical operating modes of distribution electrical networks": Monograph (theoretical generalizations). Irkutsk: Publishing house of FGBOU VO Irkutsk SAU, 2022, 152 p. (protocol No. 5 dated 11.01.2022).

3. Method of symmetrical components. [Text]: Guidelines for independent study of the course section on TOE and for completing the calculation and graphic assignment / N. Yu. Ushakova, L. V. Bykovskaya; Orenburg State University. Orenburg: OSU, 2010. 59 p.

4. Apollonsky S. M., Leontyev V. V. Electrical Engineering and Electronics. Three-Phase Electric Circuits: Textbook. Manual. St. Petersburg: SZTU, 2002 - 59 p.

5. GOST 32144-2013 "Electrical Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Quality Standards for Electrical Energy in General-Purpose Power Supply Systems" (accessed 12.10.2025).

6. Ded A. V., Parshukova A. V. Method for calculating additional power losses due to asymmetry in the operating mode of the power supply system // Innovative Science. 2015. No. 10-1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metod-rascheta-dopolnitelnyh-poter-moschnosti-pri-nesimmetrii-rezhima-raboty-sistemy-elektrosnabzheniya (accessed: 11.10.2025).

7. RastrWin3 [Electronic resource] // Official website of the developers – InEnergo LLC. Access mode: [https://rastrwin.ru/] (https://rastrwin.ru/) (accessed: 12.10.2025).

8. DIgSILENT PowerFactory [Electronic resource] // Official website of DIgSILENT GmbH. – Access mode: [https://www.digsilent.de/] (https://www.digsilent.de/) (date of access: 12.10.2025).

9. ETAP [Electronic resource] // Official website of the developers Operation Technology, Inc. – Access mode: https://etap.com/ (date of access: 13.10.2025).

10. Design and operation of power supply systems: a teaching aid / S.V. Rodygina, D.A. Pavlyuchenko. Novosibirsk: Publishing house of NSTU. 2017 – 47 p. ISBN 978-5-7782-3299-0.

11. NEPLAN [Electronic resource] // Official website of NEPLAN AG. – Access mode: [https://www.neplan.ch/] (https://www.neplan.ch/) (date of access: 14.10.2025).

Евгений Владимирович Винокуров, студент 1 курса магистратуры факультета «Агротехники и энергообеспечения» направления подготовки 13.04.02. «Электроэнергетика и электротехника», ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69Vinokurov.228@bk.ru;
Роман Андреевич Тендетник, студент, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 302019, г.Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69 e-mail: tendetnick.rom@yandex.ru

ASYMMETRIC MODES OF 0.4 kV ELECTRIC NETWORKS, CALCULATION METHODS

R.A. Tendetnik, E.V. Vinokurov

Oryol State Agrarian University

Abstract: This paper examines the characteristics of symmetrical and asymmetrical operating modes of three-phase 0.4 kV electrical networks. It is noted that the symmetry of phase voltages and currents is key to the efficient and reliable operation of electrical equipment, while asymmetry resulting from uneven distribution of single-phase loads, damage, or transients leads to increased losses, overheating of electric motor windings, reduced service life of electrical equipment, and deterioration in power quality. This paper analyzes methods for assessing asymmetry based on the theory of symmetrical components for voltages and currents, presents calculated dependencies of asymmetry coefficients, and specifies the standard values established by GOST 32144-2013. Modern approaches to studying asymmetrical modes based on computer modeling in specialized software packages-RastrWin3, DIgSILENT PowerFactory, ETAP, and NEPLAN-are also considered.

Keywords: three-phase electric networks, symmetrical mode, asymmetrical mode, voltage asymmetry, asymmetry coefficient, symmetrical components, phase voltages, modeling, RastrWin3, DIgSILENT PowerFactory, ETAP, NEPLAN, 0.4 kV rural networks, phasing, uneven load, GOST 32144-2013.

Evgeny Vladimirovich Vinokurov, first-year master's student, Faculty of Agricultural Engineering and Energy Supply, major 13.04.02. "Electric Power Engineering and Electrical Engineering," Oryol State Agrarian University, 69 General Rodin Street, Oryol, 302019; Vinokurov.228@bk.ru
Roman Andreevich Tendetnik, student, Oryol State Agrarian University, 69 General Rodin Street, Oryol, 302019; email: tendetnick.rom@yandex.ru

УДК 004.94:621.3.064.1:621.315.1

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 0,4 кВ В СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ENGEE

А.А. Лансберг

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Аннотация. *Моделирование является одним из наиболее эффективных способов исследования работы технических систем. За последние годы была разработана отечественная среда моделирования Engee, которая является аналогом MATLAB Simulink. Множество научных работ, в которых используется среда моделирования Engee, направлено на исследование процессов управления, механизации производств и других вопросов. При этом работы, связанные с моделированием электроэнергетических систем, отсутствуют. В настоящей работе реализовано исследование режимов устойчивых коротких замыканий в электрической сети 0,4 кВ. Прототипом компьютерной модели электрической сети 0,4 кВ является радиальная линия электропередачи 0,4 кВ протяжённостью 1000 метров, выполненная с использованием неизолированного провода А-35, подключенная к трансформатору ТМ-250/10/0,4 кВ Y/Yн-0. Моделирование коротких замыканий было реализовано в наиболее удалённой её точке на вводе у потребителя. Время моделирования в среде Engee было задано продолжительностью 0,5 секунды. Были получены графики распределений токов и напряжений в устойчивых аварийных режимах, которые соответствуют теории переходных процессов в электрических сетях. Установлено, что в режиме однофазного короткого замыкания напряжение в точке замыкания равно 0 В, а ток повреждённой фазы значительно превышает токи неповреждённых фаз. В режиме двухфазного короткого замыкания напряжения повреждённых фаз составляют половину от их номинального напряжения в нагрузочном режиме, а токи повреждённых фаз значительно возрастают. В режиме двухфазного короткого замыкания на нулевой провод в точке замыкания напряжения повреждённых фаз равны 0 В, а токи повреждённых фаз значительно возрастают. При этом в режиме трёхфазного короткого замыкания напряжения повреждённых фаз в точке замыкания равны 0 В, а токи возрастают и имеют одинаковые значения.*

Ключевые слова: *компьютерное моделирование, линия электропередачи, электрическая сеть, Engee, короткое замыкание.*

Введение. В настоящее время компьютерное моделирование является одним из наиболее эффективных методов исследования работы инженерных систем. За последние несколько лет коммерческой компанией ЦИТМ Экспонента была разработана российская среда моделирования Engee, которая является аналогом зарубежного программного обеспечения MATLAB Simulink. В работе [1] отмечено, что среда моделирования разработана в 2023 году, а в её основе заложен язык программирования Julia. Среда моделирования Engee используется для изучения работы инженерных систем в различных отраслях промышленности.

Например, в работе [2] производится оценка возможности использования среды моделирования для изучения механических характеристик деталей машин. Авторами отмечено, что среда моделирования Engee позволяет автоматизировать задачу подбора

режимов обработки деталей машин [3]. В свою очередь, в работе [4] представлен обзор возможностей применения Engee в решении задач управления технологическими процессами в пищевой промышленности. Среда моделирования Engee также используется и для решения задач в авиационной отрасли. Например, в работе [5] представлены основные этапы разработки цифрового двойника наземной радионавигационной системы. С использованием среды моделирования авторам удалось выявить значения базовых узлов для разрабатываемой системы. В работе [6] рассмотрены особенности вывода программного кода среды моделирования Engee на Arduino IDE.

Актуальным направлением является использование среды моделирования Engee для анализа работы электроэнергетических систем. Например, в работе [7] в среде моделирования Engee разработана компьютерная модель ветроэнергетической установки с синхронным генератором с постоянными магнитами. Разработанная модель позволяет выполнять расчеты режимов электроэнергетических систем с разработанной установкой. В свою очередь, в настоящее время в литературных источниках не реализовано моделирование режимов работы электрических сетей в среде Engee, в частности, низковольтных, что является актуальной задачей.

В настоящее время электрические сети 0,4 кВ характеризуются завышенной протяжённостью, низкой мощностью используемых трансформаторов и устаревшими типами используемых защитных коммутационных аппаратов. Это привод к проблемам низкой защищённости от токов однофазного короткого замыкания и низкой надёжности. Для повышения эффективности их эксплуатации разрабатываются современные технические средства, для которых необходимо задавать уставки срабатывания. Данные уставки можно выявить в ходе моделирования аварийных режимов работы. В представленной работе предлагается осуществить компьютерной моделирования аварийных режимов работы электрической сети 0,4 кВ, вызванными короткими замыканиями, в среде моделирования Engee.

Цель работы заключается в исследовании электрических параметров режимов коротких замыканий в электрической сети 0,4 кВ на компьютерной модели в среде Engee.

Материалы и методы исследования. Для исследования режимов работы электрической сети 0,4 кВ в программной среде Engee была использована шаблонная модель системы с глухозаземлённой нейтралью, которая была переработана до вида, представленного на рисунке 1.

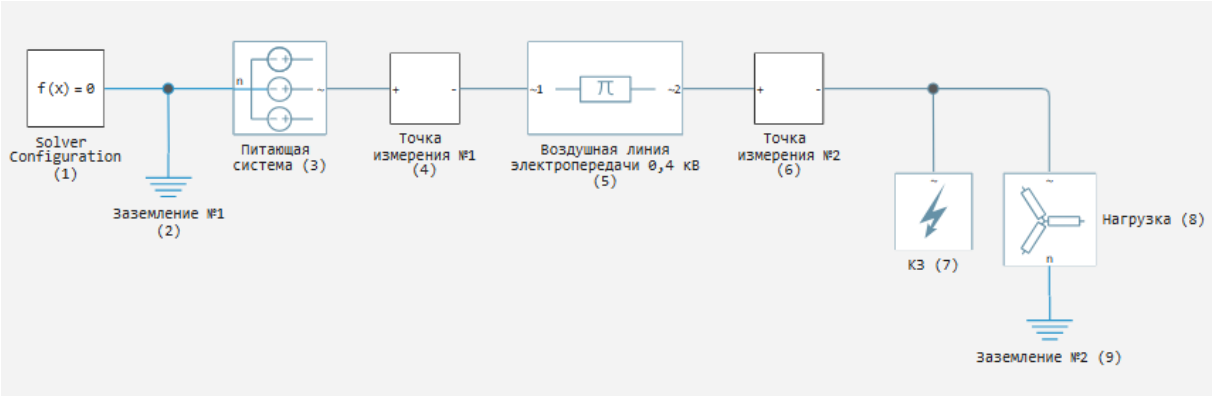


Рисунок 1 – Компьютерная модель электрической сети 0,4 кВ
в программном комплексе Engee

Компьютерная модель электрической сети 0,4 кВ в программном комплексе Engee, представленная на рисунке 1, содержит: блок Solver Configuration (1); заземление №1 (2), питающую систему (3); точку измерения №1 (4); линию 0,4 кВ (5); точку измерения №2 (6); блок моделирования аварий - КЗ (7); нагрузку (8); заземление №2 (9). В настоящей работе была предпринята попытка воспроизвести компьютерную модель сельской электрической сети 0,4 кВ в MATLAB Simulink, представленную в работе [8].

Блок Solver Configuration является аналогом блока powergui в программном комплексе Matlab Simulink и необходим для запуска компьютерной модели [9]. В блоке Solver Configuration задаются следующие параметры. Первым параметром блока является тип синхронизации, который имеет значения Discrete и Continuous. В представленной модели использован тип синхронизации Discrete. Следующим параметром блока является выбор системы решателя, который имеет следующие значения: ImplicitEuler (Fast); ImplicitEuler (Robust); Trapezoid (Fast); Trapezoid (Robust). Также блок Solver Configuration содержит ряд функций, которые могут быть как включены, так и отключены. К ним относятся: осуществление моделирования из начального состояния, использование автоматической дифференциации, использование матрицы Якоби - analytical Jacobian или Sparse Jacobian; использование экспериментальных установок; использование утверждений во время моделирования, использование экспериментального алгоритма инициализации DAE. В представленной компьютерной модели используются только функции автоматической дифференциации и матрицы Якоби. Предпоследний задаваемым параметром блока является время выборки, которое для представленной модели составляет $100e^{-6}$.

Питающая система моделируется с использованием блока Voltage Source (Three-Phase) [10]. Данный блок имеет ряд следующих параметров. Первым является номинальное напряжение, значение которого для разработанной компьютерной модели принято равным 400 В. Следующим параметром источника является фазовый сдвиг, значение которого принято равным 0 радиан. В качестве номинальной частоты источника принято значение 50 Гц. В качестве следующего параметра необходимо выбрать тип сопротивления источника, который может быть задан отношением индуктивного сопротивления к активному сопротивлению (X/R Ratio), последовательным соединением активных сопротивлений (Series R), последовательным соединением индуктивных сопротивлений (Series L), последовательным соединением активного и индуктивного сопротивлений (Series RL). На представленной компьютерной модели используется тип X/R Ratio. Следующим параметром является мощность трёхфазного короткого замыкания на выводе источника. Прототипом источника питания на рассматриваемой компьютерной модели является трансформатор типа ТМ-250/10/0,4 кВ $Y/Y_н$-0 в связи с тем, что данные трансформаторы наиболее часто используются при электроснабжении сельскохозяйственных потребителей. При использовании данного трансформатора ток трёхфазного короткого замыкания на выводе 0,4 кВ составляет 6134 А, тогда мощность короткого замыкания составит – 2453600 ВА. Отношение индуктивного сопротивления трансформатора ТМ-250/10/0,4 кВ $Y/Y_н$-0 к активному (X/R Ratio) составляет 30 о.е. Последним параметром блока является функция генерирования гармоник, что не используется в представленной компьютерной модели.

Блок линии электропередачи 0,4 кВ Three-Phase PI Section Line в программном комплексе Engee дублирует аналогичный блок в программной среде MATLAB Simulink [11]. В качестве параметров зададим параметры для неизолированного провода типа А-35, так как он наиболее часто используется при электроснабжении сельскохозяйственных потребителей [12]. В качестве параметра протяжённости линии электропередачи используется значение 1

км, а номинальной частоты – 50 Гц. Активное сопротивление прямой последовательности (r_1) составляет 0,868 Ом/км. Активное сопротивление нулевой последовательности (r_0) – 3,472 Ом/км. Индуктивные сопротивления прямой (L_1) и нулевой (L_0) последовательностей для провода А-35 составляют $96 \cdot 10^{-5}$ Гн/км и $383 \cdot 10^{-5}$ Гн/км. При этом ёмкости прямой и нулевой последовательности для провода А-35 составляют $12 \cdot 10^{-9}$ Ф/км и $10 \cdot 10^{-9}$ Ф/км [13].

Нагрузка в программном комплексе Engee моделируется блоком Wye-Connected Load [14]. Она может быть представлена как отдельными сопротивлением, индуктивностью или ёмкостью, так и различными вариантами их последовательного и параллельного соединения. Для представленной модели была выбрана только активная нагрузка со значением фазного сопротивления 5 Ом.

Короткое замыкание моделируется с использованием блока Fault (Three-Phase) [15]. Блок позволяет моделировать режимы однофазного короткого замыкания на землю, двухфазного короткого замыкания, двухфазного короткого замыкания на землю, трёхфазного короткого замыкания и трёхфазного короткого замыкания на нулевой провод. Параметрами блока являются переходное сопротивление между повреждёнными фазой и нейтралью, а также между нейтралью и землёй, которые были приняты равными 0 Ом. Последним параметром блока является проводимость между фазой и нейтралью, которая была принята равным 0 См.

Как отмечалось ранее, на разработанной компьютерной модели было реализовано исследование устойчивых режимов коротких замыканий в электрической сети 0,4 кВ. Продолжительность времени моделирования была задана значением 0,5 секунды. При этом короткие замыкания рассматриваются в наиболее удалённой точке электрической сети 0,4 кВ непосредственно на вводе потребителя. Это связано с тем, что среди 8682 аварийных отключений в электрических сетях 0,4 кВ Орловской области за 2018-2023 годы [16, 17, 18] свыше 50% аварийных отключений были вызваны повреждениями на электрооборудовании потребителя [19, 20, 21].

Результаты и обсуждение. По результатам компьютерного моделирования режимов устойчивых коротких замыканий в электрической сети 0,4 кВ в среде Engee было установлено, что при исследовании моделей электроэнергетических систем на визуальном интерфейсе возможно получение осциллограмм токов и напряжений в конкретной рассматриваемой точке. Для более детального анализа режимов работы электроэнергетической системы необходимо знание языка программирования Julia, включающего в себя основы Python, C, C++ и Scheme.

В представленной работе рассматриваются только осциллограммы установившихся аварийных режимов работы электрической сети 0,4 кВ, что, в свою очередь, не позволяет оценить достоверность компьютерной модели. Так, на рисунке 2, представлены осциллограммы токов и напряжений при однофазном коротком замыкании на вводе у потребителя. Моделирование режима однофазного короткого замыкания на представленной модели было реализовано на фазе «А». При этом ток и напряжение фазы «А» на всех осциллограммах отображено жёлтым цветом, фазы «В» - зелёным цветом, а фазы «С» - красным.

Полученные на рисунке 2 графики отражают основные положения теории переходных процессов.

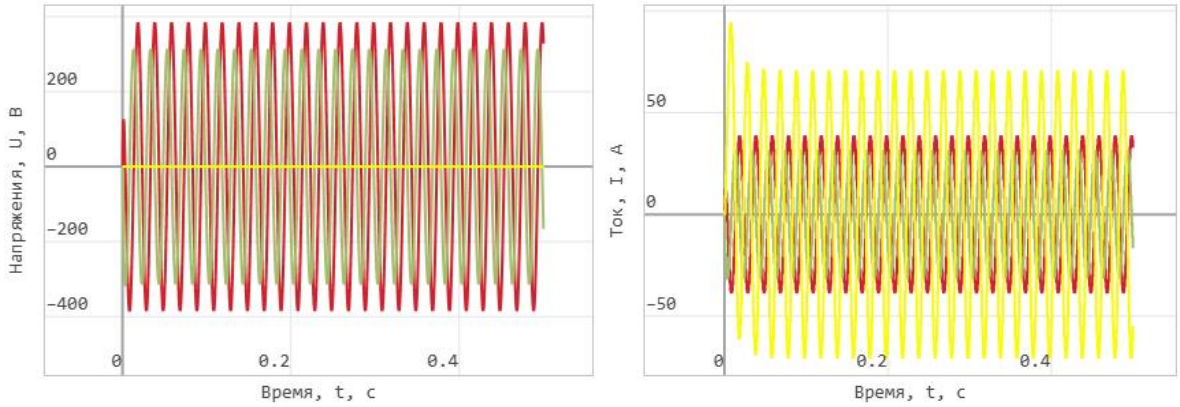


Рисунок 2 – Распределение напряжений и токов в режиме однофазного короткого замыкания на вводе у потребителя

Напряжение повреждённой фазы (для рассматриваемой модели - фаза «А») имеет значение 0 В на протяжении всего времени устойчивого однофазного короткого замыкания [22]. При этом амплитудные значения напряжений неповреждённых фаз «В» и «С» согласно осциллограммы имеют значения порядка 200 В. В свою очередь, при однофазном коротком замыкании амплитудные значения тока повреждённой фазы «А» возрастают до значений 60 А. А амплитудные значения токов неповреждённых фаз ввиду подключенной нагрузки имеют значения порядка 25 А. Исходя из амплитудных значений тока повреждённой фазы можно сделать вывод, что разработанная модель характеризуется низкой степенью достоверности. Это следует исходя из того, что при расчёте тока аварийного режима при тех же исходных условиях с использованием методов симметричных составляющих и петли «фаза-ноль» полученные результаты имеют большие значения, чем полученные с использованием среды моделирования Engee.

На рисунке 3 представлены осциллограммы токов и напряжений при двухфазном коротком замыкании на вводе у потребителя. На представленной компьютерной модели электрической сети 0,4 кВ двухфазное короткое замыкание моделировалось между фазами «В» и «С». Согласно рисунка 3 ток в повреждённых фазах «В» и «С» возрастает до амплитудных значений 75-100 А. При этом амплитудное значения тока неповреждённой фазы «А» с нагрузкой составляет 25 А. В свою очередь, полученные напряжения в режиме двухфазного короткого замыкания отражают основные положения теории переходных процессов. Напряжения повреждённых фаз «В» и «С» равны между собой и их амплитудные значения, равные порядка 120-130 В составляют половину от номинального напряжения электрической сети [22]. При этом напряжение неповреждённой фазы «А» соответствует напряжению в нагрузочном режиме.

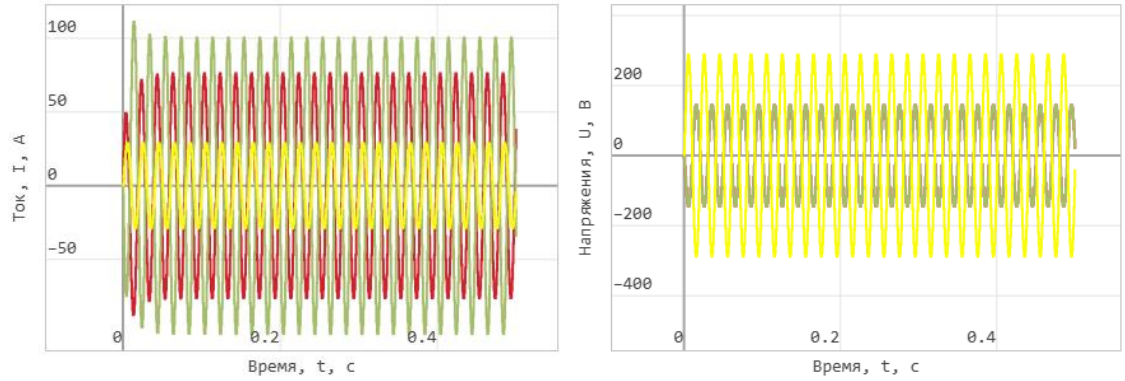


Рисунок 3 – Распределение напряжений и токов в режиме двухфазного короткого замыкания на вводе у потребителя

На рисунке 4 представлено распределение напряжений в режиме двухфазного короткого замыкания на нулевой провод. В представленном исследовании двухфазное короткое замыкание на нулевой провод моделируется между фазами «B» и «C».

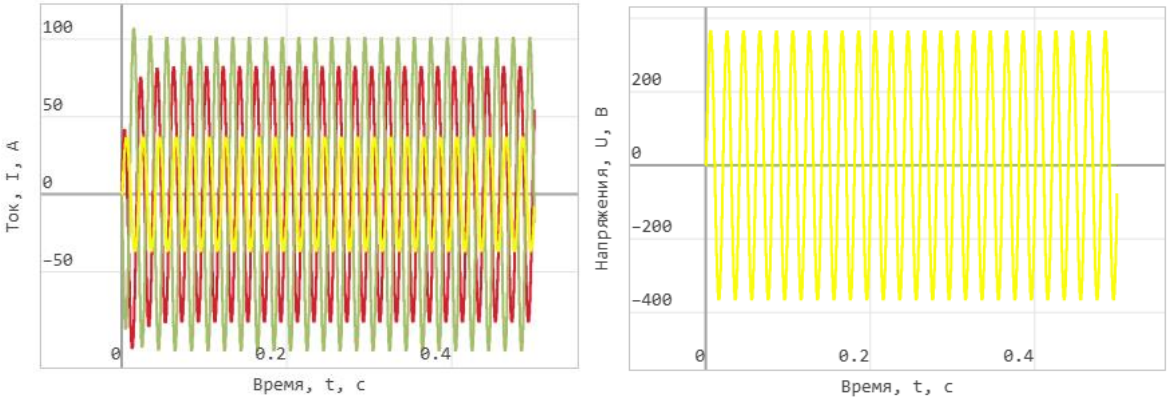


Рисунок 4 – Распределение напряжений и токов в режиме двухфазного короткого замыкания на нулевой провод на вводе у потребителя

Исходя из результатов, представленных на рисунке 4, следует, что в режиме двухфазного короткого замыкания на нулевой провод амплитудные значения токов в повреждённых фазах «B» и «C» возрастают до значений 75-100 А, а амплитудное значение тока в неповреждённой фазе «A» с нагрузкой составляет порядка 25 А. При этом напряжения повреждённых фаз «B» и «C» на вводе у потребителя равны 0 В. В свою очередь, амплитудное значение напряжения неповреждённой фазы «A» превышает 250 В [22].

На рисунке 5 представлены графики токов и напряжений при трёхфазном коротком замыкании на вводе у потребителя.

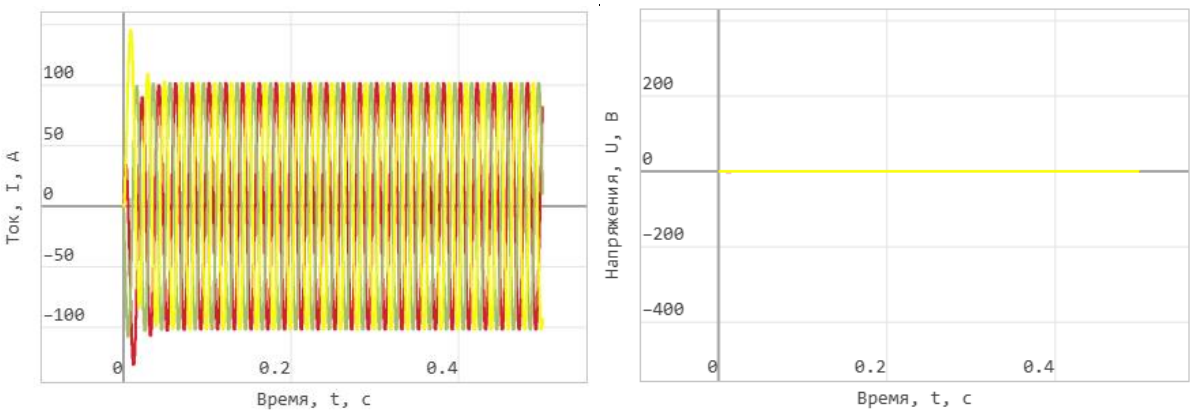


Рисунок 5 – Распределение напряжений и токов в режиме трёхфазного короткого замыкания на вводе у потребителя

Так, в режиме трёхфазного короткого замыкания амплитудные значения токов на вводе у потребителя для рассматриваемой компьютерной модели составили 100 А, при этом фазные напряжения равны 0 В, что отражает основные положения теории переходных процессов [22].

Таким образом, в ходе компьютерного моделирования были получены графики напряжений и токов на вводе у потребителя при разных видах коротких замыканий.

Следует отметить, что недостатком среды моделирования Engee является необходимость знания основ программирования на языке Julia. Эта особенность делает невозможным реализовать полноценный анализ режимов работы электроэнергетических систем. Также было установлено, что разрабатываемые в среде Engee модели электроэнергетических систем

характеризуются низкой степенью достоверности, так как получаемые с их использованием численные значения не соответствуют результатам, получаемым с использованием других общепринятых методов. В целом среда моделирования Engee практически полностью схожа с MATLAB Simulink. При этом в среде Engee содержится меньше блоков и библиотек по сравнению с MATLAB Simulink. Также часть блоков в библиотеках в текущей версии 25.8.2-H1, актуальной на сентябрь 2025 года, имеет русские названия, а оставшаяся часть – английские. В заключении следует отметить, что среда моделирования Engee также, как и MATLAB Simulink, в недостаточной степени позволяет моделировать трёхфазные четырёхпроводные электрические сети, что проявляется в отсутствии для этого требуемых блоков в библиотеках.

Выводы. В работе было осуществлено исследование режимов симметричного и несимметричных коротких замыканий в электрической сети 0,4 кВ в среде моделирования Engee. В качество прототипа электрической сети 0,4 кВ использовалась радиальная линия электропередачи 0,4 кВ протяжённостью 1000 метров, выполненная с использованием неизолированного провода А-35, подключенная к трансформатору ТМ-250/10/0,4 кВ $Y/Y_н$-0. Моделирование коротких замыканий было реализовано в наиболее удалённой её точке на вводе у потребителя. Были получены графики распределений токов и напряжений в устойчивых аварийных режимах, которые соответствуют теории переходных процессов в электрических сетях.

Список использованных источников

1. Шатилов В.О., Бизов А.В., Валгуцков М.А., Кириченко А.О., Громов А.А. Современные российские программные среды для моделирования сложных технических систем // Военное обозрение. 2025. №1(25). С.107-112. EDN: AKLBXC.
2. Шкурко И.В., Романова А.И. Практика применения Российской платформы Engee для моделирования изготовления деталей машин // Студенческий вестник. 2024. №47-12(333). С. 35-37. EDN: GGTFMK.
3. Милованова Л.Р., Шкурко И.В. Опыт применения российской платформы Engee для моделирования режимов обработки деталей машин // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2025. №1(60). С. 17-21. EDN: PRYLPK.
4. Никитина М.А., Каповский Б.Р., Дыдыкин А.С., Пчелкина В.А., Петров М.А. «Мягкие» вычисления или классические модели управления? И то, и другое в российской среде модельно-ориентированного проектирования Engee // Мясная индустрия. 2025. №1. С. 40-43. DOI 10.37861/2618-8252-2025-01-40-43. EDN: IDUTSK.
5. Цымбал М.Р., Семичастнов А.Е., Балакин Д.А., Удалов Н.Н. Разработка цифрового двойника наземной радионавигационной системы по принципам модельно-ориентированного проектирования с помощью математической среды моделирования Engee // Труды МАИ. 2024. №136. EDN: VMEJBE.
6. Оглоблин Д.И., Трудоношин В.А. Использование автоматической генерации кода с для восстановления знаний программирования // Вопросы педагогики. 2025. № 1-1. С. 92-95. EDN: RTKAMZ.
7. Андреев Г.Б., Шескин Е.Б. Модель ветроэнергетической установки с синхронным генератором с постоянными магнитами для исследования установившихся и переходных режимов электроэнергетических систем // Энергоэксперт. 2025. №2(94). С. 46-50. EDN: JGGZXG.

8. Лансберг А.А., Виноградов А.В. Компьютерное моделирование режима устойчивого однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ с учетом влияния нагрузки // Электроэнергия. Передача и распределение. 2024. №6(87). С. 22-31. EDN: KWYFJA.

9. Документация Engee. Solver Configuration. URL: https://engee.com/helpcenter/stable/ru/fmod-utility/solver-configuration.html (дата обращения: 30.08.2025 г.).

10. Документация Engee. Источник переменного напряжения (3 фазы). URL: https://engee.com/helpcenter/stable/ru/fmod-electricity-sources/voltage-source-three-phase.html (дата обращения: 30.08.2025 г.).

11. Документация Engee. П-секция (3 фазы). URL: https://engee.com/helpcenter/stable/ru/fmod-electricity-lines/three-phase-pi-section-line.html (дата обращения: 30.08.2025 г.).

12. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Анализ конфигурации электрических сетей 0,4 кВ Орловской области // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, №4(53). С. 22-29. DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29. EDN: LHIRSK.

13. Лансберг А.А. Обоснование параметров компьютерной модели сельской электрической сети 0,4 кВ в Matlab Simulink // Агротехника и энергообеспечение. 2023. №3(40). С. 36-47. EDN: EIZOMF.

14. Документация Engee. Нагрузка, соединённая в звезду. URL: https://engee.com/helpcenter/stable/ru/fmod-electricity-rlc-assemblies/wye-connected-load.html (дата обращения: 30.08.2025 г.).

15. Документация Engee. Короткое замыкание (3 фазы). URL: https://engee.com/helpcenter/stable/ru/fmod-electricity-utilities/fault-three-phase.html (дата обращения: 30.08.2025 г.).

16. Виноградова А.В., Виноградов А.В. Анализ плановых и аварийных отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71, №3(56). С. 44-51. DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-3-44-51. EDN: VRFTOI.

17. Виноградова А.В., Виноградов А.В., Букреев А.В. Удельные показатели надежности электрических сетей 0,4 кВ // Агроинженерия. 2024. Т. 26, №6. С. 77-85. DOI 10.26897/2687-1149-2024-6-77-85. EDN: AZEIQF.

18. Виноградова А.В. Аналитические показатели динамики технологических нарушений воздушных линий 0,4-110 кВ // Агротехника и энергообеспечение. 2025. №1(46). С. 4-11. EDN: VJAWVD.

19. Виноградова, А. В. Причины отключений в сельских электрических сетях и их структурирование // Агротехника и энергообеспечение. 2024. №4(45). С. 12-19. EDN: FYMIMZ.

20. Виноградова А.В. Коэффициенты сезонности по количеству и продолжительности отключений в сельских электрических сетях с учетом их причин // Агроинженерия. 2025. Т. 27, №2. С. 92-99. DOI 10.26897/2687-1149-2025-2-92-99. EDN: HNXFHY.

21. Виноградова А.В., Виноградов А.В. Систематизация причин отключений в сельских электрических сетях // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2025. Т. 18, №1(84). С. 103-111. DOI 10.53914/issn2071-2243_2025_1_103. EDN: LYSOIC.

22. Коваленко Д.В. Режимы работы и замыкания в электроустановках // Молодой ученый. 2016. №18(122). С. 85-87. EDN: WMGYYV.

23.

Bibliography

1. Shatilov V.O., Bizov A.V., Valgutskov M.A., Kirichenko A.O., Gromov A.A. Modern Russian software environments for modeling complex technical systems // Military Review. 2025. No. 1 (25). Pp. 107-112. EDN: AKLBXC.

2. Shkurko I.V., Romanova A.I. Practice of using the Russian Engee platform for modeling the manufacturing of machine parts // Student Bulletin. 2024. No. 47-12 (333). Pp. 35-37. EDN: GGTFMK.

3. Milovanova L.R., Shkurko I.V. Experience of using the Russian Engee platform for modeling machine parts processing modes // Technical regulation in transport construction. 2025. No. 1 (60). Pp. 17-21. EDN: PRYLPK.

4. Nikitina M.A., Kapovsky B.R., Dydykin A.S., Pchelkina V.A., Petrov M.A. "Soft" Computing or Classical Control Models? Both in the Russian Model-Based Design Environment Engee // Meat Industry. 2025. No. 1. pp. 40-43. DOI 10.37861/2618-8252-2025-01-40-43. EDN: IDUTSK.

5. Tsymbal M.R., Semichastnov A.E., Balakin D.A., Udalov N.N. Development of a Digital Twin of a Ground-Based Radio Navigation System Based on Model-Based Design Principles Using the Engee Mathematical Modeling Environment // Proceedings of MAI. 2024. No. 136. EDN: VMEJBE.

6. Ogloblin D.I., Trudonoshin V.A. Using Automatic Code Generation to Recover Programming Knowledge // Voprosy pedagogiki. 2025. No. 1-1. pp. 92-95. EDN: RTKAMZ.

7. Andreev G.B., Sheskin E.B. Model of a Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Studying Steady-State and Transient Modes of Electric Power Systems // Energoexpert. 2025. No. 2(94). pp. 46-50. EDN: JGGZXG.

8. Lansberg A.A., Vinogradov A.V. Computer Simulation of a Stable Single-Phase Short Circuit in a 0.4 kV Rural Electric Network Taking into Account the Load Influence // Electric Power. Transmission and Distribution. 2024. No. 6(87). P. 22-31. EDN: KWYFJA.

9. Engee Documentation. Solver Configuration. URL: https://engee.com/helpcenter/stable/ru/fmod-utility/solver-configuration.html (accessed on August 30, 2025).

10. Engee Documentation. AC Voltage Source (3 Phase). URL: https://engee.com/helpcenter/stable/ru/fmod-electricity-sources/voltage-source-three-phase.html (accessed on August 30, 2025).

11. Engee Documentation. Pi-Section (3 Phase). URL: https://engee.com/helpcenter/stable/ru/fmod-electricity-lines/three-phase-pi-section-line.html (accessed on August 30, 2025).

12. Vinogradov AV, Lansberg AA, Vinogradova AV Analysis of the configuration of 0.4 kV electrical networks in the Oryol region // Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex. 2023. Vol. 70, No. 4 (53). Pp. 22-29. DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29. EDN: LHIRSK.

13. Lansberg AA Justification of the parameters of the computer model of the 0.4 kV rural electrical network in Matlab Simulink // Agrotechnics and energy supply. 2023. No. 3 (40). Pp. 36-47. EDN: EIZOMF.

14. Engee Documentation. Star-connected load. URL:

https://engee.com/helpcenter/stable/ru/fmod-electricity-rlc-assemblies/wye-connected-load.html (accessed on August 30, 2025).

15. Engee Documentation. Short Circuit (3 Phases). URL: https://engee.com/helpcenter/stable/ru/fmod-electricity-utilities/fault-three-phase.html (accessed on August 30, 2025).

16. Vinogradova A.V., Vinogradov A.V. Analysis of Planned and Emergency Outages in 0.4 kV Rural Electric Networks // Electrical Technologies and Electrical Equipment in the Agro-Industrial Complex. 2024. Vol. 71, No. 3 (56). pp. 44-51. DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-3-44-51. EDN: VRFTOI.

17. Vinogradova A.V., Vinogradov A.V., Bukreev A.V. Specific reliability indicators of 0.4 kV electrical networks // Agroinzheneriya. 2024. Vol. 26, No. 6. pp. 77-85. DOI 10.26897/2687-1149-2024-6-77-85. EDN: AZEIQF.

18. Vinogradova A.V. Analytical indicators of the dynamics of technological violations of 0.4-110 kV overhead lines // Agrotechnics and energy supply. 2025. No. 1 (46). pp. 4-11. EDN: VJAWVD.

19. Vinogradova, A.V. Causes of outages in rural electrical networks and their structuring // Agrotechnics and energy supply. 2024. No. 4 (45). Pp. 12-19. EDN: FYMIMZ.

20. Vinogradova AV Seasonality coefficients for the number and duration of outages in rural electrical networks, taking into account their causes // Agroinzheneriya. 2025. Vol. 27, No. 2. Pp. 92-99. DOI 10.26897/2687-1149-2025-2-92-99. EDN: HNXFHY.

21. Vinogradova AV, Vinogradov AV Systematization of the causes of outages in rural electrical networks // Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. 2025. Vol. 18, No. 1 (84). Pp. 103-111. DOI 10.53914/issn2071-2243_2025_1_103. EDN: LYSOIC.

22. Kovalenko D.V. Operating modes and short circuits in electrical installations // Young scientist. 2016. No. 18 (122). P. 85-87. EDN: WMGYYV.

Александр Александрович Лансберг, младший научный сотрудник лаборатории электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5. lansbergaa@vk.com

STUDYING SHORT-CIRCUITS IN A 0.4 kV ELECTRIC NETWORK USING THE ENGEE SIMULATION ENVIRONMENT

A.A. Lansberg

FGBNU FNAC VIM

Abstract. Modeling is one of the most effective ways to study the operation of technical systems. In recent years, a domestic modeling environment, Engee, has been developed, which is an analogue of MATLAB Simulink. Many scientific papers that use the Engee modeling environment are aimed at studying control processes, mechanization of production and other issues. However, works related to the modeling of electric power systems are absent. In this paper, a study of stable short-circuit modes in a 0.4 kV electric network is implemented. The prototype of the computer model of the 0.4 kV electric network is a 0.4 kV radial transmission line with a length of 1000 meters, made

using uninsulated A-35 wire, connected to a TM-250/10/0.4 kV Y / Yн-0 transformer. Short circuit modeling was implemented at its most remote point at the consumer's input. The simulation time in the Engee environment was set to 0.5 seconds. Current and voltage distribution graphs were obtained for stable fault conditions, consistent with the theory of transient processes in electrical networks. It was found that in single-phase short-circuit mode, the voltage at the fault point is 0 V, and the current in the faulted phase significantly exceeds the currents in the undamaged phases. In two-phase short-circuit mode, the voltages of the faulted phases are half their nominal voltage under load conditions, and the currents in the faulted phases increase significantly. In two-phase short-circuit mode to the neutral conductor, the voltages of the faulted phases at the fault point are 0 V, and the currents in the faulted phases increase significantly. Moreover, in three-phase short-circuit mode, the voltages of the faulted phases at the fault point are 0 V, and the currents increase and have the same values.

Keywords: computer simulation, power line, electrical network, Engee, short circuit.

Alexander Alexandrovich Lansberg, Junior Researcher, Laboratory of Power Supply, Electrical Equipment, and Renewable Energy, Federal Scientific Center for VIM, 109428, Moscow, 1st Institutsky Proezd, Bldg. 5. lansbergaa@vk.com

УДК 621.316.722:621.315.1(1-22)

МЕТОДЫ ПОДДЕРЖАНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

И.О. Голиков

ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

Аннотация. *В статье рассматриваются современные способы и технические средства регулирования напряжения в сельских электрических сетях. Представлен обзор методов, способов и технических средств, включающих изменение коэффициента трансформации трансформаторов под нагрузкой, регулирование потока реактивной мощности с помощью компенсирующих устройств, а также управление нагрузкой и использование дополнительных источников генерации. Рассмотрены варианты систем, позволяющих автоматизировать процессы регулирования и обеспечить стабильность напряжения и в целом способствовать поддержанию качества электроснабжения. Анализируются локальные и централизованные методы, их преимущества и ограничения. Статья может быть полезна специалистам, связанным с энергоснабжением, обслуживанием инженерных систем, заинтересованным в оптимизации работы электрических сетей.*

Ключевые слова: *качество электроэнергии, регулирование напряжения, системы электроснабжения, напряжение, частота, сельские электрические сети, надежность электроснабжения, способы регулирования напряжения.*

Введение. Электрическая энергия является одним из ключевых ресурсов современной цивилизации, обеспечивая функционирование промышленных предприятий, транспортных систем, жилых и коммерческих зданий. Однако её эффективное и безопасное использование напрямую зависит от качества электроэнергии, важнейшим параметром которого является стабильность напряжения. Отклонения напряжения от нормативных значений не только снижают надёжность работы электрооборудования, но и влекут за собой значительные экономические потери: сокращается срок службы приборов, растут затраты на техническое обслуживание, увеличивается риск аварийных отключений и простоев в производстве.

Согласно статье Добрусина Л.Н. "Проблема качества электроэнергии и электросбережения в России» [1], экономический ущерб для России от низкого качества электрической энергии составляет, по минимальной оценке, около 25 миллиардов долларов в год. В этих условиях вопросы регулирования напряжения приобретают особую актуальность.

Ключевым параметром качества электроэнергии, определяющим надежность и эффективность работы электроустановок, является напряжение. Оно должно находиться в допустимых пределах, установленных нормативным документом ГОСТ 32144-2013, или договорными условиями. Регулирование напряжения в электрических сетях – это один из факторов обеспечения эффективности сельхозпроизводства. Именно поэтому необходимо провести анализ основных способов и средств регулирования напряжения в электрических сетях, их принципов действия, преимуществ и области применения, а также роль этих методов в обеспечении устойчивости.

Цель работы заключается в анализе существующих выявлении новых перспективных способов регулирования напряжения в сельских электрических сетях.

Материалы и методы исследования. В качестве материалов использовался литературный обзор. Рассматривались способы и устройства для регулирования напряжения, такие как трансформаторы регулированием без нагрузки (ПБВ), с автоматическими устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), синхронные компенсаторы и линейные регуляторы, регулирование с использованием накопителей электрической энергии, а также использование дополнительных мощностей. Проанализированы методы централизованного и местного регулирования напряжения, варианты стабилизации напряжения, встречного регулирования по изменению нагрузки. Такой подход позволил определить оптимальные способы поддержания напряжения в допустимых пределах с целью улучшения надежности и качества электроснабжения.

Результаты и обсуждение. В настоящее время проблема регулирования напряжения в сельских электрических сетях является одной из основных. Главная причина появления проблемы – нестабильность напряжения, связанная с большой протяжённостью линий, неравномерной нагрузкой и износом питающих силовых трансформаторов, их недостаточной мощностью, вызванной ростом количества потребителей в сельских населенных пунктах.

Проблему, связанную с неравномерной нагрузкой, можно решить путем оптимизации распределения нагрузки по фазам и дальнейшим системным управлением подключением потребителей для уменьшения неравномерности нагрузки [2]. Предложенная мера снижает несимметрию и улучшает стабильность напряжения. Однако она не решает вопроса обеспечения необходимого уровня напряжения в целом ряде случаев, связанных с удалённостью потребителей, заниженным сечением провода линии электропередачи и т.д.

К основным методам регулирования напряжения в электрических сетях можно отнести следующие.

1. Регулирование средствами ПБВ силовых трансформаторов. Главный недостаток применения ПБВ заключается в том, что регулирование производится только при отключенное нагрузке. Это требует отключения потребителей, влекущего за собой ущерб от недоотпуска электроэнергии. К преимуществам метода можно отнести малые затраты в сравнении с использованием регулирования под нагрузкой (РПН), простоту в исполнении и надежность.

2. Регулирование средствами РПН трансформатора. В этом методе регулирование можно осуществлять без снятия нагрузки, но реализация метода значительно дороже, чем применение ПБВ.

При использовании РПН повышается качество регулирования напряжения. Регулирование производится, как правило, в автоматическом режиме при использовании разных способов определения коэффициента регулирования. В частности, известен способ регулирования напряжения электрической подстанции, где регулирование происходит в зависимости от отклонения напряжения вторичной обмотки, заданного значения и измеренное отклонение напряжения первичной обмотки. (Патент SU 782 037 A1 СССР, МПК H02J 3/12, H02P 13/04) [3].

В другом способе при расчете коэффициента регулирования напряжения используются значения фактического напряжения на вторичной обмотке трансформатора и у наиболее удаленного и приближенного потребителей. (Патент RU 2 527 479 Российская Федерация, МПК H02J 3/12) [4].

3. Регулирование посредством применения автотрансформаторов с регулируемыми

обмотками. К достоинствам такого метода регулирования напряжения можно отнести простоту конструкции, высокую эффективность, высокое быстродействие, может осуществлять плавное или ступенчатое регулирование, габаритные размеры меньше, чем у трансформатора. К минусам можно отнести: изнашивание движущийся частей, отсутствие гальванической развязки, требуют более мощной защиты так как при высоких коэффициентах преобразования возможно короткое замыкание, при длительном использовании или вследствие плохого контакта возможен перегрев [5].

4. Применение шунтирующих батарей статических конденсаторов (БСК), представляющих собой набор конденсаторных батарей, которые подключаются параллельно питающей сети. Регулирование в БСК не предусмотрено и работают они только на включение и отключение по мере необходимости. Основная цель устройства - сокращение потерь в электрической сети и небольшой эффект регулирования напряжения. Батарея подключается если необходимо поднять уровень напряжения. К несомненным плюсам можно отнести, то, что в результате эксплуатации БСК наблюдается снижение потерь в электрической сети, обеспечивает высокую скорость и точность регулирования, при этом сама батарея конденсаторов ввиду отсутствия движущихся частей и простоты конструкции обладает большим сроком службы. При этом БСК имеют ряд недостатков: при установке в сеть БСК возможны резонансные явления, требуют дополнительной защиты от перенапряжения, отсутствует автоматические регулирование [6].

5. Применение регулируемых конденсаторных батарей, представляющих устройство, состоящие из нескольких секций конденсаторов, которые можно регулировать в автоматическом режиме, подстраиваясь под изменения в электрической сети. Является более продвинутым и технически сложным вариантом БСК за счет использования средств автоматики (котроллеров). В сравнении с нерегулируемыми БСК имеют преимущество в том, что могут автоматически подстраиваться под изменения электрической сети и за счет средств автоматики производить автоматическую регулировку ввиду этого менее подвержены риску перенапряжений. К недостаткам можно отнести более сложную конструкцию и более высокий риск отказов, так же в момент переключения секций конденсаторов возможны помехи в электрическую сеть [7,8].

6. Применение индуктивных компенсаторов (реакторов). Шунтирующие реакторы – это большие катушки индуктивности, подключаемые в питающую сеть параллельно и предназначенные для поглощения избытка реактивной мощности, в том числе и понижения напряжения. Как правило при необходимости уменьшения напряжения реактор подключается. В некоторых случаях речь может идти о ступенчатом регулировании посредством переключения секций реактора. Реакторы с РПН обладает такой же функциональностью что и шунтирующие реакторы, но за счёт наличия в них устройства РПН обеспечивают более точное и плавное регулирование снижение реактивной мощности и напряжения за счет потребления реактивной мощностью реактором. К главным плюсам использования управляемых реакторов можно отнести то, что они содержат управляющие обмотки способные изменять индуктивность реактора, а также что при использовании реактора стабилизируется напряжение. При применении реакторов с РПН и снижении от 45-55% мощности до номинальной уменьшается диапазон регулирования устройств РПН и при этом происходит их интенсивный износ, приводящий к скорой поломке [9].

7. Применение синхронных компенсаторов (СК). Устройство представляет собой синхронный двигатель, работающий без механической нагрузки. Главная особенность синхронного компенсатора в том, что он может как потреблять, так и выдавать реактивную

мощность. Обычно устанавливается на подстанциях высокого класса напряжения. В настоящее время использование синхронных компенсаторов стало актуально в паре с использованием возобновляемых источников энергии, таких как солнечные панели и ветрогенераторы [10]. Применение СК повышает устойчивость, обеспечивает управление реактивной мощностью и обеспечивает стабильность электросетей с большим количеством возобновляемых источников энергии. К недостаткам можно отнести высокую стоимость и энергозатратность.

8. Применение статических компенсаторов (СТК, устройства FACTS). Flexible Alternating Current Transmission Systems — это общее название для семейства полупроводниковых устройств, предназначенных для динамического управления потоками мощности и регулирования параметров сети [11]. Их основные виды:

- SVC (Static Var Compensator) комбинация шунтирующих конденсаторов и реакторов быстродействие которых обеспечивается работой тиристоров. Использование подобного устройства обеспечивает регулирование напряжения, реактивной мощности и способно сглаживать колебания в электрической сети. Помимо этого, устройство обеспечивает фильтрацию гармоник, производит симметрирование напряжения и не допускает перенапряжения в сети. К минусам стоит отнести тот момент что малоэффективны в сетях низкого напряжения. Как правило SVC компенсаторы применяют для напряжения 3.3кВ и выше [11, 12].

- STATCOM (Static Synchronous Compensator) это дальнейшее развитие статических компенсаторов в основе управления которых идет использование силовой электроники на базе мощных инверторов, применяются IGBT (Инжекционные транзисторы с полевыми эффектами) и GTO (Тиристоры с управляемым отключением). STATCOM обладает быстродействием за счет использования IGBT, но применение ограничено ввиду большой стоимости. Наибольшая эффективность от использования наблюдается в малозагруженных электрических сетях. [11, 13].

Если напряжение в сети меньше допустимого, то статический компенсатор STATCOM работает как батарея конденсаторов и отдает реактивную мощность, тем самым повышая напряжение. В случае, если напряжение в сети высокое, то он работает как реактор и потребляет реактивную мощность.

9. Применение накопителей электрической энергии. Суть регулирования напряжения с помощью накопителей электрической энергии заключается в том, что имеется система, управляющая зарядом и разрядом аккумуляторных батарей, которая с помощью инвертора (DC/AC-преобразователя), использующего широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) под контролем обратной связи выдает в сеть, или потребляет реактивную мощность и напряжение [14].

В настоящее время известен способ и устройство автоматического регулирования напряжения в электрической сети с применением накопителя электроэнергии (Патент № 2767517 С1 Российская Федерация, МПК H02J 3/12, H02J 5/00) суть которого состоит в том, что фиксируется отклонение фазных напряжений в контрольных точках линии и напряжения в точке установки накопителя и в случае выявлении отклонений напряжений больше допустимых пределов и времени отклонения таких превышении, то выдается команда на регулирование напряжения за счет пофазной подачи или потребления мощности накопителем с учетом его состояния заряда [15].

10. Управление нагрузкой и генерацией. Управление нагрузкой - метод регулирования напряжения, основанный на регулировании нагрузки путем отключения или включения

некоторой части потребителей и, так построенный на грамотном планировании и распределении графика их работы. В настоящее время разработана концепция использования современных устройств секционирования в электрических сетях 0,4 кВ, средствами автоматизированных секционирующих пунктов и мультиконтактных коммутационных систем (МКС) [16, 17].

Планирование и распределение графика нагрузок возможно и при использовании методики, позволяющей производить корректировки стоимости электроэнергии в зависимости от качества переданной электроэнергии потребителю. В частности, по необходимости можно управлять нагрузкой путем включения или отключения ряда потребителей посредством электрических счетчиков с коммутационными аппаратами. Соответственно предварительно потребители делятся на виды потребителей, которые определяют тариф. Так же при формировании тарифа можно отнести время работы (день/ вечер/ ночь), мощность и вид потребителя в зависимости от его важности и возможности отключения [18, 19].

11. Частотное регулирование - регулирование мощности потребителей частотными преобразователями. Таковыми потребителями могут выступать устройства на основе асинхронных и синхронных электродвигателей, где снижение мощности не отразится на работе установки: промышленные компрессоры, лифты, системы вентиляции и кондиционирования, холодильные установки, электрический привод насосов. Плюсы регулирования с использованием частотных преобразователей выражены в облегчении пуска электрических двигателей, защите оборудования от скачков напряжения и перегрузок, снижении вибраций, продлении срока службы и увеличении уровня энергосбережения. К минусам можно отнести высокую стоимость и то, что частотное регулирование может вносить высокочастотные помехи в сети и мешать электронике работать в том числе вызывая ложные срабатывания [20].

12. Использование дополнительной мощности - подключение дополнительных мощностей, создаваемых включаемыми или отключаемыми дополнительными генераторами, тем самым изменяя в сети мощность для балансировки напряжения при колебаниях нагрузки. Особо актуально подключение дополнительных генераторов при использовании возобновляемых источников энергии таких как солнечные панели или ветрогенераторы. На полигоне ГНУ ВИЭСХ был проведен эксперимент по генерации энергии от разработанного ветрогенератора в централизованную электрическую сеть. Основной задачей было проверить работоспособность ветрогенератора и выявить недостатки предложенного способа. Эксперимент показал, что все показатели выдаваемой электрической энергии соответствовали расчетным значениям. Подобные решения рекомендованы для тупиковых электрических сетей где наблюдается чаще всего недостаток напряжения. Основными преимуществами использования дополнительных мощностей являются гибкость регулирования мощностей и параметров электрической сети за счет выдачи в них с генерируемой энергии, повышение автономности подключённых потребителей, уменьшение потерь электрической энергии. Из негативных моментов следует отметить что такие генерируемые мощности нуждаются в синхронизации по параметрам с централизованной электрической сетью, стоимость энергии генерируемой возобновляемыми источниками энергии как правило больше, а установки по генерации такой энергии требуют больших капиталовложений [21].

13. Стабилизаторы напряжения

Трансформаторные

- Релейные. Стабилизатор содержащий в своей конструкции трансформатор отпайки

которого переключаются ступенчато с использованием реле. Для данной разновидности стабилизаторов присуща простота конструкции, невысокая стоимость и высокая надежность. Минус релейных стабилизаторов в регулировании напряжения ступенчато. При этом может страдать точность проведенных регулирований.

- Феррорезонасные. Основана работа устройства на резонансе при насыщении магнитопровода вторичной обмотки трансформатора. Обладает быстрой скоростью регулирования. Слабой стороной устройства является его громоздкость, очень низкий КПД, неустойчивость к перегрузкам, узкий диапазон регулирования напряжения, внесение помех в электрическую сеть.

- Электромеханические (сервоприводные) Принцип устройства основан на изменении коэффициента трансформации за счет перемещения по вторичной обмотке тороидального трансформатора щетки приводимой в движении сервоприводом. Обеспечивает плавное регулирование напряжения за счет скользящего контакта. При этом за счет работы сервопривода скорость регулирования снижается, а при регулировании возникает шум.

- Электронные. Отличаются от релейных стабилизаторов тем, что переключение обмоток производится не реле, а тиристорами или семисторами, что дает сравнимо малые размеры, быстроту переключения и гарантирует стабилизацию перепадов напряжения. К минусам относятся высокая стоимость и сложность в ремонте.

Бестрансформаторные (инвенторные) Устройства преобразующие переменный ток в постоянный с последующей генерации переменного напряжения посредством использования ШИМ устройств и стабилизаторов на основе транзисторов. Несомненным преимуществом в сравнении с трансформаторными типами стабилизаторов является меньшие габариты за счет отсутствия трансформатора в конструкции, плавность регулирования и эффективное подавление помех и скачков напряжений при хорошей скорости реагировании. Главный недостаток — это плохая перегрузочная способность и меньшая надежность ввиду сложного устройства стабилизатора [22].

14. Вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ), Пункт автоматического регулирования напряжения (ПАРН). Принципы регулирования основаны как правило на работе автотрансформатора. Производит регулирование напряжения для всех потребителей, подключённых к ЛЭП. Обладает устойчивостью к скачкам напряжения компенсируя несимметрию фазных напряжений, обладает большим сроком эксплуатации, но имеет относительно большие габариты, высокою стоимость и нуждается в отдельном обслуживании [23, 24].

Устройства регулирования напряжения в электрических сетях имеют важное значение для поддержания стабильного и качественного электроснабжения, однако они обладают рядом недостатков, что обосновывает необходимость развития новых методов и устройств регулирования.

Выводы. Проведенный анализ способов и технических средств регулирования напряжения в сельских электрических сетях показал, что существующие способы, хотя и обеспечивают базовый уровень стабильности, но имеют свои технические особенности, которые определяют их плюсы и минусы, а также применимость в тех или иных случаях. Кроме того, в настоящее время растущие требованиями к надежности и качеству электроэнергии связаны с усложнением структуры энергосистем, увеличением доли возобновляемых источников и ростом доли нелинейных нагрузок. Поэтому актуальным направлением остаётся разработка новых, более эффективных методов и устройств регулирования, включая их интеграцию в автоматизированные системы управления. Такой

подход позволит повысить оперативность, точность и адаптивность регулирования, обеспечивая устойчивую и надёжную работу электрических сетей в условиях изменяющихся режимов.

Список использованных источников

1. Добрусин Л.Н. Проблема качества электроэнергии и электросбережения в России // Энергоэксперт. 2008. № 4 (9). С. 30-35.
2. Клименко Ю.А., Преображенский А.П., Чопоров О.Н. Адаптивная система управления для устранения несимметричности нагрузки фаз в трёхфазной сети ВЛ (КЛ) - 0,4 Кв. // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019;7(4). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/KlimenkoSoavtors_4_19_1.pdf DOI: 10.26102/2310- 6018/2019.27.4.015
3. Патент RU 782037 A1, кл. H02J3/12 H02P13/04 Способ регулирования напряжения электрической подстанции / Росман Лев Владимирович; опубл. 23.11.1980.
4. Патент № 2527479 C1 Российская Федерация, МПК H02J 3/12. Способ автоматического регулирования напряжения на электрической подстанции : № 2013122161/07 : заявл. 14.05.2013 : опубл. 10.09.2014 / А.В. Виноградов, И.О. Голиков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Орловский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВПО Орел ГАУ).
5. Сергеенков Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А. Электрические машины: Трансформаторы / Под ред. И.П. Копылова. М.: Высшая школа, 1989. 352 с.
6. Паули В.К., Воротников Р.А. Компенсация реактивной мощности как средство рационального использования электроэнергии. // Энергоэксперт. 2007. №2. С. 31-33.
7. Комолддинов С.С.У., Кодиров А.А.У., Ашуров А.В.У., Тухтасинов С.Х.У. Регулировка изменения напряжения в устройстве автокомпенсации (на примере одной фазы) // Universum: технические науки. 2022. № 5-9(98). С. 49-54.
8. Голиков И.О., Лансберг А.А. Возможности адаптивного регулирования напряжения в сети 0,4 кВ средствами компенсации реактивной мощности // Научный журнал молодых ученых. 2023. № 1(31). С. 55-64. EDN FKKFXV.
9. Лаврентьева Т.О., Петрова М.В. Реактивная мощность. способы ее компенсации // Энергетические и электротехнические системы : Международный сборник научных трудов / Под редакцией С.И. Лукьянова, Е.Г. Нешпоренко. Том Выпуск 4. Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. 2017. С. 47-61. EDN XZGVFZ.
10. Ваник Н.П., Кириченко Д.А. Синхронный компенсатор в адаптивной системе управления двухтрансформаторной подстанцией // Актуальные проблемы энергетики : Материалы 77-й научно-технической конференции студентов и аспирантов. Минск, 01–30 апреля 2021 года. Минск: Белорусский национальный технический университет. 2021. С. 59-62. EDN RJONTJ.
11. Optimal allocation of multi-type FACTS devices in power systems based on power flow entropy, " in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 2, no. 2, pp. 173-180, June 2014, doi: 10.1007/s40565-014-0059-x.
12. Князев В.В., Шварцбург Л.Э. Устройства FACTS в контексте обеспечения энергоэффективности машиностроительных производств // Современная наука: актуальные

проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2025. № 4. С. 96-102. DOI 10.37882/2223-2966.2025.04.22. EDN SFHDAK.

13. Eslami Mahdiyeh, Shareef Hussain, Mohamed Azah, Khajehzadeh Mohammad. (2012). A survey on flexible AC transmission systems (FACTS). Przeglad Elektrotechniczny. 88. 1-11.

14. Виноградов А.В. Лансберг А.А., Голиков И.О. Анализ работы системы накопления электрической энергии с пофазным регулированием напряжения // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 3(48). С. 26-35. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-3-26-35. EDN UEOGYP.

15. Патент № 2767517 C1 Российская Федерация, МПК H02J 3/12, H02J 5/00. Способ и устройство автоматического регулирования напряжения в электрической сети с применением накопителя электроэнергии: № 2021124683 : заявл. 20.08.2021 : опубл. 17.03.2022 / А.В. Виноградов, И.О. Голиков, А.А. Лансберг [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ». EDN ODFZHH.

16. Виноградов А.В., Виноградова А.В., Голиков И.О., Лансберг А.А. Методика выбора мест установки пунктов секционирования и ступенчатого регулирования напряжения // Техника и оборудование для села. 2023. № 5(311). С. 32-37. DOI 10.33267/2072-9642-2023-5-32-37. EDN KOQJBO.

17. Лансберг А.А., Виноградов А.В. Компьютерное моделирование режимов работы электрической сети 0,4 кВ с устройством сетевого секционирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2025. Т. 25, № 2. С. 5-16. DOI 10.14529/power250201. EDN BQXEFC.

18. Карпова Н.А. Игнатьева С.М. Многотарифная система учета электроэнергии как эффективный способ выравнивания нагрузки энергосистемы // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 2. С. 105-110. EDN MOWXBO.

19. Бородин М.В., Виноградов А.В., Большев В.Е. Учет расхода электроэнергии и корректировки стоимости потребленной электроэнергии в зависимости от её качества, источника искажения и времени искажения показателей качества // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 3 (32). С. 330-339.

20. Федорова И.А. Преимущества применения частотно-регулируемых приводов / И. А. Федорова // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития : Материалы международной научно-практической конференции, Красноярск, 20–22 апреля 2021 года. Том 1 Часть 2. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2021. С. 247-249. EDN OWBORK.

21. Гусаров В.А., Лапшин С.А., Харченко В.В. Использование локальной генерации от возобновляемых источников энергии в тупиковых участках протяженных линий электропередачи низкого напряжения. Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2013. № 7 (129). С. 15-18.

22. Извеков Е.А., Мазуха Н.А., Попова Ю.А. Стабилизаторы напряжения. Технологии и перспективы // Теория и практика инновационных технологий в АПК : материалы национальной научно-практической конференции, Воронеж, 01 апреля – 31 2024 года. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2024. С. 161-165. EDN NHBUUG.

23. Сагдиев Р.Р., Воркунов О.В. Применение вольтодобавочных трансформаторов в электрических сетях // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике, Казань, 26–28 ноября 2024 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет. 2025. С. 181-183. EDN KKYSVW.

24. Абдуллазянов Э.Ю. Ахметшин А.Р. Выбор оптимального технического решения для обеспечения нормативного уровня напряжения в распределительных сетях 0,4-10 кВ // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 6(53). С. 113-119. EDN NXNBFJ.

25.

Bibliography

1. Dobrusin L.N. The problem of electric power quality and energy saving in Russia // Energoexpert. 2008. No. 4 (9). P. 30-35.

2. Klimenko Yu.A., Preobrazhensky A.P., Choporov O.N. Adaptive control system for eliminating phase load asymmetry in a three-phase overhead line (CL) - 0.4 kV network // Modeling, optimization and information technology. 2019; 7 (4). Available from: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/KlimenkoSoavtors_4_19_1.pdf DOI: 10.26102/2310- 6018/2019.27.4.015

3. Patent RU 782037 A1, cl. H02J3/12 H02P13/04 Method for regulating voltage of an electrical substation / Lev Vladimirovich Rosman; published 23.11.1980.

4. Patent No. 2527479 C1 Russian Federation, IPC H02J 3/12. Method for automatic voltage regulation at an electrical substation: No. 2013122161/07: declared 14.05.2013: published 10.09.2014 / A.V. Vinogradov, I.O. Golikov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Oryol State Agrarian University" (FGBOU HPE Oryol SAU).

5. Sergeenkov B.N., Kiselev V.M., Akimova N.A. Electrical Machines: Transformers / Ed. I.P. Kopilova. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 352 p.

6. Pauli V.K., Vorotnikov R.A. Reactive power compensation as a means of rational use of electric power. // Energoexpert. 2007. No. 2. Pp. 31-33.

7. Komoldinov S.S.U., Kodirov A.A.U., Ashurov A.V.U., Tukhtasinov S.Kh.U. Voltage change regulation in an automatic compensation device (using the example of one phase) // Universum: technical sciences. 2022. No. 5-9(98). Pp. 49-54.

8. Golikov I.O., Lansberg A.A. Possibilities of adaptive voltage regulation in a 0.4 kV network by means of reactive power compensation // Scientific journal of young scientists. 2023. No. 1(31). P. 55-64. EDN FKKFXV.

9. Lavrentyeva T.O., Petrova M.V. Reactive power. Methods of its compensation // Power and electrical systems: International collection of scientific papers / Edited by S.I. Lukyanov, E.G. Neshporenko. Volume Issue 4. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. 2017. P. 47-61. EDN XZGVFZ.

10. Vanik N.P., Kirichenko D.A. Synchronous compensator in the adaptive control system of a two-transformer substation // Actual problems of power engineering: Proceedings of the 77th scientific and technical conference of students and postgraduates. Minsk, April 1–30, 2021. Minsk: Belarusian National Technical University. 2021. P. 59-62. EDN RJONTJ.

11. Optimal allocation of multi-type FACTS devices in power systems based on power flow entropy, " in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 2, no. 2, pp. 173-180, June 2014, doi: 10.1007/s40565-014-0059-x.

12. Knyazev V.V., Shvartsburg L.E. FACTS devices in the context of ensuring energy efficiency of mechanical engineering production // Modern science: current problems of theory and

practice. Series: Natural and technical sciences. 2025. No. 4. pp. 96-102. DOI 10.37882/2223-2966.2025.04.22. EDN SFHDAK.

13. Eslami Mahdiyeh, Shareef Hussain, Mohamed Azah, Khajehzadeh Mohammad. (2012). A survey on flexible AC transmission systems (FACTS). Przeglad Elektrotechniczny. 88. 1-11.

14. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Golikov I.O. Analysis of the operation of an electric energy storage system with phase-by-phase voltage regulation // Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex. 2022. Vol. 69, No. 3(48). Pp. 26-35. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-3-26-35. EDN UEOGYP.

15. Patent No. 2767517 C1 Russian Federation, IPC H02J 3/12, H02J 5/00. Method and device for automatic voltage regulation in an electric network using an electric energy storage device: No. 2021124683: declared. 08/20/2021: published. 17.03.2022 / A.V. Vinogradov, I.O. Golikov, A.A. Lansberg [et al.]; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agroengineering Center VIM". EDN ODFZHH.

16. Vinogradov A.V., Vinogradova A.V., Golikov I.O., Lansberg A.A. Methodology for selecting locations for installing sectioning and step-by-step voltage regulation points // Machinery and equipment for the village. 2023. No. 5(311). pp. 32-37. DOI 10.33267/2072-9642-2023-5-32-37. EDN KOQJBO.

17. Lansberg A.A., Vinogradov A.V. Computer Simulation of Operating Modes of a 0.4 kV Electric Network with a Network Sectioning Device // Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering. 2025. Vol. 25, No. 2. pp. 5-16. DOI 10.14529/power250201. EDN BQXEFC.

18. Karpova N.A., Ignatyeva S.M. Multi-tariff Electricity Metering System as an Effective Way to Balance the Power System Load // Transactions of Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences. 2019. Vol. 2. pp. 105-110. EDN MOWXBO.

19. Borodin M.V., Vinogradov A.V., Bolshev V.E. Accounting for Electricity Consumption and Adjusting the Cost of Consumed Electricity Depending on Its Quality, the Source of Distortion, and the Distortion Time of Quality Indicators // Innovations in Agriculture. 2019. No. 3 (32). Pp. 330-339.

20. Fedorova I.A. Advantages of Using Variable Frequency Drives / I.A. Fedorova // Science and Education: Experience, Problems, Development Prospects: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, April 20-22, 2021. Volume 1, Part 2. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, 2021. Pp. 247-249. EDN OWBORK.

21. Gusarov V.A., Lapshin S.A., Kharchenko V.V. Use of Local Generation from Renewable Energy Sources in Dead-End Sections of Long Low-Voltage Power Transmission Lines. International Scientific Journal "Alternative Energy and Ecology". 2013. No. 7 (129). P. 15-18.

22. Izvekov E.A., Mazukha N.A., Popova Yu.A. Voltage stabilizers. Technologies and prospects // Theory and practice of innovative technologies in the agro-industrial complex: materials of the national scientific and practical conference, Voronezh, April 01 – 31, 2024. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2024. P. 161-165. EDN NHBUUG.

23. Sagdiev R.R., Vorkunov O.V. Use of booster transformers in electric networks // Dispatching and control in the electric power industry, Kazan, November 26–28, 2024. Kazan: Kazan State Power Engineering University. 2025. P. 181-183. EDN KKYSVW.

24. Abdullazyanov E. Yu. Akhmetshin A. R. Selection of the optimal technical solution to ensure the standard voltage level in 0.4-10 kV distribution networks // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2011. No. 6(53). P. 113-119. EDN NXNBFJ.

Игорь Олегович Голиков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69, e-mail: montazar@rambler.ru

METHODS OF MAINTAINING AND REGULATING VOLTAGE IN RURAL ELECTRIC NETWORKS

I.O. Golikov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Oryol State Agrarian University

Abstract. This article examines modern methods and technical means of regulating voltage in rural electrical grids. It provides an overview of methods, techniques, and technical means, including changing the transformer transformation ratio under load, regulating reactive power flow using compensating devices, as well as load management and the use of additional generation sources. System options for automating regulation processes, ensuring voltage stability, and generally maintaining power supply quality are discussed. Local and centralized methods, their advantages and limitations, are analyzed. This article may be useful to specialists involved in power supply and utility system maintenance interested in optimizing electrical grid operation.

Key words: power quality, voltage regulation, power supply systems, voltage, frequency, rural power grids, power supply reliability, voltage regulation methods.

Igor Olegovich Golikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Oryol State Agrarian University, 69 General Rodin Street, Oryol, 302019.
e-mail: montazar@rambler.ru

УДК 621.313.12:621.3.016.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ УСТРОЙСТВА СИММЕТРИРОВАНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПРИ РАБОТЕ НА ОДНОФАЗНУЮ НАГРУЗКУ

С.В. Крамской[1], А.В. Виноградов[1,2,3], И.В. Поздняков[1]

[1]ФГБОУ ВО Орловский ГАУ
[2]ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
[3]РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева

Аннотация. *Несимметричная нагрузка приводит к механическим вибрациям ротора электрогенератора, его перегреву. В конечном итоге это влечёт за собой сокращение ресурса, или выход из строя электрогенератора. Для снижения несимметрии применяются симметрирующие устройства, рациональное распределение нагрузки между фазами, другие меры. В том числе предлагаются способы и устройства мониторинга загрузки генератора для своевременного реагирования на несимметрию. Все эти меры не лишены недостатков и допускают ту, или иную степень несимметрии. Рассмотрен способ, заключающийся в установке на вводе ЭГ трёхфазного и однофазного инверторных устройств, осуществляющих последовательное преобразование напряжения из трёхфазного переменного сперва в постоянный, а затем в трёхфазный, или однофазный переменный соответственно. Это позволяет при любой несимметрии подключенной нагрузки получать симметричные ток и напряжение на вводе ЭГ. Для частичной реализации способа разработан экспериментальный образец инверторного устройства, обеспечивающего возможность подключения к трёхфазному ЭГ однофазной нагрузки с мощностью, превышающей допустимую на одну фазу, или даже сопоставимой с трёхфазной мощностью ЭГ. Проведены предварительные лабораторные испытания устройства, которые подтвердили его функциональность и показали высокие значения КПД, достигающие более 95%.*

Ключевые слова: *электрогенератор, устройство симметрирования, выдача всей мощности на однофазную нагрузку, работа на однофазную нагрузку, инвертор, ресурс электрогенератора.*

Введение. В сельском хозяйстве эксплуатируется большое количество электрогенераторов (ЭГ) малой мощности. Их применение обосновано, в первую очередь для резервного, а иногда и для основного электроснабжения сельских потребителей [1]. Работа при несимметричной нагрузке вызывает вибрацию ротора электрогенератора и его перегрев [2]. Электрогенераторы небольшой мощности не оснащаются защитами непосредственно от несимметричных нагрузочных режимов [3-6].

Снижение несимметрии нагрузки её перераспределением по фазам не всегда возможно. В сельском хозяйстве имеется достаточно большое число однофазных нагрузок, которые невозможно равномерно подключить к разным фазам [6-8].

В работах [9-11] приводятся разработки, направленные на создание средств мониторинга загрузки ЭГ, позволяющих упростить задачу перераспределения нагрузки. Но и они не всегда могут способствовать снижению несимметрии в достаточной степени.

Существует ряд решений по симметрированию токов и напряжений. Это, например, применение фильтров последовательной компенсации [12-15], использование преобразователей напряжения [16].

Разработка новых способов снижения несимметрии токов и напряжений при питании нагрузки от ЭГ является актуальной задачей, как и задача обеспечения возможности подключения к ЭГ однофазной нагрузки, превышающей его допустимую нагрузку на фазу, что отмечается в [6].

Цель работы заключается в разработке и предварительных лабораторных испытаниях экспериментального образца устройства симметрирования токов и напряжений ЭГ и обеспечения возможности питания от трёхфазного ЭГ однофазной нагрузки.

Материалы и методы исследования. В [6, 17] приведён способ симметрирования фазных токов и напряжений, выдачи всей мощности генератора на однофазную нагрузку, повышения надёжности питания нагрузок генератора, прототипами которого стали работы [18] и [19, 20].В данном способе трёхфазный переменный ток и напряжение, выдаваемые ЭГ, сначала преобразуют в постоянный ток и напряжение с помощью трёхфазного выпрямителя, после чего вновь преобразуют в переменный ток и напряжение с помощью, или трёхфазного инвертора для питания трёхфазной, в том числе несимметричной нагрузки, или с помощью однофазного инвертора для питания однофазной нагрузки с мощностью, сопоставимой с трёхфазной мощностью ЭГ [6, 17].

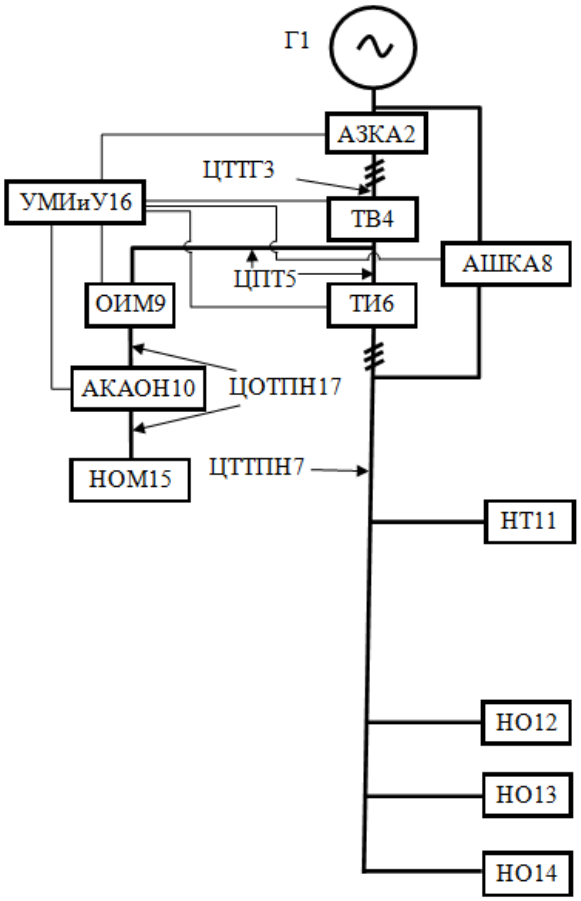


Рисунок 1 – Структурная схема устройства реализации способа симметрирования фазных токов и напряжений и выдачи всей мощности генератора на однофазную нагрузку [6, 17]

На рисунке 1 показана структурная схема реализации рассмотренного способа. Структурная схема содержит: генератор Г1; защитный коммутационный аппарат АЗКА2; цепь

трёхфазного тока генератора ЦТТГ2; трёхфазный выпрямитель ТВ4; цепь постоянного тока ЦТП5; трёхфазный инвертор ТИ6; цепь трёхфазного тока питания нагрузки ЦТТПН7; автоматический шунтирующий коммутационный аппарат АШКА8; однофазный инвертор с выдаваемой мощностью, сопоставимой с мощностью генератора ОИМ9; автоматический коммутационный аппарат однофазной нагрузки АКАОН10; нагрузка трёхфазная НТ11; нагрузки однофазные НО12-НО4; однофазная нагрузка с мощностью, сопоставимой с мощностью генератора НОМ 15; устройство мониторинга, информирования и управления УМИиУ16; цепь однофазного тока питания нагрузки ЦОТПН17 [6, 17].

Подробно работа схемы описана в [6, 17].

Разработан экспериментальный образец устройства, реализующего часть указанного выше способа, а именно возможность выдачи мощности трёхфазного ЭГ на однофазную нагрузку. Такое устройство (назовём его устройством выдачи мощности на однофазную нагрузку, или УВМОН) может разрабатываться для выдачи всей мощности ЭГ на однофазную нагрузку, или такой мощности, которая превышает допустимую однофазную нагрузку ЭГ. Устройство может использоваться как для ЭГ, так и для других источников электроснабжения, имеющих ограничения по выдаваемой однофазной мощности.

Результаты и обсуждение. Структурная схема УВМОН показана на рисунке 2. Номинальная мощность экспериментального образца составляет 1 кВт. Образец создан для исследования функциональных возможностей УВМОН и определения ряда его технических характеристик.

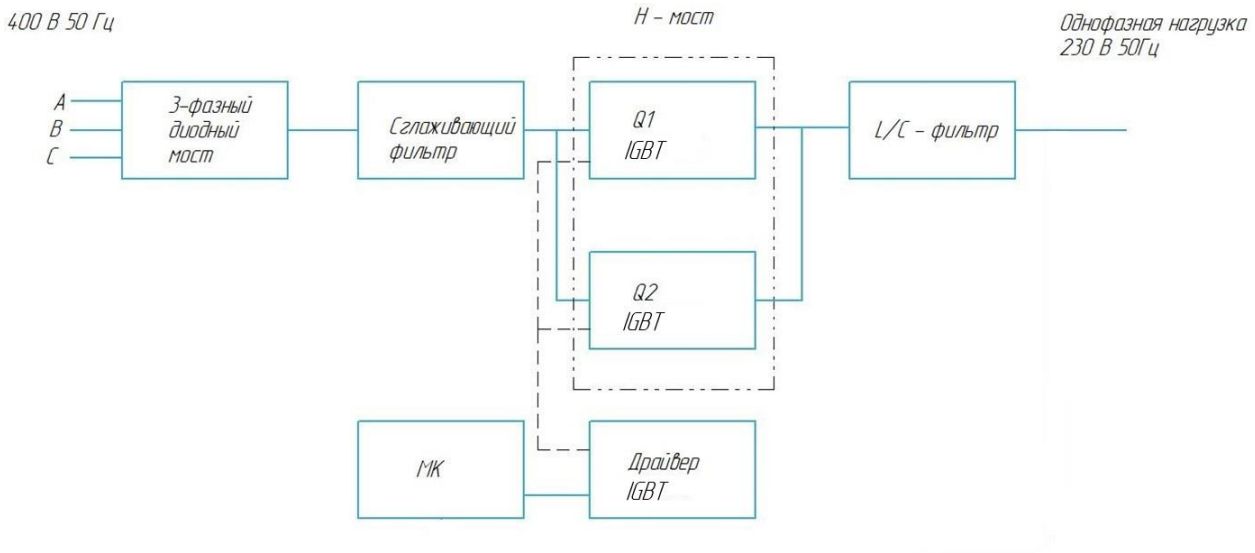


Рисунок 2 – Структурная схема УВМОН

Внешний вид экспериментального образца устройства приведен на рисунке 3.

Устройство состоит из следующих ключевых узлов. Трехфазный диодный мост, преобразующий трехфазное напряжение 380 В, 50 Гц в выпрямленное пульсирующее напряжение с частотой 300 Гц, пиковым напряжением 540 В. Звено постоянного тока, содержащее в том числе 2 последовательно соединенных конденсатора (1000 мкФ, 400 В), применяемых для подавления пульсации выпрямленного напряжения, представляет собой сглаживающий фильтр и обеспечивает стабильное питание инвертора.

Инвертор, построенный на IGBT-ключах и включающий в себя Н-мост на 4 мощных транзисторах IKW40N120H3 (1200 В, 40 А), драйвер управления HCPL-3120 с гальванической развязкой для реализации синусоидального ШИМ (SPWM) с частотой 10 кГц. Также

содержится микроконтроллер (МК) для реализации управляющего ШИМ и обратной связи для контроля перенапряжений, заданий параметров управления и защиты.

Выходной LC-фильтр состоящий из дросселя 3 мГн (ферритовый сердечник) и конденсатора 33 мкФ, 450 В с частотой среза 500 Гц служит для подавления высокочастотных компонентов ШИМ.

Схема инверторного преобразователя, состоящая из трехфазного диодного моста, звена постоянного тока и однофазного инвертора на IGBT-ключах с выходным LC-фильтром позволяет получить высокий КПД устройства (в теории до 96%), его компактные размеры и возможность точного регулирования выходных параметров.

Изготовлен экспериментальный образец УВМОН, внешний вид которого (без корпуса) показан на рисунке 3.

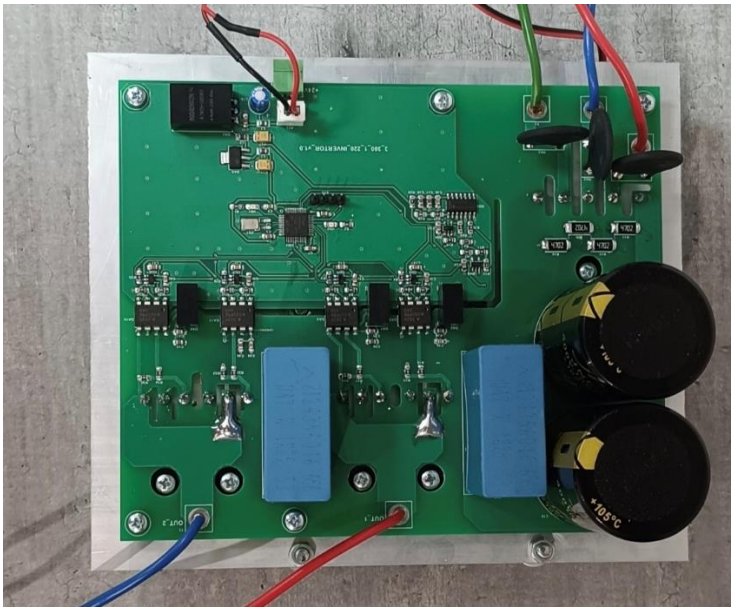


Рисунок 3 – Внешний вид экспериментального образца УВМОН

Выполнены предварительные лабораторные испытания устройства с целью подтвердить функциональные характеристики и получить значения КПД в разных режимах работы. В ходе испытаний от трёх фаз ЭГ подавалось напряжение только на однофазную нагрузку, подключенную через УВМОН. Устройство устойчиво симметрировало фазные токи и напряжения на вводе ЭГ. Создавалась равномерная загрузка по фазам, контролировалась адекватность показаний на устройствах контроля и измерений с выдачей мощности генератора на однофазную нагрузку.

В процессе испытаний получены значения КПД УВМОН, они указаны в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные значения КПД устройства УВМОН

№ п/п	Мощность на вводе ЭГ, кВт	Мощность на нагрузке, кВт	КПД, %
1	0,110	0,1	91,2
2	0,316	0,3	94,8
3	0,522	0,5	95,7
4	0,735	0,7	95,2
5	1,066	1,0	93,8

КПД устройства изменялось в пределах от 91,2 до 95,7%, подтверждая достаточно высокие показатели выбранной структурной схемы. Наибольшие значения КПД получены в режимах с нагрузкой, составляющей 50-70% от расчётной мощности устройства. При работе на расчётной мощности, 1 кВт, КПД составил 93,8%.

Выводы. Задача симметрирования токов и напряжений на вводе трёхфазного ЭГ при работе с несбалансированной по фазам нагрузкой может решаться разными способами, среди которых распределение нагрузки по фазам, применение устройств симметрирования нагрузки. Одним из эффективных является способ, заключающийся в установке на вводе ЭГ трёхфазного и однофазного инверторных устройств, осуществляющих последовательное преобразование тока из трёхфазного переменного сперва в постоянный, а затем в трёхфазный, или однофазный переменный соответственно. Это позволяет при любой несимметрии подключенной нагрузки получать симметричные ток и напряжение на вводе ЭГ.

Разработан экспериментальный образец инверторного устройства УВМОН, обеспечивающего возможность подключения к трёхфазному ЭГ однофазной нагрузки с мощностью, превышающей допустимую на одну фазу, или даже сопоставимой с трёхфазной мощностью ЭГ. Предварительные лабораторные испытания УВМОН подтвердили его функциональность для симметрирования нагрузки ЭГ и показали высокие значения КПД, достигающие более 95% при работе устройства с нагрузкой 50-70% от расчётной. Дальнейшие разработки направлены на повышение мощности устройства и улучшение его характеристик.

Список использованных источников

1. Шатилов В.О., Бизов А.В., Валгуцков М.А., Кириченко А.О., Громов А.А. Современные российские программные среды для моделирования сложных технических систем // Военное обозрение. 2025. №1(25). С. 107-112. EDN: AKLBXC.
2. Назаренко Ю.В., Коняев Н.В., Шкабенко А.Ю., Гилюк А.А. Обоснование использования альтернативного электроснабжения для крестьянско-фермерских хозяйств // Региональный вестник. 2018. Т. 1, С. 5-7. EDN: UQXDFM.
3. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Влияние несимметричной нагрузки на работу турбогенераторов установок распределенной генерации // Системы Методы Технологии. 2016. Т. 3, № 31. С. 85–93. EDN: XQSNZJ.
4. Mamcarz D., Albrechtowicz P., Radwan-Pragłowska N., Rozegnał B. The Analysis of the Symmetrical Short-Circuit Currents in Backup Power Supply Systems with Low-Power Synchronous Generators. Energies. 2020. T.13. №17. C. 4474; DOI: 10.3390/en13174474.
5. Ludwinek K., Szczepanik J., Sułowicz M. Experimental analysis of assessing of the tripping effectiveness of miniature circuit breakers in an electrical installation fed from a synchronous generator set // Electric Power Systems Research. 2017. T. 142. C. 341–350. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.09.028.
6. Виноградов А.В. Большев В.Е., Крамской С.В. Способ симметрирования фазных токов и напряжений и выдачи всей мощности генератора на однофазную нагрузку // Техника и оборудование для села. 2024. № 12(330). С. 37-40. DOI 10.33267/2072-9642-2024-12-37-40. EDN FYZGKX.
7. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Голиков И.О. Анализ работы системы накопления электрической энергии с пофазным регулированием напряжения // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 3(48). С. 26-35. DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-3-26-35.

8. Дмитриев В.Н., Милашкина О.В., Борисов И.А. Применение симметрирующих устройств для повышения качества электроэнергии автономных источников // Известия высших учебных заведений Проблемы энергетики. 2009 Т. 3-4. С.59-64. EDN: KUVYZJ.

9. Виноградов А.В., Большев В.Е., Крамской С.В. Структурная схема и алгоритм работы устройства мониторинга и контроля пофазной загрузки электрогенераторов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71, № 4(57). С. 49-54. DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-4-49-54. EDN WRAOVY.

10. Попрядухин Е.В., Крамской С.В., Панфилов А.А., Виноградов А.В. Функциональные и основные технические требования к устройству индикации пофазной нагрузки и перегрузки электрогенератора // Агротехника и энергообеспечение. 2024. N4 (45). С. 50-56.

11. Виноградов А.В., Большев В.Е., Виноградова А.В. [и др.]. Новые решения для сельских электрических сетей: управление конфигурацией. Сокращение потерь. Обеспечение наблюдаемости. Орёл: ООО Полиграфическая фирма «Картуш». 2024. 236 с. EDN HXSZKQ.

12. Давлетов Б.Б. Особенности синхронных двигателей. синхронные компенсаторы // Развитие и актуальные вопросы современной науки. 2017. Т. 7, № 7. С. 38–40. EDN: YOCEUA.

13. Graovac D., Katić V.A., Rufer A. Power quality problems compensation with universal power quality conditioning system // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. Т. 22, № 2. С. 968–976. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.883027.

14. Swain S.D., Ray P.K., Mohanty K.B. Improvement of Power Quality Using a Robust Hybrid Series Active Power Filter // IEEE Trans Power Electron. 2017. Т. 32, № 5. С. 3490–3498. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2586525.

15. Ali M., Laboure E., Costa F. Integrated active filter for differential-mode noise suppression // IEEE Trans Power Electron. 2014. Т. 29, № 3. С. 1053–1057. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2276396.

16. Cheng P.T., Chen C.A., Lee T.L., Kuo S.Y. A cooperative imbalance compensation method for distributed-generation interface converters // IEEE Trans Ind Appl. 2009. Т. 45, № 2 С. 805–815. DOI: 10.1109/TIA.2009.2013601.

17. Патент № 2831133 C1 Российская Федерация, МПК H02J 3/26. Способ симметрирования фазных токов и напряжений, выдачи всей мощности генератора на однофазную нагрузку, повышения надёжности питания нагрузок генератора: № 2024109660: заявл. 10.04.2024: опубл. 02.12.2024 / А. В. Виноградов, С. В. Крамской, А. В. Виноградова, А. В. Букреев; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ». EDN EEWQCB.

18. Патент № 2598760 Российская Федерация, МПК H02J 3/26 (2006.01). Способ симметрирования фазных токов трёхфазной четырёхпроводной линии и устройство для его осуществления. Заявл. 30.03.2015, опубл. 27.09.2016. Бюл. № 27 / Самокиш В.В. // заявитель Самокиш В.В.

19. Мацкевич М.О. Организационные мероприятия по снижению технических потерь электроэнергии в сельских электрических сетях // Актуальные проблемы энергетики. СНТК - 74. – С. 367-368.

20. Патент RU 2516461 C2, Российская Федерация, МПК H02H 7/09 (2006.01). Устройствосимметрированиянеполнофазныхрежимовналинии10 кВ дляудаленныхпотребителей. Заявл. 10.08.2012, опубл. 20.05.2014. Бюл. № 14. / Таранов М.А., Корчагин П.Т. // заявитель ФГБОУ ВПО АЧГАА.

21.

Bibliography

1. Shatilov V.O., Bizov A.V., Valgutskov M.A., Kirichenko A.O., Gromov A.A. Modern Russian software environments for modeling complex technical systems // Military Review. 2025. No. 1 (25). Pp. 107-112. EDN: AKLBXC.
2. Nazarenko Yu.V., Konyaev N.V., Shkabenko A.Yu., Gilyuk A.A. Justification for the use of alternative power supply for peasant farms // Regional Bulletin. 2018. Vol. 1, pp. 5-7. EDN: UQXDFM.
3. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. The influence of asymmetric load on the operation of turbogenerators of distributed generation units // Systems, Methods, Technologies. 2016. T. 3, no. 31. pp. 85–93. EDN: XQSNZJ.
4. Mamcarz D., Albrechtowicz P., Radwan-Pragłowska N., Rozegnał B. The Analysis of the Symmetrical Short-Circuit Currents in Backup Power Supply Systems with Low-Power Synchronous Generators. Energies. 2020. T.13. №17. C. 4474; DOI: 10.3390/en13174474.
5. Ludwinek K., Szczepanik J., Sułowicz M. Experimental analysis of assessing of the tripping effectiveness of miniature circuit breakers in an electrical installation fed from a synchronous generator set // Electric Power Systems Research. 2017. T. 142. C. 341–350. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.09.028.
6. Vinogradov AV, Bolshev VE, Kramskoy SV Method of balancing phase currents and voltages and delivering all generator power to a single-phase load // Machinery and equipment for the village. 2024. No. 12(330). Pp. 37-40. DOI 10.33267/2072-9642-2024-12-37-40. EDN FYZGKX.
7. Vinogradov AV, Lansberg AA, Golikov IO Analysis of the operation of an electrical energy storage system with phase-by-phase voltage regulation // Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex. 2022. Vol. 69, No. 3(48). Pp. 26-35. DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-3-26-35.
8. Dmitriev V.N., Milashkina O.V., Borisov I.A. Application of Balancing Devices to Improve the Quality of Electric Power from Autonomous Sources // Bulletin of Higher Educational Institutions Problems of Power Engineering. 2009. Vol. 3-4. Pp. 59-64. EDN: KUVYZJ.
9. Vinogradov A.V., Bolshev V.E., Kramskoy S.V. Structural Diagram and Operating Algorithm of a Device for Monitoring and Control of Phase-by-Phase Loading of Electric Generators // Electrical Technologies and Electrical Equipment in the AIC. 2024. Vol. 71, No. 4(57). Pp. 49-54. DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-4-49-54. EDN WRAOVY.
10. Popryadukhin E.V., Kramskoy S.V., Panfilov A.A., Vinogradov A.V. Functional and basic technical requirements for the device for indicating phase load and overload of an electric generator // Agrotechnics and energy supply. 2024. N4 (45). Pp. 50-56.
11. Vinogradov A.V., Bolshev V.E., Vinogradova A.V. [et al.]. New solutions for rural electric networks: configuration management. Loss reduction. Ensuring observability. Orel: OOO Printing firm "Kartush". 2024. 236 p. EDN HXSZKQ.
12. Davletov B.B. Features of synchronous motors. Synchronous compensators // Development and current issues of modern science. 2017. Vol. 7, No. 7. Pp. 38–40. EDN: YOCEUA.
13. Graovac D., Katić V.A., Rufer A. Power quality problems compensation with universal power quality conditioning system // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. T. 22, № 2. C. 968–976. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.883027.

14. Swain S.D., Ray P.K., Mohanty K.B. Improvement of Power Quality Using a Robust Hybrid Series Active Power Filter // IEEE Trans Power Electron. 2017. T. 32, № 5. C. 3490–3498. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2586525.

15. Ali M., Laboure E., Costa F. Integrated active filter for differential-mode noise suppression // IEEE Trans Power Electron. 2014. T. 29, № 3. C. 1053–1057. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2276396.

16. Cheng P.T., Chen C.A., Lee T.L., Kuo S.Y. A cooperative imbalance compensation method for distributed-generation interface converters // IEEE Trans Ind Appl. 2009. T. 45, № 2 C. 805–815. DOI: 10.1109/TIA.2009.2013601

17. Patent No. 2831133 C1 Russian Federation, IPC H02J 3/26. Method for balancing phase currents and voltages, delivering all generator power to a single-phase load, and increasing the reliability of generator load power supply: No. 2024109660: declared 10.04.2024: published 02.12.2024 / A. V. Vinogradov, S. V. Kramskoy, A. V. Vinogradova, A. V. Bukreev; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agroengineering Center VIM". EDN EEWQCB.

18. Patent No. 2598760 Russian Federation, IPC H02J 3/26 (2006.01). Method for Balancing Phase Currents of a Three-Phase Four-Wire Line and a Device for Implementing the Same. Claimed 30.03.2015, published 27.09.2016. Bulletin No. 27 / Samokish V.V. // applicant Samokish V.V.

19. Matskevich M.O. Organizational Measures to Reduce Technical Losses of Electric Power in Rural Electric Networks // Actual Problems of Power Engineering. SNTK - 74. - P. 367-368.

20. Patent RU 2516461 C2, Russian Federation, IPC H02H 7/09 (2006.01). Device for Symmetrizing Out-of-Phase Modes on a 10 kV Line for Remote Consumers. Claimed 10.08.2012, published 20.05.2014. Bulletin No. 14. / Taranov M.A., Korchagin P.T. // applicant FGBOU HPE AChGAA.

Сергей Викторович Крамской, аспирант ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69. e-mail: kramskois@gmail.com

Александр Владимирович Виноградов, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 109428 г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5; профессор кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69; профессор кафедры «Электроснабжение и теплоэнергетика», РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 127434, г.Москва, улица Тимирязевская, д.49. Тел. 8(920)2879024 e-mail: winaleksandr@gmail.com

Илья Васильевич Поздняков, аспирант ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д. 69, тел.+79192601672, e-mail: pozdnyakov.200011@mail.ru

EXPERIMENTAL SAMPLE OF A DEVICE FOR SYMMETRING CURRENT AND VOLTAGE OF A LOW-POWER ELECTRIC GENERATOR WHEN OPERATING ON A SINGLE-PHASE LOAD

S.V. Kramskoy[1], A.V. Vinogradov[1,2,3], I.V. Pozdnyakov[1]

[1] Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Oryol State Agrarian University
[2] Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Center for VIM
[3]RGAU-MSHA named after. K.A. Timiryazeva

Abstract. An unbalanced load causes mechanical vibrations in the generator rotor and overheating. Ultimately, this leads to a reduced service life or failure of the generator. Balancing devices, rational load distribution between phases, and other measures are used to reduce unbalance. Methods and devices for monitoring generator load for timely response to unbalance are also proposed. All these measures are not without drawbacks and allow for varying degrees of unbalance. A method is considered that involves installing three-phase and single-phase inverters at the generator input. These inverters sequentially convert voltage from three-phase alternating current (AC) to direct current (DC) and then to three-phase or single-phase AC, respectively. This allows for symmetrical current and voltage at the generator input, regardless of the connected load unbalance. To partially implement the method, an experimental inverter device was developed that enables the connection of a single-phase load to a three-phase generator with a power exceeding the permissible single-phase rating, or even comparable to the generator's three-phase rating. Preliminary laboratory tests of the device were conducted, confirming its functionality and demonstrating high efficiency values reaching over 95%.

Key words: electric generator, balancing device, output of all power to a single-phase load, operation on a single-phase load, inverter, electric generator resource.

Sergey Viktorovich Kramskoy, postgraduate student, Oryol State Agrarian University, 69 General Rodina St., Oryol, 302019. Email: kramskois@gmail.com

Alexander Vladimirovich Vinogradov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Chief Researcher, Laboratory of Power Supply, Electrical Equipment, and Renewable Energy, Federal Scientific Center for VIM, Moscow, 109428; Professor, Department of Power Supply, Oryol State Agricultural University, Oryol, 69 General Rodin Street, Oryol, 302019; Professor, Department of Power Supply and Heat Power Engineering, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, 127434, Timiryazevskaya Street, 49. Tel.: 8(920)2879024 e-mail: winaleksandr@gmail.com;

Ilya Vasilyevich Pozdnyakov, postgraduate student, Oryol State Agrarian University, 69 General Rodina St., Oryol, 302019. General Rodina, 69, tel. +79192601672, e-mail: pozdnyakov.200011@mail.ru

УДК 553.493.34:621.331:330.15(47+57)

ЛИТИЙ КАК ОСНОВА РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ТРАНСПОРТА: ОЦЕНКА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА РОССИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РАЗВИТИЯ

А.И. Богачев

ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ

Аннотация. *В современных условиях центральным звеном энергетического перехода становится литий, приобретающий роль стратегического товара и основы обеспечения национального технологического суверенитета. Применительно к условиям Российской Федерации создание собственной полной цепочки производства литиевой продукции становится условием полноценного развития российской сферы электротранспорта и альтернативной энергетики. Однако проведенный анализ свидетельствует о практически полной зависимости отечественных предприятий по выпуску литиевой продукции полностью зависимы от импортных поставок сырья. Развитие отечественной сферы добычи и переработки лития тормозят высокая себестоимость добычи, необходимость значительных инвестиционных вложений, отсутствие комплексной государственной политики и инструментов поддержки, неразвитость современных промышленных технологий переработки труднообогатимых комплексных руд. В этой связи особую актуальность приобретает проведение комплексной оценки минерально-сырьевой базы лития в России и перспектив ее развития.*

Ключевые слова: *аккумуляторные батареи, запасы, литий, накопители энергии, рудная и гидроминеральная добыча, электротранспорт.*

Введение. Глобальный рынок демонстрирует на протяжении нескольких последних лет устойчивый тренд на повышение спроса на электромобили и применение альтернативных источников энергии, предполагающих использование соответствующих систем накопления энергии. Подтверждением этого выступает тот факт, по данным Международного энергетического агентства доля электромобилей в структуре продаж новых автомобилей в мире выросла с 4,2% в 2020 г. до 20% в 2024 г., к концу 2025 г. прогнозируется, что показатель достигнет 25%, а к 2030 г. – превысит 40% [5]. При этом по информации организации доля возобновляемых источников энергии в общем расширении производственных мощностей по итогам 2024 г. достигла 92,5% против 80% в 2020 г. и 85,8% в 2023 г. [6]. В результате подобных метаморфоз отмечается увеличение потребности в различных критически важных материалах, одним из которых является литий. Данный металл, относимый к категории редкоземельных, применяется для выпуска химических источников тока, аккумуляторных батарей и накопителей энергии, при производстве стекла и керамики, катализаторов, консистентных смазок, в сфере электроники, лазерной техники, ядерной энергетики, металлургии, фармацевтики и других отраслях, что делает его в современных реалиях стратегическим товаром и фактором национальной безопасности и технологического суверенитета. [1]. Основным направление использования лития выступает производство литий-ионных аккумуляторных батарей для электромобилей, а также применение электролитов на его основе в солнечных батареях и системах хранения энергии. Тем самым литий стал

самым востребованным минералом для экологически чистых источников энергии во всем мире. Сегодня мировой рынок лития является одним из наиболее быстро растущих рынков торгуемых на бирже товаров, а глобальный спрос на него за 2018-2024 гг. вырос более чем в 5 раз до 1,4 млн т.

На фоне продолжающегося роста спроса на электромобили и производство систем накопления энергии в среднесрочной перспективе ожидается продолжение тенденции на увеличение потребности в литии, которая к 2030 г. по оценкам австралийского Департамента промышленности, науки и природных ресурсов и российской компании «ВЫГОН Консалтинг» может превысить 3 млн метрических тонн [4, 8]. При этом с высокой долей вероятности в глобальном масштабе будет иметь место дефицит лития, когда величина спроса будет опережать аналогичные значения предложения. Так, на горизонте 2040 г. по оценкам «ВЫГОН Консалтинг дефицит может составить 1,1 млн т, а по прогнозам» Benchmark Mineral Intelligence – 2 млн т [4, 7]. В совокупности это создает возможности для стран с большим литиевым ресурсным потенциалом, в том числе для России.

Материалы и методы исследования. Теоретической и методологической основой исследования послужили труды и экспертные оценки ученых по проблематике развития мирового и отечественного рынка лития. Эмпирическую базу составили статистическая и аналитическая информация Международного энергетического агентства, Геологической службы США, Департамента промышленности, науки и природных ресурсов Австралии, Минприроды России, Федерального агентства по недропользованию, агентства Benchmark Mineral Intelligence, консалтинговой компании *«ВЫГОН Консалтинг»,* мнения экспертов и данные отраслевой и региональной прессы, интернет-сайтов.

В основу исследования легло применение монографического, экономико-статистического, абстрактно-логического, расчетно-конструктивного, графического и экспертного методов.

Целью исследования выступает комплексный анализ ресурсного потенциала российского рынка лития и оценка перспектив его развития для увеличения роли России как поставщика критического ресурса в глобальном масштабе.

Результаты и обсуждение. По данным Геологической службы США (USGS) запасы лития имеются на территории 24 стран, а их общая оценка составляет 105 млн тонн. Промышленная добыча лития в настоящее время ведется на территории 9 стран. При этом на топ-5 стран (Австралия, Чили, Китай, Аргентина и США) приходится порядка 95% всего добываемого в мире лития.

Что касается оценки сырьевой базы лития в России, то по данным Геологической службы США (USGS) прогнозные оценки запасов данного металла составляют 1 млн т, или 1% мировых запасов [8]. Согласно же данным Государственного баланса РФ на 14 месторождениях разведанные балансовые запасы составляют 3,49 млн тонн оксида лития (порядка 1 млн т металла), а еще на 3 объектах они представлены забалансовыми запасами в размере 1,03 млн тонн. Кроме того, в рудах одного техногенного месторождения заключены балансовые запасы в количестве 5,8 тыс. т оксида лития [2]. При почти 4/5 российских запасов лития локализовано на территории Северо-Западного (Кольский полуостров) и Сибирского (Алтай и Саяны) федеральных округов.

Однако, не смотря на наличие существенных запасов лития на территории Российской Федерации, с 1997 г. промышленная добыча металла не осуществляется, а потребность отечественных промышленных мощностей в литиевом сырье из-за высокой себестоимости его добычи полностью покрывается за счет импортных поставок. До 2022 г. основными

поставщиками выступали Аргентина, Боливия, Чили, Китая и США. По итогам 2021 г. суммарная оценка импорта лития в Россию соответствовала 9,8 тыс. т. При этом вследствие ограниченности емкости внутреннего рынка производимая в стране литиевая продукция, в том числе литий-ионные аккумуляторы практически в полном объеме экспортировалась за рубеж.

Ситуация существенно изменилась с началом специальной военной операции на Украине, а поставки литиевого сырья из ведущих стран-производителей существенно сократились или вовсе прекратились. В частности, по итогам 2022 г. импорт лития в Россию сократился до 3,5 тыс. т, а экспорт литиевой продукции из страны упал до 3,93 тыс. т (8,57 тыс. т в 2021 г.). На фоне этого резко обострилась проблема развития собственного производства лития в стране и создания полной цепочки выпуска литиевой продукции. Это нашло отражение на государственном уровне. В результате литий законодательно был признан одним из видов стратегического минерального сырья и внесен в перечень импортозависимых дефицитных видов твердых полезных ископаемых.

Добыча литиевого сырья выступает первичным звеном полноценной цепочки производства соответствующей продукции. Единственным предприятием, осуществляющим промышленную добычу в России, является АО «Мариинский прииск» в Свердловской области, разрабатывающее Малышевское месторождение. Объем добычи по итогам 2023 г. составил 27 т лития, за 2024 г. данные отсутствуют [3].

С целью обеспечения внутренних потребностей в литиевом сырье в Стратегию развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 г. были включены проекты по развитию добычи литиевых руд на пяти месторождениях. Рассмотрим краткую информацию о них.

Колмозерское месторождение расположено в Ловозерском районе Мурманской области и является самым крупным в стране. Запасы лития оцениваются в 844,2 тыс. т. Разработку осуществляет ООО «Полярный литий» (совместное предприятие ПАО «ГМК «Норильский никель» и ГК «Росатом»). Запуск месторождения запланирован на 2026 г., выход на полную проектную мощность – на 2030 г. Планируемый объем выпуска карбоната и гидроксида лития технических сортов оценивается в 45 тыс. т в год.

Полмостундровское месторождение расположено в том же районе Мурманской области и разрабатывается АО «Арктический литий» (совместное предприятие тульского ООО «ТД «Халмек» и красноярского ПАО «Химико-металлургический завод») Запасы лития составляют 350 тыс. т. Полный ввод в действие ГОКа намечен на 2030 г. с объемом выпуска готовой продукции в 18-20 тыс. т в год.

Запасы расположенного в Забайкальском крае Завитинского месторождения составляют порядка 200 тыс. т оксида лития разных категорий и дополнительно 57 тыс. т содержится в отвалах руды. Его разработку осуществляет ООО «Забайкальский литий» (принадлежит ПАО «Химико-металлургический завод»). Величина планируемой добычи оценивается в 50-75 тыс. т сподуменового концентрата в год.

Справедливости ради стоит отметить, что полноценный запуск добычи лития на указанных рудниках требует осуществления существенных инвестиционных вложений в развитие транспортной и энергетической инфраструктуры. Кроме того, он предусматривает длительные сроки ввода в эксплуатацию ГОКов. Конечные же сроки их окупаемости во многом будут зависеть от цен на литий на международном рынке, которые в последние годы характеризуются высокой степенью волатильности.

Перспективными с точки зрения имеющихся запасов литиевого сырья и его добычи также выступают Ковыктинское и Ярактинское месторождения в Иркутской области, где литий

планируют добывать из высокоминерализованных пластовых вод компании ПАО «Газпром» и ООО «Иркутская нефтяная компания» соответственно. Но добыча лития гидроминеральным способом осложняется отсутствуем развитой эффективной технологии промышленного извлечения металла из рассолов, а также высокой стоимостью проведения геологоразведочных работ и осуществления соответствующих экономических расчетов с целью определения выгодности разработки гидроминеральных запасов с точки зрения затрат на выпуск лития.

Освоение других рудных и рассольных месторождений лития на территории Российской Федерации в настоящее время не ведется. Основной причиной подобной ситуации выступает их отдаленность от населенных пунктов и объектов инфраструктуры либо наличие запасов труднообогатимых руд (низкая концентрация лития, наличие трудноотделяемых примесей).

По мнению органов власти, отраслевых экспертов и аналитиков реализация пяти описанных выше проектов в перспективе ближайших 5-10 лет позволит создать мощную базу, способную обеспечить внутренний спрос всех потребителей лития в России и поддержать развивающуюся отечественную промышленность по выпуску литий-ионных аккумуляторов, а также даст возможность наладить экспорт литиевого сырья и литийсодержащей готовой продукции на зарубежные рынки.

Вместе с тем стоит отметить, что для формирования эффективной полной производственной цепочки необходимо объединить усилия как государства, так и бизнеса, научно-исследовательских и образовательных организаций, консалтинговых компаний и других хозяйствующих субъектов в области развития переработки руды, получения гидроксида, карбоната или металлического лития (сфера первого передела), производства анодов, катодов и электролитов (сфера второго передела), выпуска аккумуляторных батарей (сфера третьего передела), систем накопления энергии на их основе и изделий с ними (сфера четвертого передела), а также переработки и утилизации литий-ионных аккумуляторов.

Выводы. В средне- и долгосрочной перспективе стоит ожидать наращивания объемов добычи и переработки лития в нашей стране с приоритетной ориентацией на внутренний рынок. Это позволит создать устойчивую сырьевую базу для отечественной автомобильной, электронной и энергетической отраслей и замещения импортных поставок. Согласно прогнозам ведущих аналитических и консалтинговых агентств внутреннее потребление лития может вырасти к 2030 г. до 20-30 тыс. т. С учетом оценки запасов и величины добычи лития на рудниках и рассольных месторождениях на территории Российской Федерации это позволит не только обеспечить промышленность, но и создаст условия для осуществления экспортных поставок как сырья, так и готовой литиевой продукции за пределы страны. В целом же реальный потенциал производства лития в Российской Федерации будет определяться экономикой реализуемых в стране проектов и их конкурентоспособностью на мировом рынке с учетом существующего спроса и ценовой конъюнктуры.

Важно понимать, что в условиях современной реальности производство лития в России приобретает стратегическое значение с позиций обеспечения независимости промышленного сектора от импортного сырья и развития собственных технологий, становясь фактором национальной безопасности и технологического суверенитета,. По этой причине реализация проектов по добыче и переработке лития в России и выпуск литийсодержащей готовой продукции будет продолжена и получит соответствующую государственную поддержку и подпитку инвестициями со стороны бизнес-структур. Развитие полной цепочки производства литиевой продукции в России в перспективе даст положительный эффект в условиях прогнозируемого на глобальном рынке дефицита лития в скорой перспективе.

Список использованных источников

1. Борисова В.В., Демкина О.В. Формирование бизнес-модели рынка лития // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. №5. Т.7. С.32–43.DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.05.07.004.
2. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году. — М.: РОСНЕДРА, 2024.716 с.
3. Задера С., Тихонов С. Почему Россия, наращивая запасы лития, никак не начнет его промышленную добычу // Российская газета - Федеральный выпуск. 2025. №36(9575).
4. Заруба Е.С., Арифуллин А.М., Зотов Н.Ю. Литий из рассолов: стратегическая опция для российских нефтегазовых компаний в условиях энергоперехода. М.: VYGON Consulting. 2023. 49 с.
5. МЭА оценило перспективы увеличения продаж электромобилей в мире. URL: https://1prime.ru/20250514/mea-857550863.html (дата обращения 05.10.2025).
6. Global Energy Review 2025. International Energy Agency. 2025. 43 p.
7. Lithium deficit threatens EV sales and energy transition. URL: https://commodityinsights.spglobal.com/rs/325-KYL-599/images/CI-ET-1758203_Lithium%20Deficit%20White%20paper.pdf (дата обращения 06.10.2025)
8. Mineral commodity summaries 2024. - U.S. Geological Survey, 2024. 216 p. ISBN 978-1-4113-4544-7.
9. Resources and energy quarterly. – Department of industry, science and resources Australian Government, June 2025. 139 p. ISSN 1839-5007.
10.

Bibliography

1. Borisova V.V., Demkina O.V. Formation of a Business Model for the Lithium Market // Economy and Management: Problems, Solutions. 2024. No. 5. Vol. 7. pp. 32–43. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.05.07.004.
2. State Report on the Status and Use of Mineral Resources of the Russian Federation in 2023. Moscow: ROSNEDRA, 2024, 716 p.
3. Zadera S., Tikhonov S. Why Russia, While Increasing Its Lithium Reserves, Has Not Started Its Industrial Production // Rossiyskaya Gazeta - Federal Issue. 2025. No. 36 (9575).
4. Zaruba E.S., Arifullin A.M., Zotov N.Yu. Lithium from brines: a strategic option for Russian oil and gas companies in the context of the energy transition. Moscow: VYGON Consulting. 2023. 49 p.
5. The IEA assessed the prospects for increasing global electric vehicle sales. URL: https://1prime.ru/20250514/mea-857550863.html (accessed October 5, 2025).
6. Global Energy Review 2025. International Energy Agency. 2025. 43 p.
7. Lithium deficit threatens EV sales and energy transition. URL: https://commodityinsights.spglobal.com/rs/325-KYL-599/images/CI-ET-1758203_Lithium%20Deficit%20White%20paper.pdf (дата обращения 06.10.2025)
8. Mineral commodity summaries 2024. - U.S. Geological Survey, 2024. 216 p. ISBN 978-1-4113-4544-7.
9. Resources and energy quarterly. – Department of industry, science and resources Australian Government, June 2025. 139 p. ISSN 1839-5007.

Александр Иванович Богачев, к.э.н., доцент, ведущий научный сотрудник отдела маркетинга и развития продуктовых рынков ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ, 123007, г. Москва, Хорошевское шоссе, 35, корп. 2, тел. 89202878952, e-mail: bogatchev@inbox.ru

LITHIUM AS A BASIS FOR THE DEVELOPMENT OF TRANSPORT ELECTRIFICATION: ASSESSMENT OF RUSSIA'S RESOURCE POTENTIAL AND ITS DEVELOPMENT PROSPECTS

A.I. Bogachev

FSBSI FSC All-Russian Research Institute of Agricultural Sciences

Abstract. In today's environment, lithium is becoming a central element of the energy transition, playing a strategic role and a foundation for national technological sovereignty. In the context of the Russian Federation, the creation of a domestic, complete lithium production chain is becoming a prerequisite for the full development of the Russian electric transport and alternative energy sectors. However, the analysis reveals that domestic lithium production companies are almost completely dependent on imported raw materials. The development of domestic lithium mining and processing is hampered by high production costs, the need for significant investment, the lack of a comprehensive government policy and support instruments, and the underdevelopment of modern industrial technologies for processing complex refractory ores. In this regard, a comprehensive assessment of Russia's lithium mineral resource base and its development prospects is particularly relevant.

Keywords: batteries, reserves, lithium, energy storage systems, ore and hydromineral mining, electric transport.

Alexander Ivanovich Bogachev, PhD in Economics, Associate Professor, Leading Researcher, Department of Marketing and Development of Food Markets, Federal Scientific Center All-Russian Research Institute of Agricultural Sciences, 35 Khoroshevskoe Shosse, Bldg. 2, Moscow, 123007, tel. 89202878952, e-mail: bogatchev@inbox.ru

УДК 621.865.8

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ РАБОТ

Н.В. Бабоченко[1], В.А. Краснов[1], С.А. Зубрилина[2]

[1]ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет»
[2]МОУ «СШ №77 Кировского района Волгограда»

Аннотация. *В статье рассмотрены конструкционные особенности робота-манипулятора, имеющего несложное исполнение грузонесущего органа, представленного в виде силовых линейных приводов и балки. Базируясь на литературные источники, приведена характеристика имеющихся манипуляторов и роботов-манипуляторов, которые используются при выполнении погрузочно-разгрузочных работ на производстве. Цель работы состоит в обосновании конструктивных особенностей предложенного робота-манипулятора и его области применения. Предметом исследования являлись конструктивные составляющие предложенного робота-манипулятора, оригинальность которого подтверждена заявкой на изобретение и разработанная для него система управления. Конструктивные составляющие предложенного робота-манипулятора просты в изготовлении. Система управления, предложенной конструкции робота-манипулятора, предполагает использование существующих доступных систем компьютерного зрения. Рассмотрена система технического зрения применительно к разработанному роботу-манипулятору, направленная на решение задач позиционирования робота-манипулятора в заданном положении. С этой целью приводится описание блочной системы компьютерного зрения. Компьютерное зрение необходимо для того, чтобы вести захват изображений и анализ. Установлено, что система управления предложенного нами конструктивного исполнения робота-манипулятора решает задачу позиционирования робота-манипулятора в заданном положении, а конструкция, отличающаяся своей простотой в изготовлении, позволит сэкономить материальные ресурсы. Цель искомого управления заключается в одновременной реализации двух задач, а именно, привести робот-манипулятор в заданное положение и погасить скорости в конечном положении. Определено, что использование разработки робота-манипулятора позволит снизить материальные затраты на его изготовление, а так же свести к минимуму возможность ошибок при выполнении работ. Приведены доводы, о целесообразности использования предложенной конструктивной разработки робота-манипулятора с техническим зрением на производстве, с указанием конкретных регионов России.*

Ключевые слова: *датчик, робот-манипулятор, техническое зрение, блок, конструкция, система управления.*

Введение. На данный момент времени все больше становится востребована роботизированная техника и оборудование, выполняющие ряд производственных работ с

наименьшими затратами человеческого труда и могут быть автономным или интегрировано в многофункциональный роботизированный комплекс. В конструкцию роботов всегда входят элементы, позволяющие совершать вращательные или поступательные движения. Причиной внедрения роботизированной техники является необходимость снизить затраты на производстве. Робот-манипулятор – это точное оборудование, используя его удаётся не просто снизить затраты, но и свести к минимуму возможность ошибок. Внедрение современной техники позволяет повысить безопасность условий труда.

С каждым годом роботы-манипуляторы охватывают все большие отрасли производства и на скорость распространения этого оборудования в первую очередь влияет его доступная цена. С учётом значительной экономии, которую гарантирует автоматизация процессов, все вложения абсолютно оправданы. К тому же использование роботов-манипуляторов повышает качество продукции.

Существует множество конструкций роботов-манипуляторов [1-11] и мы в свою очередь хотим представить робот-манипулятор базируемый на известных разработках [1, 2].

Материалы и методы исследования. Предлагаем к рассмотрению конструктивную составляющую робота-манипулятора [3] (рисунок 1).

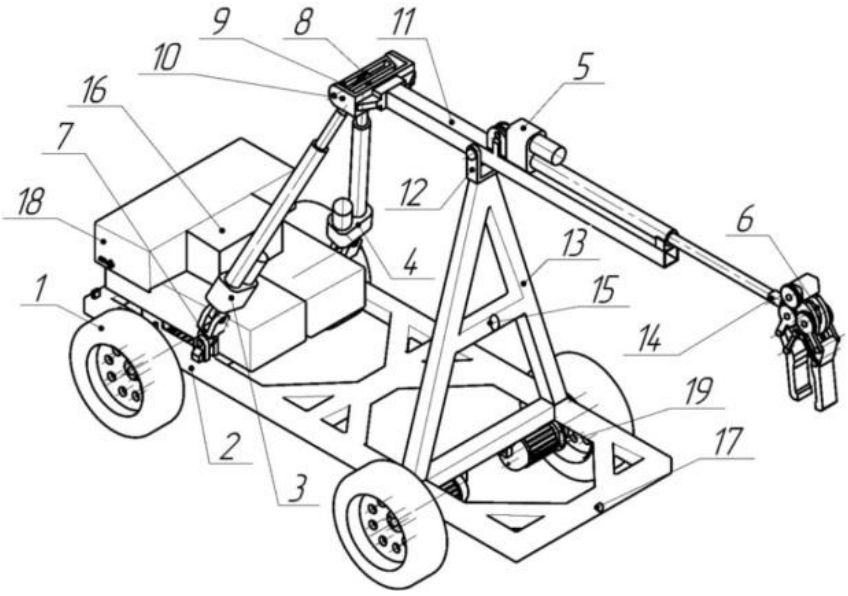


Рисунок 1 – Модель робота-манипулятора

Конструктивно разработка, представленная на рисунке 1, состоит из четырех ведущих колес 1, закрепленных посредством ступицы на электродвигателях 19. Данные электродвигатели жестко закреплены на платформе 2, выполненной из профильной квадратной трубы размерами 80х80х5 (ГОСТ 30245-2003). На платформе расположены исполнительные звенья, выполнение в виде силовых приводов 3, 4, 5 и управляемый грузозахватный орган 6.

Два силовых линейных привода 3, 4 крепятся к основанию 2 самоходного шасси 1 посредством поворотных опор 7, а штоками с наконечниками 8 сходятся в общей точке подвижного крепления 9, которое посредством вилки 10 крепится на оси балки 11.

Для жесткости конструкции, балка 11 опирается посредством опорной вилки 12 на упор 13, соединенные между собой жесткой соединительной планкой. Упор 13 имеет жесткое крепление с поверхностью основания 2. На поверхности балки 11 закреплено основание исполнительного звена выполненного в виде силового линейного привода 5.

Шток упомянутого силового линейного привода 5 наконечником 14 соединен с управляемым грузозахватным органом 6.

На поверхности жесткой соединительной планки упора установлен оптический датчик 15, который передает сигнал на блок управления 16. Блок управления 16 задает величину перемещения силовым линейным приводам 3, 4, 5 и контролирует слаженность их работы.

На поверхности основания 2 в передней части самоходного шасси 1 установлен датчик угла наклона 17, который фиксирует угол наклона самоходного шасси 1 к поверхности земли, по которой перемещается.

Питанием для совместной работы всех органов движения робота манипулятора является аккумуляторная батарея 18 которая располагается в задней части основания 2 для распределения тяжести при подъемах грузов.

Рассмотрим принцип работы робота-манипулятора. Самоходное шасси, перемещающееся по поверхности земли, распознает необходимый объект для выполнения операции его перемещения благодаря оптическому датчику, который передает сигнал на электронный блок управления, а тот задает необходимую величину перемещения штокам силовых линейных приводов и контролирует слаженность их работы совместно с управляемым грузозахватным органом, в виде ножничного захвата, лапы захвата которого в форме ножниц захватывают и перемещает объект в указанное место после получения сигнала от блока управления и передаваемой работы от зацепления зубчатых колес.

Поочередной работой силовых линейных приводов, штоки которых сходятся в шарнире, имеющем три степени свободы, размещенном на оси внутри полого прямоугольного соединения вилки, достигается расширенная зона обслуживания управляемого грузозахватного органа, который представляет собой ножничный захват, состоящий из блока управления, зацепления зубчатых колес и лап захвата в форме ножниц. Работой силового линейного привода, соединенного с управляемым грузозахватным органом достигается регулирование длины выноса лап захвата в форме ножниц. Работой силовых линейных приводов достигается перемещение противовеса на роликовых опорах, размещенных внутри направляющих балок.

Противовес, во избежание переворачивания самоходного шасси, перемещается по поверхности основания на величину, зависящую от массы поднимаемого и перемещаемого грузозахватным органом груза.

На поверхности основания в передней части самоходного шасси установлен датчик угла наклона, который фиксирует угол наклона самоходного шасси к поверхности земли, по которой перемещается. В случае превышения заданного значения угла наклона самоходного шасси к поверхности земли, по которой идет перемещение, от датчика угла наклона передается сигнал на блок управления и движение самоходного шасси останавливается и отдается команда на изменение траектории движения самоходного шасси в сторону от возвышенности, угол подъёма которой превышает заданное значение, чтобы предотвратить опрокидывание робота-манипулятора.

Компьютерное зрение должно вести захват изображений и анализ. Для нас имеет смысл использовать уже существующие доступные системы компьютерного зрения [4]. Среди подобных систем сразу же просится вспомнить одну из самых известных: OpenCV, представляющую собой комплекс алгоритмов для реализации компьютерного зрения. Комплекс представлен модулями с узкоспециализированным функционалом: математического анализа, обработки изображений, графического интерфейса пользователя,

ввода/вывода изображений и видео, ряда других компонентов. Общее количество компонентов превышает 2500, что позволяет решать достаточно сложные задачи.

Искомые управления должны одновременно реализовывать две задачи: привести робот-манипулятор в заданное положение и погасить скорости в конечном положении. Дополнительные ограничения, накладываемые на его движения, позволили найти программные управления, используя принцип максимума Понтрягина [12]. В этом подходе энергии управлений на начальном участке движения используются для разгона робота, а на конечном участке - для его торможения. Сложность построения управлений связана с необходимостью достижения заданного положения. В данной работе предлагается времена разгона и торможения уменьшить. На участках разгона и торможения используются простое программное управление, реализуемое прямоугольными импульсами. На основном участке движения манипуляционный робот движется, используя внутреннюю энергию. Стратегия управления состоит в переводе робота из малой окрестности начального положения в малую окрестность заданного положения за счет его собственной внутренней энергии.

Результаты и обсуждение. Данные от системы технического зрения обрабатываются на микрокомпьютере Raspberry Pi 3 Model B, который основан на процессоре Broadcom BCM2837 с четырьмя 64-битными ядрами ARM Cortex A-53, работающими на частоте 1.2 ГГц; он имеет 1 Гб оперативной памяти, порты USB, RS-232, I2C и GPIO, встроенный блок Wi-Fi. Использование в системе управления микрокомпьютера позволяет реализовать достаточно сложные алгоритмы управления, поддержку WiFi и построить системы технического зрения. Энергопотребление у Raspberry Pi низкое, что очень важно для случая автономной мобильной роботы, и при достаточной производительности радует невысокой ценой.

Система управления работает с исполнительными механизмами системы, представляющей собой три силовых линейных привода, самоходное шасси; осуществляет текущий контроль состояния силовых линейных приводов и самоходное шасси, реализует программно-заданные законы перемещения рабочих органов.

Управление силовыми линейными приводами осуществляется с помощью контроллера положения. Центральным элементом контроллера положения является вычислительное ядро, реализующее функции автоматического управления, на базе микроконтроллера STM32F100RBT6. Возможностей данного микроконтроллера достаточно для реализации вычислений системы автоматического регулирования.

Поддержка работы с сетями WiFi реализована с помощью модуля ESP8266-F12. Данный модуль имеет достаточно обширную систему портов ввода/вывода, и на базе этого модуля можно реализовать контроллер положения, однако внутренне ПО чувствительно к операциям, вносящим задержки в работу стека, и длительные операции неприемлемы (например, обработка массива значений, полученных с АЦП). Поэтому данный модуль занимается только организацией работы с сетью. Взаимодействие с ведущим контроллером осуществляется по интерфейсу USART на скорости 115200 б/с. Непосредственное управление направлением и скоростью движения двигателя с учетом приведенных ранее параметров возложено на двухканальный мостовой усилитель мощности на интегральной схеме VNH3SP30. Мостовой усилитель работает с напряжением в диапазоне 7–36 В, а рабочий ток может достигать 30 А на канал. В схеме реализована защита от подачи высокого напряжения (при уровне напряжения свыше 36 В схема просто отключается), а так-же – защита от перегрева. При длительной работе с током 30 А (около 35 с) защита срабатывает. Мониторинг потребляемого электродвигателем тока осуществляется с помощью датчика ACS712. Принцип его работы основан на эффекте Холла. Максимальный измеряемый ток может достигать 30 А при

напряжении до 354 В постоянного тока, а шаг измерения составляет 66 мВ/А. Гарантированный уровень шума в показаниях составляет 7 мВ, что можно устранить, применив методы фильтрации.

Суммарное пиковое потребление тока основных компонентов системы не превышает 400 мА при напряжении 3,3 В. Для питания от бортовой сети 12 В применен понижающий до 5 В импульсный стабилизатор LM2596, с максимальным выходным током до 3 А. Напряжение 5 В применяется для питания цифровой части энкодеров и дальномеров. Для понижения до 3,3 В применяется линейный стабилизатор AMS1117, с максимальным выходным током до 800 мА.

Выводы. Приведенная конструкторская характеристика робота-манипулятора доказывает, что простота в изготовлении позволит запустить данную конструкцию в производство. За счет использования электродвигателей и аккумуляторных батарей представленная нами в статье разработка сможет похвастаться и своей экологичностью при своей конструктивной простоте. Это значит, что сможет безопасно использоваться в закрытых складских помещениях и на заводах для перемещения тяжелых грузов. Рассматривая возможности представленной нами разработки, отметим, что есть возможность использования в промышленных регионах России таких как, Ленинградской, Самарской, Московской и Нижегородской областях. Так же есть возможность использования, в регионах, где применяют уже беспилотные тракторы, таких как в Краснодарском крае, Ульяновской и Псковской областях.

Список использованных источников

1. Патент на изобретение №2725367. Кран-манипулятор / Н.В. Бабоченко, А.С. Бабоченко, М.А. Бабоченко, Е.А. Кривельская. Опубл. 25.11.2019.
2. Патент изобретение №2833264. Робот-манипулятор/ Н.В. Бабоченко. Опубл. 16.01.2025.
3. Заявка на изобретение № Робот-манипулятор/ В.А. Краснов, Н.В. Бабоченко, Н.С. Воробьева, А.Г. Иванов.
4. Робототехнические манипуляторы с техническим зрением: https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/761588/
5. Бабоченко. *Н.В.* Кинематическая модель роботизированной шарнирно-стержневой стрелы/ Н.В. Бабоченко // Известия Волгоградского государственного технического университета . 2022. № 9 (268). С. 6-12.
6. Остриков И.А. Компьютерное моделирование работы стрелового гидроманипулятора / И. А. Остриков //Наука и молодежь: новые идеи и решения. Материалы XIV Международной научно-практической конференции молодых исследователей: сб. тр. конф. Ч. 5. ВолГау. – Волгоград, 2020. С. 239-241.
7. Фисенко В.С. Программа для определения координат и углов поворотов стрелы робота манипулятора // Лабиринты науки: Материалы I Региональной научно-практической конференции старшеклассников и студентов СПО: сб. тр. конф. ВОЛГАУ. Волгоград, 2018. С. 22–24.
8. Папа Антви-Вилсон. Моделирование кинематики работы шарнирно-стержневого гидроманипулятора // Нива Поволжья. 2020. № 1 (54). С. 127–137.
9. Шойкин А.А., Бабоченко Н.В. Автоматизация шарнирно-стержневого манипулятора // Материалы XXVIII Региональной конференции молодых ученых и исследователей Волгоградской области. Волгоградский ГАУ. Волгоград. 2024.С.169-172.

10. Бабоченко Н.В., Войнаш С.А. Структура силового анализа стрелового грузоподъемного устройства малогабаритного электропогрузчика // Известия тульского государственного университета.. 2024. Выпуск. С.416-420.

11. Pontryagin L.S., Boltyanskii V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. The mathematical theory of optimal processes. Pergamon Press. 1964.

Bibliography

1. Patent for Invention No. 2725367. Crane-Manipulator / N.V. Babochenko, A.S. Babochenko, M.A. Babochenko, E.A. Krivelskaya. Published November 25, 2019.

2. Patent Invention No. 2833264. Robotic Manipulator / N.V. Babochenko. Published January 16, 2025.

3. Invention Application No. Robotic Manipulator / V.A. Krasnov, N.V. Babochenko, N.S. Vorobyova, A.G. Ivanov.

4. Robotic Manipulators with Machine Vision: https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/761588/

5. Babochenko. N.V. Kinematic model of a robotic articulated-rod boom / N.V. Babochenko // Bulletin of the Volgograd State Technical University. 2022. No. 9 (268). Pp. 6-12.

6. Ostrikov I.A. Computer modeling of the boom hydraulic manipulator operation / I.A. Ostrikov // Science and youth: new ideas and solutions. Proceedings of the XIV International scientific and practical conference of young researchers: collection of conf. Part 5. VOLGAU. - Volgograd, 2020. Pp. 239-241.

7. Fisenko V.S. Program for determining the coordinates and rotation angles of the robot manipulator boom // Labyrinths of Science: Proceedings of the I Regional scientific and practical conference of high school and secondary vocational education students: collection of conf. VOLGAU. Volgograd, 2018. Pp. 22–24.

8. Papa Antwi-Wilson. Modeling the kinematics of an articulated-rod hydraulic manipulator // Niva Povolzhya. 2020. No. 1 (54). Pp. 127–137.

9. Shoikin A. A., Babochenko N. V. Automation of an articulated-rod manipulator // Proceedings of the XXVIII Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region. Volgograd State Agrarian University. Volgograd. 2024. Pp. 169–172.

10. Babochenko N. V., Voynash S. A. Structure of the force analysis of the boom lifting device of a small-sized electric forklift // Bulletin of the Tula State University. 2024. Issue. Pp. 416–420.

11. Pontryagin L.S., Boltyanskii V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. The mathematical theory of optimal processes. Pergamon Press. 1964.

Наталья Владимировна Бабоченко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика», Волгоградский государственный аграрный университет, Россия, Волгоград, nat-krivelskoy@mail.ru,

Владислав Андреевич Краснов, аспирант, Волгоградский государственный аграрный университет, Россия, Волгоград, kv1550@mail.ru,

Светлана Александровна Зубрилина, учитель физики МОУ СОШ №77, Россия, г. Волгоград, szubrilina@yandex.ru.

RATIONALE FOR THE DESIGN OF A ROBOT-MANIPULATOR FOR LOADING AND UNLOADING OPERATIONS

N.V. Babochenko[1], V.A. Krasnov[1], S.A. Zubrilina[2]

[1]Volgograd State Agrarian University
[2]Secondary School No. 77, Kirovsky District, Volgograd3

Abstract. This article examines the design features of a robot-manipulator with a simple load-bearing element consisting of linear actuators and a beam. Based on literature sources, the characteristics of existing manipulators and robotic manipulators used in industrial loading and unloading operations are presented. The purpose of this work is to justify the design features of the proposed robot-manipulator and its application areas. The subject of this study was the design components of the proposed robotic manipulator, the originality of which is confirmed by an invention application, and the control system developed for it. The design components of the proposed robotic manipulator are simple to manufacture. The control system of the proposed robotic manipulator design utilizes existing computer vision systems. A computer vision system for the developed robotic manipulator is considered, aimed at solving the problem of positioning the robotic manipulator in a given position. For this purpose, a description of the block computer vision system is provided. Computer vision is necessary for image capture and analysis. It was established that the control system of the proposed robotic manipulator design solves the problem of positioning the robotic manipulator in a given position, and the design, distinguished by its simplicity of manufacture, will save material resources. The goal of the desired control is to simultaneously accomplish two tasks: bringing the robotic manipulator to a given position and damping its speeds in the final position. It was determined that the use of the proposed robotic manipulator will reduce manufacturing costs and minimize the possibility of errors during operation. Arguments are presented for the feasibility of using the proposed robotic manipulator design with machine vision in production, with specific regions of Russia indicated.

Keywords: sensor, robotic manipulator, machine vision, unit, design, control system.

Natalia Vladimirovna Babochenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Volgograd State Agrarian University, Russia, Volgograd, nat-krivelskoy@mail.ru,
Vladislav Andreevich Krasnov, Postgraduate Student, Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russia, kv1550@mail.ru
Svetlana Aleksandrovna Zubrilina, Physics Teacher, Secondary School No. 77, Volgograd, Russia, szubrilina@yandex.ru

УДК 631. 362.6

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАШИН И ТЕХНОЛОГИЙ МОЙКИ КОРНЕКЛУБНЕПЛОДОВ

В.В. Бидогаев[1], С.Н. Шуханов[1], Д.Н. Голубев[2], А.С. Доржиев[3]

[1]ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ им. А.А. Ежевского
[2]ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет
[3]ФГБОУ ВО Бурятская ГСХА им. В.Р. Филиппова

Аннотация. *Разработка перспективных технических средств и технологий механизации сельского хозяйства имеет решающее значение для его поступательного развития. Известно, что подготовка кормов позволяет повысить эффективность их использования, а также продуктивность животноводческой отрасли аграрного производства. Одним из ключевых аспектов при подготовке кормов к скармливанию животным является их мойка, в частности корнеклубнеплодов. Операции, направленные на очистку плодов, предназначенных для поедания сельскохозяйственными животными, интегрированы в технологическую линию по подготовке их к скармливанию. Исходя из осуществленного обзора информации по рассматриваемой теме и анализа способов очистки корнеклубнеплодов, в том числе используемых при этом передовых технических средств, формируется задача по созданию новой машины, отличающейся лучшим конструкторским решением на уровне патентопригодности.*

Ключевые слова: *аграрное производство, машины и технологии, мойка корнеклубнеплодов.*

Введение. Разработка перспективных технических средств и технологий механизации сельского хозяйства имеет решающее значение для его поступательного развития. Выполнению этих задач способствуют исследования аграрных ученых [1-3]. Не представляют собой исключение в этом плане работы, посвященные обработке и переработке возделываемых сельскохозяйственных культур [4-7]. Одним из ключевых аспектов при подготовке корнеклубнеплодов к скармливанию животным является их мойка. Операции, направленные на очистку плодов, предназначенных для поедания сельскохозяйственными животными, интегрированы в технологическую линию по подготовке их к скармливанию.

Известно, что подготовка кормов позволяет повысить эффективность их использования, а также продуктивность животноводческой отрасли аграрного производства. В этой связи совершенствование машин и технологий подготовки кормов имеет особую актуальность [8-20].

Целью исследования является обзор и анализ некоторых вопросов функционирования машин и технологий мойки корнеклубнеплодов для создания перспектив их совершенствования.

Материалы и методы исследования. Обзор литературных источников по изучаемой теме. Осуществление анализа полученного материала с дальнейшим установлением основных аспектов, влияющих на технологический процесс работы технических средств подготовки корнеклубнеплодов, входящих в рацион кормления сельскохозяйственных животных.

Результаты и обсуждение. В результате изучения вопроса очистки корнеклубнеплодов как способа подготовки их к скармливанию установлено, что существует также сухая чистка

плодов, исследованиям которой посвящены работы многих ученых, в частности Дудина В.Г. и Карпова В.В. Они используют механическую очистку, основанную на использовании высокоскоростных вентиляторов и различных типов щеток. Эти методы обеспечивают физическое удаление грязи, однако зачастую не достигают оптимального результата из-за сложности воздействия на все участки корнеклубней [21,22].

Механические способы имеют свои ограничения: они могут повреждать клубни и усугублять их повреждения, снижая тем самым качество продукта [23].

Исследованию рабочих процессов машин, а также очистке плодов с помощью мойки посвящено много работ. Большой интерес представляет диссертация Овчинникова А.А. «Повышение эффективности барабанной корнеклубнемойки обоснованием конструктивно-режимных параметров».

Автором разработана изготовлена установка для мойки корнеклубнеплодов на уровне патентопригодности [24].

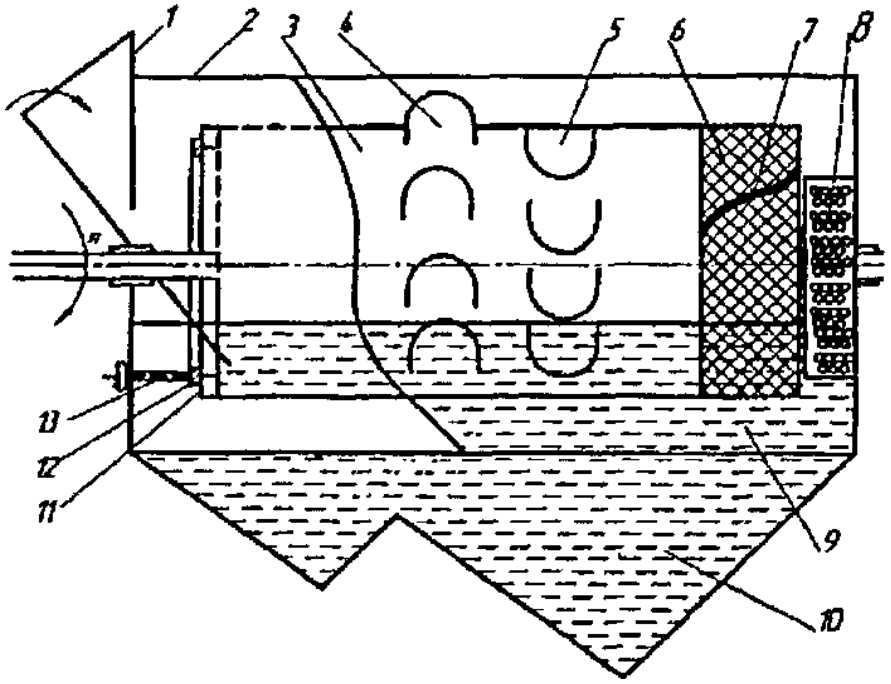


Рисунок 1 – Устройство гидротурбинной корнеклубнемойки барабанного типа
1 - лоток загрузочный; 2 - корпус резервуара; 3 - барабан; 4 - секция нагнетания с ковшами; 5 - секция выбрасывания; 6 - секция обезвоживания; 7 - сбрасыватель корнеплодов; 8 - лоток выгрузной; 9 - вода; 10 - сборник для грязи; 11 - ковши торцевые; 12 - диск; 13 - регулятор

Данный патент лег в основу опытного образца корнеклубнемойки (Рис.1), на которой были проведены экспериментальные исследования для обоснования ее конструктивно-режимных параметров. Также установлены их влияние на производительность, в том числе качественные показатели функционирования технического средства барабанной корнеклубнемойки.

Ключевым недостатком данной разработки является сложность конструкции. Рабочий процесс мойки плодов с помощью барабанной конструкции основан на применении гидротурбинного принципа функционирования. А это существенно усложняет устройство предлагаемой установки. Для ее корректной работы необходима предварительная очистка корнеклубнеплодов от крупных примесей, иначе может произойти поломка машины.

Одним из наиболее значимых трудов по данному направлению исследований является работа Гайворона М.А. Автором разработано техническое устройство для мойки корнеклубнеплодов (патент на полезную модель RU №220548), отличительной особенностью которого является барабан, выполненный в форме эллипса (рис.2). На его основе изготовлен опытный образец для проведения экспериментальных исследований.

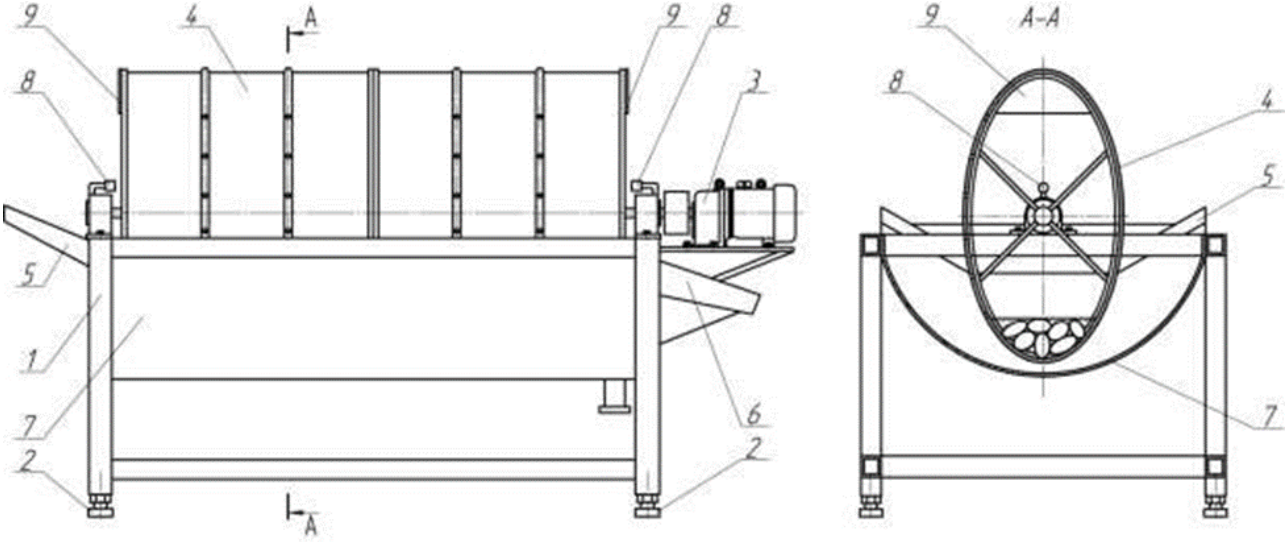


Рисунок 2 - Схема устройства для мойки корнеклубнеплодов:
1 - рама, 2 - опорные ножки, 3 - привод, 4 - эллиптический барабан, 5 - загрузочный лоток, 6 - разгрузочный лоток, 7 - сточный жёлоб, 8 - душевое устройство, 9 – сегменты.

Корректная работа данной установки осуществима только под определенным углом наклона ее оси по длине к горизонтальной линии. Не соблюдение этого условия сопряжено с затрудненным удалением грязи.

Выводы. Выполненный обзор информации по рассматриваемой теме и анализа способов очистки корнеклубнеплодов, позволил установить положительные и отрицательные их стороны. В этой связи возникает необходимость их совершенствования.

Список использованных источников

1. Алтухов С.В., Алтухова Т.А., Шуханов С.Н. Анализ обеспеченности техникой сельскохозяйственных организаций Иркутской области // Известия Международной академии аграрного образования. 2022. № 62. С. 5-8. EDN: QFBTNB

2. Болоев П.А., Бураев М.К., Ямпилов С.С. [и др.] Моделирование систем управления сельскохозяйственной техники // Вестник ВСГУТУ. 2023. № 3 (90). С. 66-72. DOI: 10.53980/24131997_2023_3_66. EDN: RXNHSO.

3. Кокиева Г.Е., Шуханов С.Н., Матвеев И.Н. [и др.] Некоторые вопросы работы почвообрабатывающих машин // Известия Дагестанского ГАУ. 2025. № 1 (25). С. 195-201.DOI: 10.52671/26867591_2025_1_195. EDN: KXOEMP

4. Ямпилов С.С., Цыбенов Ж.Б., Цыдыпов Ц.Ц. Анализ теоретических исследований процесса пневмосепарирования частиц зернового материала // Вестник ВСГТУ. 2009. № 3. С. 39-42. EDN: KVXEUB

5. Ямпилов С.С., Балданов В.Б., Цыдендоржиев Б.Д. [и др.] Математическая модель процесса сепарации зернового материала гравитационным сепаратором // Вестник ВСГУТУ. 2013. № 5 (44). С. 85-90. EDN: REQXTF

6. Алтухова Т.А., Шуханов С.Н. Обзор и анализ исследований охладителей зерна как основа для создания более совершенных машин // Аграрная наука. 2018. № 3. С. 68-69. EDN: YUTRPL.

7. Алтухова Т.А., Алтухов С.В., Шуханов С.Н. Обзор и анализ способов сушки зерна // Известия Международной академии аграрного образования. 2024. № 70. С. 14-18. - EDN: JXQCUD.

8. Балданов М.Б. Исследование процесса измельчения фуражного зерна в молотковых дробилках // В сборнике: Сборник трудов Бурятской государственной сельскохозяйственной академии. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Бурятская ГСХА. Улан-Удэ, 1995. С. 11-17. EDN: QOSQRQ.

9. Балданов М.Б., Шагдыров И.Б., Гармаев Ц.И. [и др.] Выбор конструктивно-технологической схемы измельчителя грубых кормов // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2012. № 1 (26). С. 73-77. EDN: OWDZKP.

10. Сабиев У.К., Лисянов В.В., Гайдай П.А. Обоснование рациональных параметров безводного очистителя корнеклубнеплодов // Техника и оборудование для села. 2014. № 6. С. 14-16. EDN: SFQCPD.

11. Шуханов С.Н., Болоев П.А., Коваливнич В.Д. [и др.] Модернизация технических средств для измельчения корнеклубнеплодов// Аграрная наука. 2015. № 5. С. 30-31.- EDN: TVOVBX.

12. Шагдыров И.Б., Балданов М.Б., Петинова Н.Р. [и др.] Анализ конструктивно-режимных и технологических параметров многоступенчатой дробилки фуражного зерна по степени измельчения // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2015. № 3 (40). С. 95-99. EDN: UHSJYB.

13. Садов В. В., Сорокин С.А. Повышение эффективности молотковой дробилки с вертикальным валом при измельчении зерновых компонентов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 11. С. 86-92. EDN: ZAATXV.

14. Садов В.В., Сорокин С.А. Теоретические предпосылки обоснования разрушения зернового материала разгонным диском в молотковой дробилке // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 2. С. 156-161. EDN: ZGGREE.

15. Шуханов С.Н., Доржиев А.С. Модернизация аппарата для измельчения корнеклубнеплодов // Тракторы и сельхозмашины. 2021. Т. 88. № 2. С. 68-72. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-2-68-72. EDN: MRDXWL.

16. Сабиев У.К., Хузин И.Р. Обоснование конструктивно-режимных параметров безводного очистителя корнеклубнеплодов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 9 (215). С. 114-119. DOI: 10.53083/1996-4277-2022-215-9-114-119. EDN: ZSSERU

17. Садов В. В., Сорокин С.А. Интенсификация процесса смешивания комбикормов в вертикальном шнековом смесителе // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2023. № 4. С. 86-92. EDN: FNOQLR.

18. Шуханов С.Н., Свинцова О.Н., Сухаева А.Р. [и др.] Модернизация аппарата для мойки корнеклубнеплодов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 5 (103). С. 130-134. - EDN: HCSHZX.

19. Доржиев А.С., Голубев Д.Н. Измельчение как один из способов подготовки кормов для животных и птицы // В книге: Актуальные вопросы энергетики и техники в АПК. Материалы заочной научно-практической конференции, посвященной 55-летию

Энергетического факультета Иркутского ГАУ. п. Молодежный, 2024. С. 43-44. EDN: MKORNL.

20. Свинцова О.Н., Шуханов С.Н., Хабардин В.Н. Совершенствование технического устройства для мойки корнеклубнеплодов// Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91. № 1. С. 39-44.DOI: 10.17816/0321-4443-625522. EDN: GWZBOZ.

21. Дудин Владимир Геннадьевич. Совершенствование параметров рабочих органов машины сухой очистки корнеклубнеплодов: автореферат дис... кандидата технических наук: 05.20.01. Киров, 2000. 19 с.

22. Карпов Владислав Викторович. Повышение эффективности технологического процесса подготовки кормовых корнеплодов к скармливанию: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.20.01 / Карпов Владислав Викторович; [Место защиты: Воронеж. гос. аграр. ун-т им. императора Петра I]. Воронеж, 2017. 19 с.

23. Устройство для мойки корнеклубнеплодов. Российский... [Электронный ресурс] // patenton.ru - Режим доступа: https://patenton.ru/patent/ru2783953c1

24. Патент № 70086 Российская Федерация, МПК A23N 15/00 (2206.01). Гидротурбинная корнеклубнемойка / Овчинников А.А., Кузнецов В.А., Овчинников А.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» (RU). - № 2007130965/22; заявл. 13.02.2007; опубл. 20.01.2008. Бюл. № 2.

Bibliography

1. Altukhov S.V., Altukhova T.A., Shukhanov S.N. Analysis of the provision of agricultural organizations in the Irkutsk region with machinery // Bulletin of the International Academy of Agrarian Education. 2022. No. 62. pp. 5-8. EDN: QFBTNB

2. Boloev P.A., Buraev M.K., Yampilov S.S. [et al.] Modeling of agricultural machinery control systems // Bulletin of VSGUTU. 2023. No. 3 (90). pp. 66-72. EDN: RXNHSO DOI: 10.53980/24131997_2023_3_66

3. Kokieva G.E., Shukhanov S.N., Matveev I.N. [et al.] Some issues of tillage machine operation // Bulletin of the Dagestan State Agrarian University. 2025. No. 1 (25). pp. 195-201. – EDN: KXOEMP DOI: 10.52671/26867591_2025_1_195

4. Yampilov S.S., Tsybenov Zh.B., Tsydypov Ts.Ts. Analysis of theoretical studies of the process of pneumatic separation of grain material particles // Bulletin of VSTU. 2009. No. 3. pp. 39-42. EDN: KVXEUB

5. Yampilov S.S., Baldanov V.B., Tsydendorzhiev B.D. [et al.] Mathematical model of the process of separation of grain material by a gravity separator // Bulletin of VSTU. 2013. No. 5 (44). Pp. 85-90. EDN: REQXTF

6. Altukhova T.A., Shukhanov S.N. Review and analysis of grain cooler research as a basis for creating more advanced machines // Agrarian science. 2018. No. 3. Pp. 68-69. - EDN: YUTRPL

7. Altukhova T.A., Altukhov S.V., Shukhanov S.N. Review and analysis of grain drying methods // Bulletin of the International Academy of Agrarian Education. 2024. No. 70. Pp. 14-18. - EDN: JXQCUD

8. Baldanov M.B. Study of the process of grinding feed grain in hammer mills // In the collection: Collection of works of the Buryat State Agricultural Academy. Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Buryat State Agricultural Academy. Ulan-Ude, 1995. pp. 11-17. EDN: QOSQRQ

9. Baldanov MB, Shagdyrov IB, Garmaev TS [et al.] Selection of the design and technological scheme of a roughage chopper // Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov. 2012. No. 1 (26). Pp. 73-77. EDN: OWDZKP

10. Sabiev UK, Lisyanov VV, Gaidai PA Justification of rational parameters of a waterless root crop cleaner // Machinery and equipment for the village. 2014. No. 6. Pp. 14-16. EDN: SFQCPD

11. Shukhanov SN, Boloev PA, Kovalivnich VD [et al.] Modernization of technical means for chopping root crops // Agrarian science. 2015. No. 5. Pp. 30-31.- EDN: TVOVBX

12. Shagdyrov I.B., Baldanov M.B., Petinova N.R. [et al.] Analysis of the design, operating mode and technological parameters of a multi-stage feed grain crusher by the degree of grinding // Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov. 2015. No. 3 (40). Pp. 95-99. EDN: UHSJYB

13. Sadov V.V., Sorokin S.A. Improving the efficiency of a vertical shaft hammer crusher in grinding grain components // Bulletin of the Altai State Agrarian University. - 2018. - No. 11. - Pp. 86-92. EDN: ZAATXV

14. Sadov V.V., Sorokin S.A. Theoretical prerequisites for substantiating the destruction of grain material by a breaker disk in a hammer mill // Bulletin of the Altai State Agrarian University. - 2019. - No. 2. - Pp. 156-161. EDN: ZGGREE

15. Shukhanov S.N., Dorzhiev A.S. Modernization of the apparatus for crushing root crops // Tractors and agricultural machinery. 2021. Vol. 88. No. 2. Pp. 68-72. - EDN: MRDXWL DOI: 10.31992/0321-4443-2021-2-68-72.

16. Sabiev U.K., Khuzin I.R. Substantiation of the design and operating parameters of a waterless root crop cleaner // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2022. No. 9 (215). pp. 114-119. EDN: ZSSERU DOI: 10.53083/1996-4277-2022-215-9-114-119

17. Sadov V. V., Sorokin S. A. Intensification of the process of mixing compound feed in a vertical screw mixer // Bulletin of the Altai State Agrarian University. - 2023. - No. 4. - Pp. 86-92. EDN: FNOQLR

18. Shukhanov S. N., Svintsova O. N., Sukhaeva A. R. [et al.] Modernization of the apparatus for washing root crops // Bulletin of the Orenburg State Agrarian University. 2023. No. 5 (103). Pp. 130-134. - EDN: HCSHZX

19. Dorzhiev A. S., Golubev D. N. Grinding as one of the methods for preparing feed for animals and poultry // In the book: Current issues of energy and technology in the agro-industrial complex. Materials of the correspondence scientific and practical conference dedicated to the 55th anniversary of the Power Engineering Faculty of Irkutsk State Agrarian University. p. Molodezhny, 2024. pp. 43-44. - EDN: MKORNL

20. Svintsova O. N., Shukhanov S. N., Khabardin V. N. Improvement of the technical device for washing root crops// Tractors and agricultural machinery. 2024. Vol. 91. No. 1. pp. 39-44.- EDN: GWZBOZ DOI: 10.17816/0321-4443-625522

21. Dudin, Vladimir Gennadievich. Improvement of the parameters of the working bodies of the machine for dry cleaning of root crops: abstract of the dissertation ... candidate of technical sciences: 05.20.01. - Kirov, 2000. - 19 p.

22. Karpov, Vladislav Viktorovich. Improving the efficiency of the technological process for preparing forage root crops for feeding: Abstract of the dissertation ... candidate of technical sciences: 05.20.01 / Karpov, Vladislav Viktorovich; [Place of protection: Voronezh. state agrarian University named after Emperor Peter the Great]. - Voronezh, 2017. - 19 p.

23. DEVICE FOR WASHING ROOT CROPS. Russian... [Electronic resource] // patenton.ru - Access mode: https://patenton.ru/patent/ru2783953c1

24. Patent No. 70086 Russian Federation, IPC A23N 15/00 (2206.01). Hydroturbine root and tuber washer / Ovchinnikov A.A., Kuznetsov V.A., Ovchinnikov A.A.; applicant and patent holder FSBEI HE "Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov" (RU). - No. 2007130965/22; declared 13.02.2007; published 20.01.2008. Bulletin No. 2.

Валерий Витальевич Бидогаев, аспирант кафедры технического обеспечения АПК ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ им. А.А. Ежевского, 664038 Иркутская обл., п.Молодежный 1/1, vbidogaev25@mail.ru

Станислав Николаевич Шуханов, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технического обеспечения АПК ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ им. А.А. Ежевского, 664038 Иркутская обл., п.Молодежный 1/1 Shuhanov56@mail.ru

Дмитрий Николаевич Голубев, старший преподаватель кафедры технологий, предпринимательства и методики их преподавания ФГБОУ ВО ИГУ, 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1 gdn679@mail.ru

Арсалан Сергеевич Доржиев, ассистент кафедры электрификация и автоматизация сельского хозяйства ФГБОУ ВО Бурятская ГСХА им. В.Р. Филиппова, 670010, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8 ar.s.d@mail.ru

SOME ISSUES OF FUNCTIONING OF ROOT CROPS WASHING MACHINES AND TECHNOLOGIES

V.V. Bidogaev[1], S.N. Shukhanov[1], D.N. Golubev[2], A.S. Dorzhiev[3]

[1]Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky
[2]Irkutsk State University
[3]Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov

Abstract. The development of advanced technical means and technologies for agricultural mechanization is crucial for its progressive development. It is well known that feed preparation improves the efficiency of feed utilization and the productivity of livestock farming. One of the key aspects of feed preparation for animal feeding is washing, particularly root crops. Operations aimed at cleaning fruits intended for consumption by farm animals are integrated into the feeding process. Based on a review of information on the topic and an analysis of root crop cleaning methods, including the advanced technical means used, the task is to create a new machine with the best design solution at the patentability level.

Keywords: agricultural production, machines and technologies, root crop washing.

Valery Vitalyevich Bidogaev, postgraduate student, Department of Technical Support for the Agricultural Industry, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky, 664038, Irkutsk Region, Molodezhny 1/1, vbidogaev25@mail.ru

Stanislav Nikolaevich Shukhanov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Technical Support for the Agricultural Industry, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky, 664038, Irkutsk Region, Molodezhny 1/1, Shuhanov56@mail.ru

Dmitry Nikolaevich Golubev, Senior Lecturer, Department of Technology, Entrepreneurship, and Teaching Methods, Irkutsk State University, 664003, Irkutsk, st. Karl Marx, 1 gdn679@mail.ru
Arsalan Sergeevich Dorzhiev, Assistant Professor, Department of Electrification and Automation of Agriculture, V.R. Filippov Buryat State Agricultural Academy, 670010, Republic of Buryatia, Ulan-Ude, Pushkin Street, 8 ar.s.d@mail.ru

Реклама в нашем журнале

ВНИМАНИЕ!

Редакция **ЖУРНАЛА «АГРОТЕХНИКА И ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ»**
приглашает Вас к сотрудничеству.

Мы предлагаем разместить Вашу рекламу на страницах нашего журнала.
Наши читатели (Россия и зарубежье) — учебные и научные учреждения, предприятия следующих отраслей деятельности:

- сельскохозяйственные предприятия;
- предприятия тяжелой и легкой, перерабатывающей промышленности;
- энергокомпании;
- отраслевые НИИ;
- научно-производственные объединения;
- учебные заведения;
- библиотеки.

Каждый из номеров журнала распространяется более чем 500 адресатам.

Информацию о возможности размещения рекламной продукции и ценах Вы можете узнать в редакции журналов, а также у главного редактора.

Телефоны: 8202879024; 8(4862) 76-44-69.
Тел. (факс): 8(4862) 76-11-07

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – доктор технических наук, доцент
Александр Владимирович Виноградов
E-mail: winaleksandr@yandex.ru

Адрес: 302019, г. Орел, ул. Ген. Родина, 69, Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, факультет агротехники и энергообеспечения, ауд. 2-211.

ФГБОУ ВО «ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.В. ПАРАХИНА»

Отдел сельскохозяйственного консультирования и развития сельских территорий ВНИИ социального развития села ФГБОУ ВО Орловский ГАУ принимает заявки на оказание консультационных услуг по следующим направлениям:

- в области агробизнеса и экологии;
- в области биотехнологий и ветеринарной медицины;
- в области экономики;
- в сфере социального и экономического развития сельских территорий;
- в области агротехники и энергообеспечения;
- в сфере строительства, эксплуатации и управления недвижимостью, ландшафтного дизайна;
- в сфере охраны труда и пожарной безопасности и др.

Более подробная информация об оказываемых услугах размещена на странице отдела по адресу:
http://www.orelsau.ru/science/institute-of-social-development-of-the-village/

Телефон: 8 (4862) 43-30-81
E-mail: vniisrs.orelsau@mail.ru

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ совместно с ФГБОУ ВО Орловским ГАУ
организуют проведение
постоянного научно-практического семинара «Энергообеспечение АПК»

Формат проведения: видеосвязь.
Периодичность: по мере поступления заявок на проведение.
Темы:
-всё, что связано с вопросами энергообеспечения АПК, электротехнологиями и электрооборудованием в АПК;

-вопросы цифровизации и роботизации в АПК и системах его энергообеспечения;

-современное сельскохозяйственное производство, проблемы и пути их решения, новые технологии;

-предварительное обсуждение кандидатских и докторских диссертаций;

-обсуждение совместных проектов, грантов;

- другие тематики.

Для участия, предложения тематики обсуждения:
написать письмо на электронную почту (в названии указать «семинар Энергообеспечение АПК»)
Почта: winaleksandr@gmail.com
Телефон: 89202879024 – Виноградов Александр Владимирович
При поступлении заявки на участие, адрес обратившегося вносится в рассылку и он уведомляется о теме и сроках проведения семинара.

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

ТАЙМЕР-ЭЛЕКТРОСЧЕТЧИК МОБИЛЬНЫЙ ПОРТАТИВНЫЙ С БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ДАННЫХ (ТЭМП-3-W)

TIMER-ELECTRIC METER MOBILE PORTABLE WITH WIRELESS DATA TRANSMISSION (TEMMP-3-W)

Устройство решает следующие задачи:



- осуществление удалённых измерений (передача результатов на сайт. Хранение результатов на карте памяти);
- определение потерь на участках электрической сети;
- сведение энергобалансов по участкам сети;
- оптимизация уставок ПБВ силовых трансформаторов;
- обследование ЛЭП с выявлением причин завышенных потерь, показателей качества электроэнергии;
- энергоаудит сетей и оборудования сельхозпредприятий;
- построение графиков нагрузки, оценка времени наработки оборудования;
- проверка средств релейной защиты и автоматики;
- использование в качестве штатного измерительного прибора;
- оценка потерь электроэнергии в силовых трансформаторах без отключения их от сети и с ранжированием на потери короткого замыкания, нагрузочные потери и потери холостого хода;
- выявление хищений электроэнергии при обходах потребителей, за счет возможности установки устройства до электросчетчика абонента без разрывания электрической цепи и без нарушения её изоляции.

Технические характеристики:

Погрешность измерений: 0 – 1,5%	Диапазон измерения тока: 0 – 400 А (в зависимости от комплектации)
Дальность передачи данных: до 1,5 км	Диапазон измерения напряжения: 0 – 450 В
Время автономных измерений: до 24 ч	Тип аккумуляторной батареи: литий-ионная
Стоимость: 20-30 тыс. руб. (в зависимости от комплектации)	Степень защиты оболочки: IP55

Контактная информация

+79202879024 (Александр Виноградов) schkolamolen@gmail.com

+79536281466 (Алексей Букреев) alexziend@gmail.com

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

ТАЙМЕР-ЭЛЕКТРОСЧЕТЧИК МОБИЛЬНЫЙ ПОРТАТИВНЫЙ ТРЁХФАЗНЫЙ (ТЭМП-3)

TIMER-ELECTRIC METER MOBILE PORTABLE THREE-PHASE (TEMMP-3)

ТЭМП-3 осуществляет:



- учет электроэнергии;
- измерение и архивирование значений времени включенного/отключенного состояния потребителя с фиксацией моментов включения и отключения;
- измерение и архивирование значений потребляемого тока;
- измерение напряжения и архивирование значений напряжения;
- измерение и архивирование максимальных значений потребляемого тока;
- измерение и архивирование максимальных значений потребляемой мощности;
- измерение и архивирование значений потребляемой мощности без измерения значений напряжения;
- измерение и архивирование значений потребляемой мощности с измерением значений напряжения.

ТЭМП-3 может использоваться для:

- сведения энергобалансов по участкам сети;
- энергоаудита сетей и оборудования сельхозпредприятий;
- построения графиков нагрузки, оценки времени наработки оборудования;
- проверки средств релейной защиты и автоматики;
- использования в качестве штатного измерительного прибора;
- выявления хищений электроэнергии при обходах потребителей, за счет возможности установки устройства до электросчетчика абонента без разрывания электрической цепи и без нарушения её изоляции.

Технические характеристики:

Погрешность измерений: 0 – 1,5%	Диапазон измерения тока: 0 – 400 А (в зависимости от комплектации)
Время автономных измерений: 24 ч	Диапазон измерения напряжения: 0 – 450 В
Тип аккумуляторной батареи: литий-ионная	Степень защиты оболочки: IP55

Стоимость: 15-30 тыс. руб.
(в зависимости от комплектации)

Контактная информация

+79202879024
(Александр Виноградов)
schkolamolen@gmail.com

+79536281466
(Алексей Букреев)
alexziend@gmail.com

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
при участии ФГБОУ ВО Орловский ГАУ им. Н.В. Парахина

ПРИБОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4 кВ (КОПиРР)

INSTRUMENT COMPLEX FOR ESTIMATING ELECTRICITY LOSSES AND STUDYING THE OPERATING MODES OF ELECTRICAL NETWORKS 0.4 kW (CELaOM)

Комплекс решает следующие задачи:



- измерение и архивирование потребляемого тока в точках установки датчиков комплекса;
- измерение и архивирование потребляемой мощности в точках установки датчиков комплекса;
- измерение и архивирование потребляемой электроэнергии в точках установки датчиков комплекса;
- измерение и архивирование потребляемой электроэнергии в точках установки датчиков комплекса;
- измерение и архивирование значений напряжений трехфазной сети в точках установки датчиков комплекса;
- фиксация моментов включения и отключения нагрузки на участке сети в точках установки датчиков комплекса;
- дистанционное получение данных о параметрах режимов работы сети с датчиков комплекса через радио-канал;
- синхронизацию по времени измерения между датчиками, входящими в комплекс и привязка к астрономическому времени.

Технические характеристики:

Погрешность измерений: 0 – 1,5%	Диапазон измерения тока: 0 – 400 А (в зависимости от комплектации)
Дальность передачи данных: до 1,5 км	Диапазон измерения напряжения: 0 – 450 В
Время автономных измерений: до 24 ч	Тип аккумуляторной батареи: литий-ионная
Количество точек измерения (кол-во измерительных блоков): до 6	Наличие проколов для изолированных проводов (СИП и тд.)
Стоимость: 80-100 тыс. руб. (в зависимости от комплектации)	Степень защиты оболочки: IP65

Контактная информация

+79202879024 (Александр Виноградов) schkolamolen@gmail.com

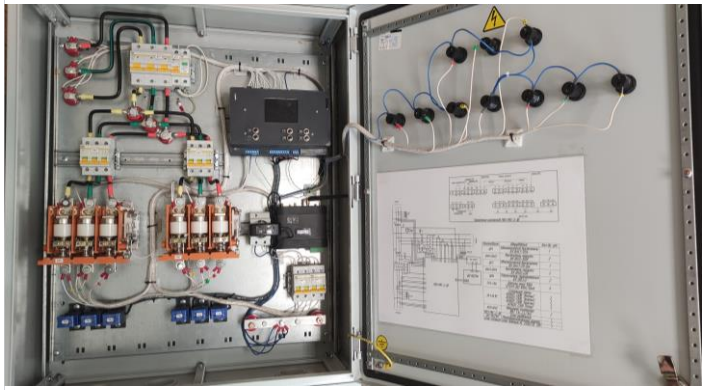
+79536281466 (Алексей Букреев) alexziend@gmail.com

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
при участии
ФГБОУ ВО Орловский ГАУ
им. Н.В. Парахина

МУЛЬТИКОНТАКТНАЯ КОММУТАЦИОННАЯ СИСТЕМА С ДВУМЯ КОНТАКТНЫМИ ГРУППАМИ И ТРЕМЯ ВЫВОДАМИ (МКС-2-3В)

MULTI-CONTACT SWITCHING SYSTEM WITH TWO CONTACT GROUPS AND THREE TERMINALS (MSS-2-3T)

В МКС-2-3В реализованы следующие функции:



- измерение значений токов в магистрали и отпайке ЛЭП;
- измерение значений напряжений на выводах;
- управление двумя независимыми коммутационными аппаратами;
- выполнение функции автоматического повторного включения (АПВ);
- обмен данными по интерфейсу RS-485;
- автоматическое включение/отключение коммутационных аппаратов при появлении/ исчезновении напряжения на вводе;
- автоматическое отключение коммутационных аппаратов при превышении заданных токовых уставок;
- передача данных по протоколу Modbus RTU;
- осуществление сигнализации диспетчеру;
- отображение символьных данных на дисплее контроллера МКС-2-3В;
- запись основных измеренных параметров на внешний накопитель;
- передача данных по протоколу Modbus RTU;
- ручное включение/отключение коммутационных аппаратов с помощью клавиатуры контроллера;
- диспетчерское включение/отключение коммутационных аппаратов;
- ручная и диспетчерская настройка параметров контроллера;
- сохранение значений конфигурационных параметров в энергонезависимой памяти.

Технические характеристики:

Погрешность измерений: 0 – 1,5%	Диапазон измерения тока: 0 – 400 А (в зависимости от комплектации)
Количество контактных групп: 2	Диапазон измерения напряжения: 0 – 270 В
Протокол передачи данных: Modbus RTU	Тип аккумуляторной батареи: литий-ионная
Стоимость: 60-100 тыс. руб. (в зависимости от комплектации)	Время автономной работы контролера:10 ч.

Контактная информация

+79202879024 (Александр Виноградов) schkolamolen@gmail.com

+79536281466 (Алексей Букреев) alexziend@gmail.com