Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

УДК 621.31

Повышение надежности воздушных линий электропередач сельской местности в условиях ветровых и гололедных нагрузок

Суринский Д.О.[1], Фараносов В.В.[1], Муслимов Д.Р.[2]

[1]Тюменский государственный университет

[2]Государственный аграрный университет Северного Зауралья

Аннотация

В условиях роста энергопотребления в сельском хозяйстве и увеличения протяженности воздушных линий электропередач (ВЛ) возрастает актуальность обеспечения их надежности, особенно в регионах с суровыми климатическими условиями. В статье рассмотрены причины аварийности ВЛ 0,4–10 кВ в сельской местности на примере юга Тюменской области, где основными факторами являются ветровые и гололедные нагрузки. Предложены методы повышения надежности, включая применение современных проводов, оптимизацию конструкций опор, внедрение систем мониторинга и прогнозирования аварий на основе нейросетевых технологий. Разработана концепция экспертно-программного комплекса, позволяющего оценивать техническое состояние ВЛ и формировать обоснованные рекомендации по техническому обслуживанию. Проведена технико-экономическая оценка предложенных решений, подтверждающая их эффективность и окупаемость. Результаты работы могут быть использованы при проектировании, реконструкции и эксплуатации распределительных электрических сетей сельской местности.

Ключевые слова: НАДЕЖНОСТЬ, ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, ГОЛОЛЕД, ВЕТРОВЫЕ НАГРУЗКИ, СЕЛЬСКАЯ МЕСТНОСТЬ, МОНИТОРИНГ, НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

Введение

Технологический прогресс в агропромышленном комплексе сопровождается ростом

энергоемкости производственных процессов, повышением степени автоматизации и увеличением требований к качеству и бесперебойности электроснабжения [1]. Согласно данным ПАО «Россети», протяженность ВЛ в России в 2023 году составила 2 557 тыс. км, при этом потребление электроэнергии выросло на 1,4 % и достигло 1 121,6 млрд кВт·ч [2]. Ожидается дальнейший рост до 1 274,5 млрд кВт·ч к 2029 году, что обусловлено, в том числе, развитием сельского хозяйства в рамках реализации Доктрины продовольственной безопасности РФ.

Однако наряду с ростом энергопотребления наблюдается и увеличение числа аварий на ВЛ, особенно в сельской местности. Основными причинами отключений являются механические повреждения, вызванные ветровыми и гололедными нагрузками, которые составляют до 47 % всех технологических нарушений в ряде регионов [3]. В этих условиях обеспечение надежности электроснабжения требует комплексного подхода, включающего как модернизацию инфраструктуры, так и внедрение интеллектуальных систем диагностики и прогнозирования.

Целью настоящего исследования является разработка научно обоснованных рекомендаций по повышению надежности воздушных линий электропередач сельской местности в условиях воздействия ветровых и гололедных нагрузок на основе анализа текущего состояния сетей, математического моделирования механических процессов и применения цифровых технологий.

Анализ современного состояния систем электроснабжения сельской местности

Требования к надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) [4], электроприемники сельскохозяйственных предприятий, как правило, относятся ко II категории надежности, что предполагает допустимый перерыв электроснабжения на время, необходимое для включения резервного источника (не более 2 часов). Однако в условиях аварий, вызванных стихийными явлениями, восстановление может занимать значительно больше времени, что приводит к экономическим потерям.

При проектировании электрических сетей задача обеспечения надежности решается в рамках многокритериальной оптимизации, где экономические показатели часто выступают в

качестве целевой функции, а технические требования — в виде ограничений [5]. В сельской местности основным типом линий остаются ВЛ 0,4–10 кВ, выполненные на деревянных и железобетонных опорах с неизолированными проводами. Многие из них эксплуатируются с 1950–1970-х годов и требуют реконструкции [6].

Климатические особенности юга Тюменской области

Юг Тюменской области характеризуется континентальным климатом с продолжительной зимой. Согласно районированию ПУЭ, регион относится к II району по ветровой нагрузке и III району по гололеду, что соответствует нормативной толщине гололеда 20 мм на высоте 10 м [4]. Среднегодовая температура составляет +0,8 °С, а минимальная — до –49 °С. Такие условия создают предпосылки для интенсивного гололедообразования и «пляски проводов» — опасного явления, приводящего к схлестыванию фаз и коротким замыканиям.

Анализ аварийности за I квартал 2025 года показал, что до 80 % отключений ВЛ 10 кВ связаны с:

- воздействием ветровых и гололедных нагрузок;
- несвоевременным техническим обслуживанием;
- механическими повреждениями от крупногабаритной техники.

Это подчеркивает необходимость не только укрепления инфраструктуры, но и повышения качества эксплуатации и проектирования.

Факторы, влияющие на надежность воздушных линий электропередач

Показатели надежности ВЛ

- Для восстанавливаемых объектов, таких как ВЛ, основными показателями надежности являются [7]:

- параметр потока отказов (ω);
- среднее время восстановления (Тв);
- коэффициент вынужденного простоя (Кв).

Эти показатели позволяют количественно оценить состояние линии и спрогнозировать риски. Например, в 2023 году в Тюменской области индекс SAIDI (средняя продолжительность отключений) составил 0,229, что выше показателя 2022 года (0,215), несмотря на снижение абсолютных потерь [2].

Влияние климатических нагрузок

Гололед и ветер вызывают комплексное воздействие на ВЛ:

- увеличение массы провода → рост стрелы провеса → нарушение габаритов над дорогами;

- аэродинамическая неустойчивость → пляска проводов;

- закручивание проводов → неравномерное накопление льда → разрегулировка фаз.

Особую роль играет высота подвески провода и его диаметр: чем выше и тоньше провод, тем интенсивнее гололедообразование. Кроме того, на одиночных проводах (в отличие от жестких конструкций) лед накапливается устойчиво, достигая массы до 20 кг/м [8,9,10].

Моделирование механических нагрузок на провода ВЛ

Методика расчета

Расчет механических нагрузок на провода ВЛ 10 кВ выполнен для климатических условий юга Тюменской области. Использованы удельные нагрузки:

- от собственного веса провода (γ_1);

- от гололеда (γ_2);

- от ветра (γ_4, γ_5).

- Формула стрелы провеса:

$$\boldsymbol{f} = (\boldsymbol{\gamma} \cdot \boldsymbol{l2})/(\mathbf{8} \cdot \boldsymbol{\sigma}) \qquad (1)$$

где l — длина пролета, σ — напряжение в проводе.

Расчеты выполнены для проводов А-70, А-95, АС 95/16 и СИП-3 1×95.

Результаты расчетов

Наибольшие стрелы провеса наблюдаются у неизолированных алюминиевых проводов (А-70, А-95). Например, при пролете 45 м и гололедно-ветровом режиме стрела провеса для А-70 составляет 2,00 м, в то время как для СИП-3 1×95 — 0,86 м. Это свидетельствует о преимуществе самонесущих изолированных проводов в условиях интенсивных климатических нагрузок.

Кроме того, анализ показал, что при неравномерной разрегулировке стрел провеса фаз (коэффициент разрегулировки до 0,36 в III районе по гололеду) вероятность схлестывания проводов значительно возрастает. Рекомендуемое межфазное расстояние на опорах — не

менее 1,3 м.

Моделирование в MATLAB Simulink и Excel позволило визуализировать зависимости и разработать алгоритм автоматизированного расчета на VBA.

Рекомендации по повышению надежности ВЛ

Технические мероприятия

Замена неизолированных проводов на СИП-3, обеспечивающие:

- устойчивость к схлестыванию;
- снижение стрел провеса;
- безопасность при эксплуатации.

Увеличение межфазных расстояний:

- 1,5 м — в I–II ветровых районах;
- 1,6 м — в III–IV районах.

Применение стальных опор из гнутого профиля:

- срок службы до 50 лет;
- габаритный пролет до 100 м;
- устойчивость к паводкам при установке на стальные сваи.

Модернизация заземляющих устройств с учетом глубины промерзания грунта (до 2,7 м) и применения методов вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

Цифровизация и мониторинг

Предложена система диагностики, включающая:

- датчики гололедообразования (например, ДО-3);
- датчики провеса и вибрации;
- датчики температуры и ветра.

Данные передаются в облачную платформу и обрабатываются с помощью нейронных сетей, что позволяет:

- прогнозировать аварийные ситуации;
- формировать индексы технического состояния оборудования;
- оптимизировать планы ТОиР.

Показатель ненадежности ЛЭП рассчитывается по формуле:

$$ПНН=(ППО\cdot L\cdot t)/(8760) \quad (2)$$

где ППО — параметр потока отказов, L — длина участка, t — время восстановления.

На основе этого показателя предлагается шкала оценки технического состояния (табл. 1).

Таблица 1. Шкала технического состояния ВЛ

Состояние	Диапазон	Рекомендуемый ремонт
Критическое	0–30	Замена
Неудовлетворительное	31–60	Капитальный
Удовлетворительное	61–75	Средний
Хорошее	76–90	Текущий
Очень хорошее	91–100	Межремонтные мероприятия

Технико-экономическая оценка

Затраты на разработку программного комплекса

Общие затраты на создание ПО (включая зарплату программиста, лицензирование, налоги и маркетинг) составили 2 838 000 руб. Годовой доход от одной подписки — 1 860 000 руб. Срок окупаемости — 1,52 года.

Экономический эффект для энергосбытовой компании

Капитальные вложения на 1 км ВЛ — 1 400 000 руб.

Годовая подписка на ПО — 1 800 000 руб.

Общие затраты на внедрение — 3 260 000 руб.

При снижении недоотпуска электроэнергии на 50 % (например, 72 000 кВт·ч в год при удельном ущербе 35 руб./кВт·ч) годовая экономия составляет 1 260 000 руб. Срок окупаемости — 2,58 года.

Таким образом, внедрение предложенного комплекса является экономически целесообразным и обеспечивает значительный социальный эффект — повышение качества жизни сельского населения и устойчивость АПК.

Заключение

В результате проведенного исследования:

- Установлено, что основными причинами аварийности ВЛ сельской местности являются ветровые и гололедные нагрузки, усугубляемые устаревшей инфраструктурой и несвоевременным обслуживанием.

- Показано, что применение СИП-3, стальных опор и увеличение межфазных расстояний значительно повышает надежность.

- Разработана концепция экспертно-программного комплекса на основе нейросетевых технологий для прогнозирования аварий и оптимизации ТОиР.

- Подтверждена экономическая эффективность предложенных решений.

- Полученные результаты могут быть использованы сетевыми компаниями, проектными институтами и регулирующими органами при разработке нормативных документов и программ модернизации сельских электрических сетей.

Список использованных источников:

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Издание 7-е. — М.: Энергоатомиздат, 2020.
2. Годовой отчет ПАО «Россети» за 2023 год. — [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosseti.ru
3. Отчет АО «Россети Тюмень» о технологических нарушениях (2023).
4. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.
5. ГОСТ Р 7.0.5–2008. Библиографическая ссылка.
6. Кабашов В.Ю. Повышение надежности ВЛ 6–10 кВ в условиях гололеда // Электрические станции. — 2021. — № 4. — С. 45–52.
7. Бургсдорф В.В. Динамика проводов ВЛ под действием ветра. — М.: Энергия, 2019.
8. Никольский О.К. Модель функционирования системы техногенной безопасности электроустановок // Вестник АПК Ставрополья. 2021. № 1(41). С. 19-23. Doi: 10/31279/2222-9345-2021-10-41-19-23.
9. Shirobokova T., Surinsky D., Egorov S. Modeling of led luminaires with optimal temperature operation of leds // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling. 2021. Vol.174. No. 529. doi: 10.1088/1742-6596/2131/5/052093.
10. Методические указания по расчету заземляющих устройств с учетом промерзания грунтов. — Тюмень: Изд-во ГАУСЗ, 2024.

==========

Цитирование: Суринский Д.О., Фараносов В.В., Муслимов Д.Р. Повышение надежности воздушных линий электропередач сельской местности в условиях ветровых и гололедных нагрузок [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2025. – № 6. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/6/st_609.pdf DOI: https://doi.org/10.51419/202156609.