

УДК 621.311

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ
И ПРЕДПРИЯТИЙ АПК**

Сергей Викторович Кириллов^{1, 2}

кандидат технических наук, доцент

kirill_mich@mail.ru

Серк Балтаваевич Мухамбетов³

кандидат технических наук, доцент

mslava5@mail.ru

Владимир Сергеевич Кириллов⁴

студент

¹ Проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре ОАО «РЖД»

г. Москва, Россия

² Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

³ Саратовский государственный технический университет

имени Ю.А. Гагарина

г. Саратов, Россия

⁴ Московский физико-технический институт (национальный

исследовательский университет)

г. Долгопрудный, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы совершенствования системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) оборудования, используемого в электроснабжении сельских поселений и предприятий АПК. На основе действующих нормативных требований (Приказ Минэнерго № 1013) и анализа отраслевых исследований и практического опыта, предложена структура ТОиР,

включающая классификацию видов ремонта, различные виды технического обслуживания, а также современную систему контроля и диагностики. Особое внимание уделено переходу от планово-предупредительного ремонта (ППР) к ремонту по техническому состоянию и внедрению цифровых технологий (беспилотные летательные аппараты, лидары, цифровые двойники) для прогнозирования остаточного ресурса, повышения надёжности электроснабжения и обеспечения качества электрической энергии.

Ключевые слова: техническое обслуживание, ремонт, электроснабжение, АПК, сельские электрические сети, диагностика, беспилотные летательные аппараты, цифровой двойник, коэффициент готовности, надёжность электроснабжения.

Надёжное электроснабжение предприятий агропромышленного комплекса (АПК) и сельских поселений является необходимым условием обеспечения жизнедеятельности животных и растений, производства продукции, работы социальной инфраструктуры и жизнеобеспечения населения. Оборудование данных систем электроснабжения (трансформаторные подстанции, воздушные и кабельные линии, распределительные устройства, электродвигатели и др.) эксплуатируется в специфических условиях: значительная протяжённость сетей, высокая степень износа, неблагоприятные климатические воздействия, перепады нагрузок и др. [1]. Структура сельского электроснабжения включает распределительные сети напряжением 35, 10 и 0,4 кВ, от которых получают питание как сельские поселения (коммунально-бытовые потребители, социальные объекты), так и предприятия АПК (животноводческие фермы, зернотоки, перерабатывающие предприятия и др.). Уровень напряжения 0,4 кВ, в большинстве случаев, является конечным для подачи электроэнергии непосредственно потребителям.

В этих условиях организация эффективной системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) приобретает ключевое значение не только для обеспечения бесперебойной работы, но и с экономической точки зрения: аварийные отказы приводят к простоям производственных процессов, потерям продукции и дополнительным затратам на внеплановые ремонты, что напрямую влияет на рентабельность сельскохозяйственных предприятий. Как отмечается в работе [2], обеспечение надёжности электроснабжения требует комплексного подхода к технической эксплуатации, включающего не только плановые мероприятия, но и внедрение современных методов диагностики.

В основу рассматриваемой системы технического обслуживания и ремонта оборудования систем электроснабжения сельских поселений и предприятий АПК взят Приказ Минэнерго № 1013 [3]. В общем виде, требования данного документа являются обязательными на объекты

электроэнергетики установленной мощностью 5 МВт и более, но заложенные в нём принципы организации ТОиР (сочетание планово-предупредительного ремонта и ремонта по техническому состоянию, системный подход, система диагностики, документальное обеспечение и пр.) могут быть использованы для сетей меньшей мощности, устройств и оборудования электроснабжения сельских поселений и предприятий. В настоящей статье на основе требований Приказа Минэнерго России № 1013 [3] и с учётом отраслевых исследований [1, 2, 4–11] и практического опыта, предлагается структура ТОиР, адаптированная для сельских электрических сетей (включая линии 10–35 кВ, трансформаторные подстанции 35/10/0,4 кВ) и оборудования предприятий АПК. Вопросы расчёта штатного расписания энергетических служб в данной работе не рассматриваются – фокус сделан на технологической и организационной модели ТОиР. Также приводятся количественные оценки экономической эффективности перехода к ремонту по техническому состоянию.

Нормативная основа и ключевые понятия.

Основным документом, устанавливающим требования к организации ТОиР объектов электроэнергетики (в том числе линий электропередачи – ЛЭП, трансформаторных подстанций – ТП, распределительных устройств – РУ), является Приказ Минэнерго № 1013 от 25.10.2017 «Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики» (с изменениями от 2020 г. и 2023 г.) [3]. Данный документ определяет систему технического содержания как совокупность взаимосвязанных подсистем: ремонта, технического обслуживания, а также контроля и диагностики технического состояния. Изложенные в нём принципы и методы организации ТОиР (системный подход, классификация ремонтов, диагностика, документальное сопровождение) представляют собой наиболее приемлемую и универсальную основу и, при определённой доработке и адаптации, могут быть эффективно использованы при организации обслуживания практически любых объектов электроснабжения.

В таблице 1 приведены составляющие системы технического обслуживания и ремонта и их определения в соответствии с [3] и с учётом специфики сельского электроснабжения.

Таблица 1

Система технического обслуживания и ремонта и её подсистемы

Подсистема	Определение
Ремонт	Комплекс операций по восстановлению работоспособности, исправности и ресурса оборудования (трансформаторов, воздушных линий – ВЛ 0,4–35 кВ, кабельных линий – КЛ, РУ, электродвигателей и др.)
Техническое обслуживание	Комплекс технологических операций и организационных действий для поддержания работоспособности или исправности оборудования при использовании по назначению, нахождении в резерве, хранении и транспортировании (проверка работоспособности, чистка, смазка, регулировка, контроль параметров и т.п.)
Система контроля и диагностики технического состояния	Совокупность программно-аппаратных средств, методов и алгоритмов для непрерывного или периодического наблюдения за параметрами и характеристиками работы оборудования, оценки его текущего состояния, поиска и прогнозирования дефектов без вывода из эксплуатации (или с кратковременным отключением)

Как отмечается в работе [4], для сельского хозяйства характерно значительное разнообразие типов электрооборудования и условий его эксплуатации, что требует гибкой системы ТОиР, сочетающей плановые мероприятия и ремонт по фактическому состоянию.

Классификация видов ремонта объектов электроснабжения.

В соответствии с п. 8, 9, 11–12 Правил [3] ремонт энергетического оборудования подразделяется на плановый (текущий, средний, капитальный) и ремонт по техническому состоянию (неплановый и аварийный). В таблице 2 приведена классификация видов ремонта с условиями назначения для сельских сетей электроснабжения.

Выбор между планово-предупредительной стратегией и ремонтом по техническому состоянию должен основываться на риск-ориентированном подходе [5]. Для оборудования с высокой критичностью (главные понизительные подстанции 35/10 кВ, линии, питающие животноводческие и птицеводческие комплексы) предпочтителен плановый ремонт с жёсткой

периодичностью, для менее ответственных элементов – ремонт по фактическому состоянию.

Таблица 2

Классификация видов ремонта объектов электроснабжения

Вид ремонта	Подвиды	Определение и условия назначения
Плановый ремонт	Текущий ремонт	Выполняется с установленной периодичностью (обычно 1 раз в 2–4 года) для обеспечения или восстановления работоспособности
	Средний ремонт	Восстановление исправности и частичное восстановление ресурса с заменой ограниченной номенклатуры деталей. Назначается по графику на основании дефектных актов и данных диагностики
	Капитальный ремонт	Полное или близкое к полному восстановление ресурса объекта с заменой любых частей. Проводится по истечении нормативного срока службы, либо при выявлении критических дефектов
Ремонт по техническому состоянию	Неплановый ремонт	Назначается по результатам контроля и диагностики при обнаружении дефектов, способных повлиять на нормальную и безопасную эксплуатацию. Объём и срок определяются фактическим состоянием
	Аварийный ремонт	Проводится немедленно для устранения последствий аварии или выявленного предаварийного состояния

Одной из главных целей предлагаемой системы ТОиР – свести число аварийных ремонтов к нулю за счёт превентивной диагностики

Виды технического обслуживания

В Правилах [3] установлено, что техническое обслуживание (ТО) включает комплекс операций по поддержанию работоспособности оборудования.

В таблице 3 представлена классификация видов ТО применительно к сельским электрическим сетям (0,4–35 кВ).

Эффективность технического обслуживания напрямую связана с управлением затратами – современные методики и способы (анализ надёжности, оптимизация периодичности и др.) позволяют снизить эксплуатационные расходы без потери качества [6].

Таблица 3

Классификация видов технического обслуживания устройств электроснабжения

Вид ТО	Подвиды, периодичность	Пример состава работ	Особенности для АПК и сельских поселений
Периодическое ТО	Ежесменное (ежедневное)	Проверка работоспособности сигнализации, систем освещения, обогрева и вентиляции и другого основного и вспомогательного оборудования	Выполняется опытным работником энергетического хозяйства без снятия напряжения
	Еженедельное	Проверка затяжки болтовых соединений, контроль уровня масла в маслonaполненном оборудовании, проверка состояния приводов разъединителей и др.	Повышенное внимание к узлам, работающим в условиях пыли, влаги и загрязнений
	Ежемесячное	Проверка устройств защитного отключения (УЗО) и автоматов, осмотр заземлений и др.	Особый контроль воздушных линий 0,4–10 кВ (опоры, провода, охранная зона)
	Сезонное (подготовка к осенне-зимнему периоду – ОЗП / к лету)	Замена смазки, проверка систем обогрева приводов и шкафов, доведение до норм уровня масла, расчистка трасс ВЛ от кустарников и деревьев, проверка молниезащиты и др.	Выполняется по графикам (сентябрь–октябрь, март–апрель)
ТО по фактическому состоянию	По потребности (по данным осмотров и диагностики)	Доливка масла, очистка изоляторов и оборудования от загрязнения, удаление поросли и гнёзд с опор и оборудования обновление окраски и обозначений, очистка от снега и наледи и др.	Минимизирует непроизводительные трудозатраты. Решение принимается по результатам мониторинга и диагностики
Работы при хранении и транспортировании	На складе и в пути	Контроль условий хранения, проворачивание роторов запасных двигателей, обновление консервационной смазки, контроль упаковки и пр.	Для централизованных складов районных энергетических служб

Система контроля и диагностики технического состояния.

Переход от планово-предупредительной системы к ремонту по техническому состоянию невозможен без надёжной системы диагностики [7]. В соответствии с Правилами [3] такая система должна включать методы и средства контроля, позволяющие достоверно определять фактическое состояние оборудования. В таблице 4 приведена структура системы контроля и диагностики, адаптированная для сельского электроснабжения, включая все уровни напряжения (35, 10, 0,4 кВ), трансформаторные подстанции 35/10/0,4 кВ, а также для производственных (предприятия АПК) и коммунально-бытовых потребителей (сельские поселения). Подробное описание способов и оборудования для диагностики, включая применение тепловизионных и ультрафиолетовых методов, анализ частичных разрядов и вибродиагностику и другие методы и способы испытаний и диагностики приведены в учебном пособии [8].

Внедрение описанных средств диагностики и прогнозирования направлено на повышение надёжности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей (всех категорий) и обеспечение требований к качеству электрической энергии (поддержание напряжения, частоты, симметрии в допустимых пределах) на всех уровнях – от магистральных сетей 35 кВ до конечных потребителей 0,4 кВ. Своевременное выявление дефектов позволяет предотвратить аварийные отключения, которые приводят к ухудшению качества электроэнергии и нарушению технологических процессов в АПК.

В состав системы контроля и диагностики входят все перечисленные в таблице 4 компоненты, что обеспечивает многоуровневый сбор данных – от ежедневного визуального осмотра до непрерывного мониторинга критических параметров и прогнозирования с помощью цифровых двойников [7, 9, 10].

**Структура и функции системы контроля и диагностики технического состояния
устройств электроснабжения**

Компонент системы	Содержание и средства реализации
Технические испытания	Испытания изоляции повышенным напряжением (АИИ-70, АИД-70), испытание трансформаторного масла на пробой, нагрузочные испытания электродвигателей, проверка характеристик защитных аппаратов и пр.
Контроль путём осмотра и объезда (визуальный)	Периодические обходы (пешим порядком) и объезды (с использованием автотранспорта) ВЛ 0,4–35 кВ и ТП. Цель – выявление явных видимых дефектов без применения измерительных приборов: состояние опор, токопроводов, изоляции, наличие явных повреждений, систем осушки воздуха, нагрев (по термоиндикаторным пленкам или визуально), состояние контактов (искрение, подгар и др.), работа реле и автоматов (визуально), наличие посторонних предметов, растительности, гнёзд птиц. Инструментарий – бинокль, термоиндикаторные наклейки (пассивные), индикаторный силикагель и пр.
Ручные инструментальные измерения	Простые однопараметрические измерения, выполняемые штатным персоналом с помощью переносных приборов непосредственно на объекте (без использования специализированных лабораторий). Цель – оперативная проверка ключевых параметров и характеристик работы электрооборудования. Примеры: измерение сопротивления изоляции (мегаомметр), измерение токов нагрузки (амперметр, токоизмерительные клещи), измерение напряжения (вольтметр, мультиметр), измерение сопротивления заземления (портативный измеритель заземления), измерение переходных сопротивлений контактов (микроомметр), проверка сопротивления петли «фаза-ноль» и др. Отличие – приборы просты, результаты трактуются по таблицам норм, не требуют сложной обработки.
Мобильные средства диагностики (с участием персонала)	Передвижные лаборатории на базе автомобилей или переносимые комплекты, требующие присутствия оператора и подключения к оборудованию (часто с частичным или полным отключением). Цель – углублённая диагностика, измерение параметров, не доступных при визуальном осмотре и ручных приборах. Примеры: тепловизоры (активный контроль распределения температур), анализаторы частичных разрядов, вибродиагностические комплексы для электродвигателей, анализаторы масла, установки для испытания изоляции повышенным напряжением (в составе передвижной лаборатории). Отличие от ручных измерений – использование сложного многопараметрического оборудования, требующего специальной подготовки и обработки результатов.
Стационарные средства контроля	Датчики гололёдообразования на ВЛ; БМГ (блок мониторинга газов) – устройство для контроля концентрации растворённых газов в масле силовых трансформаторов (водород, ацетилен, этилен, метан, этан, оксид и диоксид углерода); датчики температуры масла и обмоток; счётчики электроэнергии с функцией контроля качества и др.
Автоматические средства диагностики	Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с тепловизорами, ультрафиолетовыми (УФ) камерами, лидарами и фотофиксацией для осмотра ВЛ 10–35 кВ и другого оборудования; роботизированные комплексы для обследования оборудования в труднодоступных участках.
Прогноз с использованием цифровой модели (цифрового двойника)	Виртуальная модель участка сети (трансформатор, линия, потребитель) или системы, получающая данные от датчиков, контролирующих внутренние параметры оборудования и условия внешней среды. Математические модели деградации (старение изоляции, износ контактов), алгоритмы прогнозирования остаточного ресурса (обслуживание по фактическому состоянию).

Преимущества предлагаемой системы ТОиР перед предшествующими.

Одной из основных систем, определявших порядок технического обслуживания электрооборудования в СССР, а затем и в России вплоть до 2000-х годов, была система ППРЭсх (принята в 1987 г.). Она устанавливала жёсткие календарные сроки планово-предупредительного ремонта (ППР), которые были едины для всего оборудования, независимо от его фактического состояния [9]. Эта система позволила снизить аварийность с 25–30 % до 15–18 % в год, но её главный недостаток оставался: работы выполнялись по графику, а не по потребности, что приводило к избыточным вмешательствам в исправное оборудование, повышенный расход ресурсов и, одновременно, к отказам между ремонтами.

Параллельно с отраслевой системой ППРЭсх и позднее, действовали и другие нормативные документы. Фундаментальными для всех отраслей являлись Правила устройства электроустановок (ПУЭ). В частности, широко применяется 7-е издание ПУЭ, введённое в действие приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204, которое устанавливает требования к монтажу и эксплуатации электрооборудования, начиная с выбора силового оборудования и аппаратуры защиты и заканчивая нормами приёмо-сдаточных испытаний. Основным нормативным актом для потребителей электрической энергии с 2003 года также являлись Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП), утверждённые приказом Минэнерго России от 13.01.2003 № 6 (утратил силу). Этот документ устанавливал требования к организации эксплуатации электроустановок и обеспечению их надёжной, безопасной и рациональной работы.

При организации любых работ на электроустановках также требовалось руководствоваться специализированными правилами по охране труда. Если ранее широко применялись Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок (ПОТ РМ-016-2001),

утверждённые Постановлением Минтруда РФ № 3 и Приказом Минэнерго РФ № 163 от 27.12.2000, то с 1 января 2021 года основным документом в этой области являются «Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок», утверждённые приказом Минтруда России от 15.12.2020 № 903н.

С 7 января 2023 года на смену устаревшему ПТЭЭП пришли новые «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии (ПТЭЭПЭЭ)», утверждённые приказом Минэнерго России от 12.08.2022 № 811.

Таким образом, в современной России система ТОиР электроустановок опирается на ряд взаимосвязанных документов. ПУЭ регулирует требования к устройству электроустановок на стадии их проектирования и ввода в эксплуатацию, а Правила по охране труда – безопасность персонала при их обслуживании и эксплуатации.

Также в основе технического обслуживания и ремонта должны лежать требования и рекомендации, изложенные в технической документации производителя оборудования и устройств.

Для организации непосредственно технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики ключевым является специализированный Приказ Минэнерго России от 25.10.2017 № 1013 (Правила организации ТОиР объектов электроэнергетики) [3]. Ключевым отличием современной системы является отказ от жёстких усреднённых сроков в пользу двух стратегий: планово-предупредительного ремонта (для критического оборудования) и ремонта по техническому состоянию (для остального), что позволяет наиболее полно и эффективно использовать ресурс оборудования. Как показано в [5], стратегия ремонта «по состоянию» тем предпочтительнее, чем выше коэффициент вариации ресурса.

Экономическая эффективность и повышение надёжности.

Критерии оценки эффективности.

Эффективность системы ТОиР оценивается по трём основным показателям [10]:

- затраты на реализацию (труд, материалы и другие ресурсы);
- коэффициент технической готовности (K_T , безразм., от 0 до 1);
- риски от аварийных отказов (потери от простоев).

Выбор стратегии (ППР или ремонт по техническому состоянию) определяется величиной суммарных приведённых затрат. Под приведёнными затратами понимают сумму всех годовых эксплуатационных расходов (на техническое обслуживание, ремонт, устранение аварий, диагностику) и потерь от простоев, приведённую к одному году. Эти затраты выражаются в тысячах рублей в год (тыс. руб./год). Для двух сравниваемых систем используются следующие выражения, (тыс. руб./год):

$$Z_{ППР} = Z_{ТО} + Z_R + Z_{АВ} + Y, \quad (1)$$

$$Z_{ТС} = Z_{ТО} + Z_R + Z_D + Y_{ПЛ}, \quad (2)$$

где:

- $Z_{ППР}$ – приведённые затраты при планово-предупредительной системе, тыс. руб./год;
- $Z_{ТС}$ – приведённые затраты при ремонте по техническому состоянию, тыс. руб./год;
- $Z_{ТО}$ – затраты на техническое обслуживание, тыс. руб./год;
- Z_R – затраты на ремонт (текущий, средний, капитальный), тыс. руб./год;
- $Z_{АВ}$ – затраты на устранение аварийных отказов, тыс. руб./год;
- Y – ущерб от аварийного простоя (внеплановое отключение), тыс. руб./год;
- Z_D – затраты на диагностику (оборудование, эксплуатация, поверка, обучение персонала и др.), тыс. руб./год;
- $Y_{ПЛ}$ – ущерб от планового простоя при ремонте по состоянию (останов оборудования для выполнения работ).

В большинстве практических случаев при грамотной организации диагностики удаётся назначить ремонт по техническому состоянию на период минимальной нагрузки или выполнить его без полного отключения (за счёт резервирования), поэтому, как правило, $У_{пл}$ значительно меньше $У$, и может не учитываться в укрупнённых расчётах [10]. Однако для точного сравнения его следует включать в выражение (2).

При условии:

$$З_{ппр} < З_{тс} ,$$

то экономически выгоднее плановый ремонт;

а если

$$З_{ппр} > З_{тс} .$$

то, выгоднее проводить ремонт по техническому состоянию.

Экономический эффект для сельского хозяйства.

Исследования, проведённые во Всероссийском научно-исследовательском институте электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ), показали: до внедрения системы ППРЭсх электродвигатели серии 4А выходили из строя в среднем через 4 года при нормативном ресурсе 8 лет – недоиспользование ресурса составляло 50 % [9]. Экономическая эффективность внедрения современной системы определяется как разница затрат на эксплуатацию до и после внедрения. В затратах до внедрения учитываются не только оплата работ по ТО и ремонту, но и потери от преждевременного выхода оборудования из строя (простой, стоимость ремонта, недополученная продукция) [9].

Повышение надёжности.

При переходе к ремонту по фактическому техническому состоянию:

- снижается количество деградационных отказов благодаря контролю за фактическим состоянием;
- увеличивается коэффициент готовности (K_r) – доля времени, когда оборудование работоспособно;
- межремонтный ресурс возрастает на 15–25 %;

- эксплуатационные затраты сокращаются на 10–20 % [10].

Коэффициент готовности является обобщённой характеристикой, учитывающей как свойства оборудования (соотношение между предотвращёнными и непредотвращёнными отказами), так и качество проведения ТОиР. Чем выше коэффициент готовности, тем больше времени оборудование находится в работоспособном состоянии. Это напрямую влияет на соблюдение требований к качеству электрической энергии (ГОСТ 32144–2013), так как снижение числа аварийных отключений уменьшает провалы напряжения, несимметрию и отклонения частоты.

Перспективные методы диагностики: автоматические средства и цифровые двойники.

Современные автоматические средства диагностики и цифровые двойники позволяют не только выявлять дефекты оборудования на ранней стадии, но и обеспечивать стабильность параметров электрической энергии (напряжение, частота, несимметрия, коэффициент гармоник) в точках присоединения сельских потребителей. Это является обязательным требованием ГОСТ 32144–2013 (напряжение 0,38 кВ) и обеспечивает нормальную и продолжительную работу электродвигателей, осветительных установок, устройств автоматики в АПК и другого оборудования.

Диагностика с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Одной из проблем, которые имеются в электроснабжении сельских поселений и производств – протяжённые воздушные линии 10–35 кВ, проходящие в труднодоступных местах и территориях (леса, болота, реки, горная местность и др.), это делает пешие обходы трудоёмкими и опасными. Традиционный визуальный контроль не позволяет выявлять скрытые дефекты (перегревы контактов, частичные разряды, микротрещины изоляторов и др.). В этой связи одним из перспективных направлений развития диагностики и технического обслуживания является применение автономных мобильных

диагностических комплексов, к примеру, на базе беспилотных летающих аппаратов (БПЛА).

Методология применения БПЛА.

Для диагностики ВЛ используют два основных типа БПЛА:

- мультикоптеры – для детального осмотра отдельных опор и пролётов (зависание, съёмка под разными углами);
- самолётного типа (конвертопланы) – для обследования протяженных участков (до 100–150 км за вылет) с последующей детализацией проблемных мест.

Бортовое оборудование данных комплексов может включать в себя:

- тепловизоры – для выявления локальных перегревов контактных соединений, ошиновки, изоляторов;
- ультрафиолетовые (УФ) камеры – для регистрации коронных и частичных разрядов на изоляторах и арматуре;
- лидары (лазерные локаторы) – для построения точных трёхмерных моделей опор и проводов, измерения габаритов (расстояний от проводов до земли и древесной растительности), выявления деформаций опор (наклон, смещение);
- высококачественные фотокамеры – для фиксации видимых дефектов (трещины, коррозия, разрушение бетона опор, повреждения оборудования, наличие гнёзд птиц и др.).

Обработка результатов. Полученные материалы (термограммы, УФ - кадры, информация с лидаров, цифровые фотографии и др.) обрабатываются специализированным программным обеспечением с использованием нейронных сетей. Обучение производится на размеченных массивах изображений (десятки – сотни тысяч образцов). Современные системы могут распознавать до 40–50 типов дефектов с точностью более 90%: перегретые болтовые соединения, трещины фарфоровых изоляторов, отсутствие маркировки, ослабление растяжек, наличие посторонних предметов и т.д. [11].

Автоматическая классификация опор по степени износа позволяет ранжировать объекты для планирования ремонтов по техническому состоянию [7].

Экономическая эффективность. Замена пеших обходов (5–6 км в день) на БПЛА-диагностику (100–150 км в день) сокращает трудозатраты в 15–20 раз, повышает безопасность персонала и обеспечивает документальное подтверждение состояния линий (цифровой архив). Для сельских сетей, где протяжённость ВЛ составляет сотни километров, данная технология является оптимальным решением.

Цифровые двойники.

Под цифровым двойником понимают виртуальную динамическую модель физического объекта (трансформатора, линии, подстанции), которая получает данные от датчиков в реальном времени и позволяет прогнозировать изменение состояния, моделировать сценарии эксплуатации и обосновывать управленческие решения. Выделяют три уровня:

1. Цифровая модель – статическое описание (чертежи, паспортные данные, трёхмерная геометрия).
2. Цифровой прототип – модель, используемая на этапе проектирования, без обратной связи по данным эксплуатации.
3. Цифровой двойник – модель, синхронизированная с реальным объектом через поток данных (интернет вещей, SCADA, результаты осмотров).

Архитектура и источники данных. Как пример, для силового трансформатора (наиболее критичного элемента сельских сетей) источниками данных служат:

- стационарные датчики: токи, напряжения, активная и реактивная мощность, температура верхних слоёв масла, температура обмоток, уровень масла;
- блок мониторинга газов (БМГ) – концентрации растворённых в масле газов (водород, ацетилен, этилен, метан, этан, оксид и диоксид углерода);

- результаты периодических ручных измерений (сопротивление изоляции, коэффициент абсорбции, тангенс угла диэлектрических потерь);
- данные тепловизионных съёмок (интегрируемые по времени) и др.

Математические методы прогнозирования. Для оценки остаточного ресурса используются два подхода:

- Физические модели деградации (например, уравнение старения изоляции по правилу 6-ти градусов: т.е. каждые 6 °С превышения номинальной температуры сокращают срок службы вдвое). Однако они имеют ограниченную точность в нестационарных режимах.
- Модели на основе данных – регрессионные модели (линейная, полиномиальная), метод опорных векторов, случайный лес, градиентный бустинг, а также рекуррентные нейронные сети для учёта временной динамики. В работе [7] показано, что для прогнозирования отказов трансформаторного оборудования наилучшую точность (минимум среднеквадратичной ошибки) обеспечивает применение линейной регрессии.

Предиктивное обслуживание. На основе прогноза остаточного ресурса цифровой двойник выдаёт рекомендацию: «через период времени N потребуется ремонт по техническому состоянию – ремонт вводов / замена масла / техническое обслуживание РПН или др.». Такой подход позволяет перейти от жёстких графиков ППР к обслуживанию по фактическому состоянию, при котором ремонт выполняется только когда это действительно необходимо, что снижает эксплуатационные затраты на 10–20% и продлевает срок службы оборудования [9, 10].

Ограничения интеграции в систему ТОиР сельских сетей.

В условиях ограниченного бюджета АПК создание полноценного цифрового двойника для каждой ТП может быть экономически нецелесообразно. Однако возможно применение так называемых «лёгких» двойников, построенных на основе контроля ограниченного набора ключевых параметров (ток, напряжение, температура масла) и периодических хроматографических анализов. Такой подход позволяет выявить до 70%

развивающихся дефектов и обосновать переход к ремонту по техническому состоянию для наиболее ответственных трансформаторов (питающих животноводческие комплексы, зерносушиллки, котельные).

Выводы

1. Предложена усовершенствованная структура технического обслуживания и ремонта оборудования систем электроснабжения предприятий АПК и сельских поселений, которая базируется на актуальных требованиях Приказа Минэнерго № 1013 [3] и учитывает особенности эксплуатации в сельской местности [1, 4, 5], включая полную иерархию сетей 35, 10, 0,4 кВ и наличие как производственных (предприятия АПК), так и коммунально-бытовых потребителей (сельские поселения).

2. Рассмотрено сочетание планово-предупредительного ремонта и ремонта по техническому состоянию. Для критического оборудования (подстанции 35/10 кВ, линии, питающие социально значимые объекты) следует сохранять жёсткую периодичность, для остального – переходить к обслуживанию по фактическому состоянию с использованием диагностики.

3. Техническое обслуживание должно быть многоуровневым: ежесменное, еженедельное, месячное, сезонное и по состоянию. Это позволяет равномерно распределить нагрузку на персонал и снизить аварийность.

4. Внедрение современных средств диагностики (беспилотные летательные аппараты с тепловидением, лидарами и ультрафиолетовым контролем, автоматическая обработка изображений нейросетями, стационарные блоки мониторинга газов) и цифровых двойников (от физических моделей до прогнозирования остаточного ресурса на основе данных) позволяет перейти к предиктивному обслуживанию. Это минимизирует внеплановые ремонты, сокращает затраты на ТОиР, повышает надёжность электроснабжения и обеспечивает соблюдение требований к качеству электрической энергии (ГОСТ 32144–2013) в сельских распределительных сетях.

5. Экономическая эффективность перехода к ремонту по состоянию подтверждается снижением эксплуатационных затрат на 10–20 % и увеличением межремонтного ресурса на 15–25 %.

6. Документальное обеспечение ТОиР (журналы, графики, акты) является обязательным условием подтверждения выполнения требований [3] и основой для анализа возникающих отказов в работе оборудования.

7. Реализация описанной системы ТОиР позволит повысить надёжность электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, снизить эксплуатационные затраты и обеспечить требуемое качество электрической энергии в соответствии с действующими стандартами.

Список литературы:

1. Трушкин В.А., Шлюпиков С.В. Особенности эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы Международной научно-практической конференции. Саратов, 2010. С. 383-385. EDN SFJYOT.

2. Кириллов С.В. Обеспечение надежности электроснабжения сельских поселений и предприятий АПК / Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. 85 с. ISBN 978-5-00261-089-1. EDN ESSIVU.

3. Приказ Минэнерго России от 25.10.2017 № 1013 «Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок "Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики"» (ред. от 19.12.2023).

4. Гузачев, А.С. SWOT-анализ системы технического обслуживания и ремонта электрооборудования, используемого в сельскохозяйственном производстве // Научная мысль. 2016. № 5. С. 179-182. EDN UQRTOG.

5. Распределение ресурсов при риск-ориентированном обслуживании электрооборудования / Г.П. Ерошенко, В.А. Трушкин, С.М. Бакиров, А.С. Гузачев // Научное обозрение. 2017. № 21. С. 83-86. EDN UQLZEI.

6. Бугорский И.А., Клевцов С.М. Управление затратами на техническое обслуживание и ремонт энергетического оборудования: современные подходы и методики // Будущее науки: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества : сборник научных статей. Курск, 2025. С. 46-50. EDN AMKDON.

7. Салов И.В. Модели и алгоритмы диагностики состояния оборудования энергетических систем на основе их цифровых двойников // Математические методы в технологиях и технике. 2025. № 12-5. С. 77-82. EDN ZLCYBC.

8. Кириллов С.В. Способы и оборудование для проведения диагностики и обеспечения надежности работы устройств электроснабжения сельских поселений и предприятий АПК: учебное пособие / Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. 95 с. ISBN 978-5-00261-203-1. EDN QCVJKN.

9. Ямалеев А.А. К вопросу об использовании цифровых двойников и нейронных сетей в энергетике // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: Сборник статей. Пенза, 2025. С. 365-368. EDN XERONI.

10. Разжевалов С.А., Сандаков В.Д. Цифровые двойники в ТЭК и ЖКХ // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Казань, 2025. С. 916-918. EDN ZSITNP.

11. Катаев Ю.В. Диагностирование технического состояния мобильных энергетических средств с использованием цифровых технологий // Технический сервис машин. 2023. № 1(150). С. 21-28. DOI 10.22314/2618-8287-2023-61-1-21-28. EDN RGHPRB.

UDC 621.311

**IMPROVEMENT OF THE MAINTENANCE AND REPAIR SYSTEM
FOR POWER SUPPLY EQUIPMENT IN RURAL SETTLEMENTS
AND AGRICULTURAL ENTERPRISES**

Sergey V. Kirillov^{1,2}

candidate of technical sciences, associate professor

kirill_mich@mail.ru

Serk B. Mukhametov³

candidate of technical sciences, associate professor

Vladimir S. Kirillov⁴

student

¹ Design and Engineering Bureau for Infrastructure of JSCo «RZD»

Moscow, Russia

² Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

³ Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin

Saratov, Russia

⁴ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

Dolgoprudny, Russia

Abstract. The article examines issues related to improving the maintenance and repair (M&R) system for equipment used in the power supply of rural settlements and agricultural enterprises. Based on current regulatory requirements (Order of the Ministry of Energy No. 1013) and an analysis of industry research and practical experience, a M&R structure is proposed. This structure includes a classification of repair types, various types of maintenance, and a modern system of monitoring and diagnostics. Special attention is paid to the transition from scheduled preventive maintenance (SPM) to condition-based maintenance (CBM) and the implementation

of digital technologies (unmanned aerial vehicles, lidars, digital twins) for predicting residual life, enhancing power supply reliability, and ensuring the quality of electrical energy.

Key words: technical maintenance, repair, power supply, agricultural and industrial, rural electricity grids sector, diagnostics, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), digital twin, availability factor, reliability of power supply.

Статья поступила в редакцию 20.05.2026; одобрена после рецензирования 19.06.2026; принята к публикации 30.06.2026.

The article was submitted 20.05.2026; approved after reviewing 19.06.2026; accepted for publication 30.06.2026.