УДК 621.315.1

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ, ДЕРЕВЯННЫХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Гречишкин Александр Викторович,

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза,

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Городское строительство и архитектура».

Гарькина Валерия Александровна,

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза,

студент.

Ивакина Юлия Витальевна,

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза,

студент.

Аннотация

Приводится методика технической экспертизы опор воздушных линий электропередачи (ВЛ) с дифференциацией по материалу несущих конструкций. Систематизированы механизмы деградации железобетонных, деревянных и металлических опор, предложена унифицированная балльная модель оценки технического состояния и экспоненциальная модель расчёта остаточного ресурса. Выполнен сравнительный анализ трёх типов опор по восьми эксплуатационным показателям, приведены расчётный пример и графическая интерпретация результатов. Показано, что выбор рационального типа опоры и корректная методика экспертизы определяются доминирующим механизмом повреждений и условиями эксплуатации.

Ключевые слова: опора линии электропередачи, техническая экспертиза, остаточный ресурс, железобетон, древесина, металлоконструкция, деградация, коррозия, балльная оценка состояния.

TECHNICAL EXAMINATION OF POWER LINE SUPPORTS: COMPARATIVE ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE, WOODEN AND METAL STRUCTURES

Alexander Viktorovich Grechishkin,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Urban Construction and Architecture

Valeria Aleksandrovna Gar'kina,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

student.

Ivakina Yulia Vitalyevna,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

student.

Abstract

Methodology for the technical assessment of overhead power line (OHL) supports is presented, categorized by the material of the load-bearing structures. Degradation mechanisms for reinforced concrete, wooden, and metal supports are systematized; a unified scoring model for evaluating technical condition and an exponential model for calculating residual service life are proposed. A comparative analysis of the three types of supports based on eight operational indicators is conducted, accompanied by a calculation example and a graphical interpretation of the results. It is demonstrated that the selection of an appropriate support type and the application of an accurate assessment methodology depend on the dominant damage mechanism and operating conditions.

Keywords: power line support, technical assessment, residual service life, reinforced concrete, timber, metal structure, degradation, corrosion, condition scoring.

Опоры являются несущими конструкциями воздушных линий электропередачи и во многом определяют их надёжность, безопасность и долговечность. В отечественных и зарубежных энергосистемах эксплуатируется обширный парк опор, выполненных из трёх принципиально различных материалов — железобетона, древесины и стали. Каждый материал характеризуется собственным набором достоинств, ограничений и, что особенно важно, специфическим механизмом накопления повреждений в процессе эксплуатации. Достоверная оценка технического состояния опор невозможна без учёта этих различий [1,2].

Цель работы — систематизировать методику технической экспертизы опор ВЛ и провести сравнительный анализ железобетонных, деревянных и металлических конструкций по совокупности технико-экономических и эксплуатационных показателей, с выработкой единого подхода к оценке их остаточного ресурса.

Значительная часть парка опор в энергосистемах эксплуатируется за пределами нормативного срока службы, что делает задачу объективной оценки их фактического состояния одной из ключевых при планировании ремонтов и реконструкции. Отсутствие единого методического подхода, учитывающего специфику материала, приводит как к необоснованному выводу опор из эксплуатации, так и к пропуску опасных дефектов [3,4].

Основные проблемы, стоящие перед технической экспертизой:

- отсутствие единой валидированной шкалы оценки дефектов для опор из разных материалов;
- различия в доминирующих механизмах деградации, требующих специализированных методов диагностики;

- сложность количественной оценки остаточного ресурса по данным разовых осмотров;
- необходимость сопоставления технического состояния с экономикой жизненного цикла при выборе типа опоры.

Методика экспертизы включает четыре последовательных этапа: сбор проектной и эксплуатационной документации; визуально-инструментальное обследование; лабораторные или неразрушающие испытания материала; расчёт остаточного ресурса и формирование заключения. Содержание этапов принципиально зависит от материала опоры.

Для железобетонных опор применяют визуальный осмотр с фиксацией трещин, сколов и следов выщелачивания, измерение защитного слоя и глубины карбонизации бетона, а также контроль коррозионного состояния арматуры потенциометрическим методом. Доминирующий механизм деградации — карбонизация бетона и коррозия продольной арматуры, приводящая к потере несущей способности стойки [5].

Для деревянных опор ключевое значение имеет определение глубины и площади гниения в зоне «земля–воздух» и в местах заделки, а также состояния антисептической пропитки. Древесина деградирует преимущественно вследствие биологического поражения (гниль, насекомые) и механического износа, что требует периодического зондирования и отбора проб.

Для металлических опор основным методом является визуально-инструментальный контроль на предмет коррозионных потерь сечения, контроль сварных и болтовых соединений, толщинометрия элементов решётки и поясов. Преобладающий механизм деградации — атмосферная коррозия стали, ускоряющаяся в агрессивных средах и в местах скопления влаги.

Предлагается комплексная балльная модель: каждой опоре присваивается интегральный показатель технического состояния K, вычисляемый по совокупности частных дефектов с учётом их класса

опасности и весовых коэффициентов. Значение K в диапазоне 0…1 характеризует состояние от полностью исправного (K = 1) до предельного (K = 0). По величине K опора относится к одной из категорий: исправное, работоспособное, ограниченно работоспособное, аварийное.

Математическая модель остаточного ресурса опоры основана на экспоненциальном законе накопления повреждений:

$$D(t) = 1 - exp(-t/\gamma),$$

$$T_{ост} = -\gamma \cdot ln(1 - D_f),$$

где D_f — предельно допустимое накопленное повреждение (принято D_f = 0,35), γ — постоянная времени деградации, определяемая по данным предыдущих обследований или по достигнутому уровню повреждений к моменту освидетельствования.

Определим остаточный ресурс железобетонной промежуточной опоры, эксплуатируемой 32 года, у которой по результатам обследования накопленное повреждение составляет D = 0,35 при предельном значении D_f = 0,35.

Постоянная времени деградации:

$$\gamma = -t / \ln(1 - D) = -32 / \ln(1 - 0{,}35) =$$

$$-32 / \ln(0{,}65) = -32 / (-0{,}4308) \approx 74{,}3 \text{ года.}$$

Остаточный ресурс до достижения предельного состояния

$$T_{ост} = -\gamma \cdot \ln(1 - D_f) = -74{,}3 \cdot \ln(0{,}65) = -74{,}3 \cdot (-0{,}4308) \approx 32{,}0 \text{ года.}$$

Таким образом, опора, достигшая повреждения 0,35 на нормативном горизонте службы, выработала расчётный ресурс, и дальнейшая эксплуатация требует усиления либо замены, если фактическое повреждение превышает предельное значение [6,7].

Таблица 1 - Сравнительный анализ типов опор

Показатель	**Железобетонные**	**Деревянные**	**Металлические**
Нормативный срок службы	50–60 лет	30–40 лет	50–70 лет
Доминирующий	Карбонизация	Гниение,	Атмосферная

механизм деградации	бетона, коррозия арматуры	биоповреждение	коррозия стали
Масса и транспортабельность	Высокая масса, сложная перевозка	Малая масса, простая перевозка	Средняя масса, монтаж кранами
Относительная стоимость	Средняя (1,0)	Низкая (0,8)	Высокая (1,6)
Требования к обслуживанию	Минимальные	Периодическая пропитка	Антикоррозионная защита
Методы диагностики	Потенциометрия, глубина карбонизации	Зондирование, отбор проб	Толщинометрия, контроль сварных швов
Типичная область применения	Массовые промежуточные опоры 0,4–110 кВ	Линии до 35 кВ, временные ВЛ	Высоковольтные и анкерно-угловые опоры
Устойчивость к агрессивной среде	Средняя (требует защитного слоя)	Низкая (без пропитки)	Средняя (требует защитных покрытий)

Наибольший срок службы обеспечивают металлические опоры, однако при максимальной стоимости; деревянные опоры наиболее экономичны, но имеют наименьший нормативный срок службы, что определяет их выбор для временных и малонагруженных линий (рисунок 1)

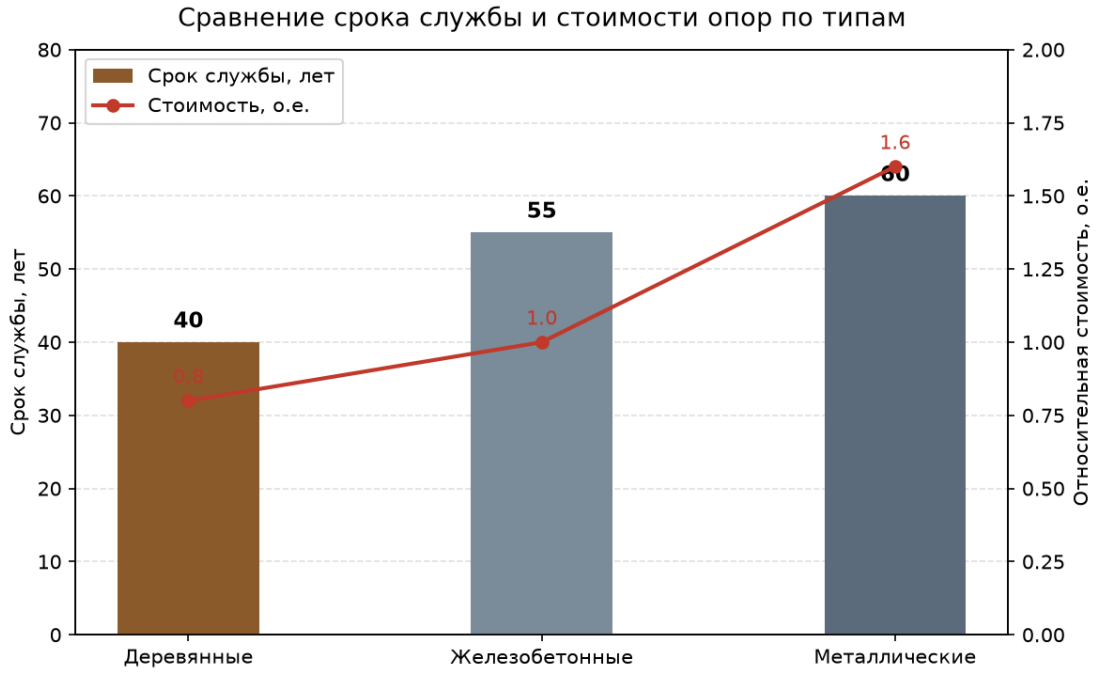


Рисунок 1 – Сопоставление нормативных сроков службы и относительную совокупную стоимость трёх типов опор

Наименьшая постоянная времени деградации характерна для деревянных опор, наибольшая — для металлических; это отражает скорость

достижения предельного повреждения D_f = 0,35 и, соответственно, потребность в более частом обследовании деревянных конструкций.

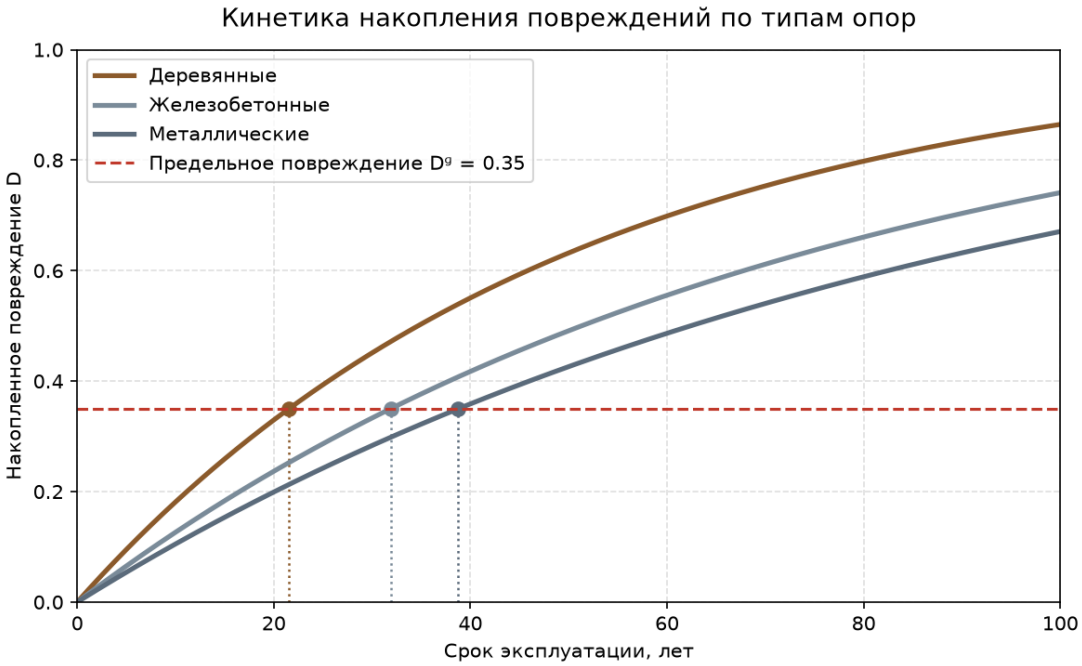


Рисунок 2 – Кинетика накопления повреждений D(t) для трёх материалов по экспоненциальному закону

Учитывая вышеизложенное можно сделать следующие выводы:

1. Техническая экспертиза опор ВЛ должна быть дифференцирована по материалу конструкции, поскольку доминирующие механизмы деградации принципиально различны: коррозия арматуры у железобетона, гниение у древесины, атмосферная коррозия у стали.

2. Единая балльная модель оценки состояния с интегральным показателем K позволяет унифицировать сравнение опор разного типа и автоматизировать ранжирование по критичности.

3. Экспоненциальная модель накопления повреждений даёт количественную оценку остаточного ресурса и хорошо согласуется с данными периодических обследований.

4. Железобетонные опоры оптимальны для массовых линий 0,4–110 кВ благодаря балансу стоимости и долговечности при минимальном обслуживании.

5. Деревянные опоры рациональны для линий до 35 кВ и временных схем, однако требуют регулярного контроля гниения и защитной пропитки.

6. Металлические опоры незаменимы в высоковольтных сетях и на ответственных участках, несмотря на наибольшую стоимость, благодаря максимальной несущей способности и сроку службы при надлежащей антикоррозионной защите.

Библиографический список:

1. Гречишкин А.В., Артюшин Д.В., Коновалов П.В., Праслов М.А. Диагностика технического состояния сооружений электрических подстанций // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 2 (39). С. 135-141.

2. Колобанов А.С., Тарасова Н.В., Сорокина Д.С., Сабитов Л.С., Гречишкин А.В. Об особенностях работ тонколистовых стальных конструкций в условиях агрессивных сред // Инженерный вестник Дона. 2023. № 7 (103). С. 277-285.

3. Гарькин И.Н. Математическая модель применения риск ориентированного подхода при ремонте сложной кровли объектов культурного наследия // Системные технологии. 2025. № 2 (55). С. 92-97

4. Адушкин К.Г., Сабитов Л.С., Агафонкина Н.В., Гарькина В.А. Численное исследование трехгранных сечений решетчатых опор на примере опоры воздушной линии марки У110-4+5 // Моделирование и механика конструкций. 2025. № 21. С. 151-157

5. Саденко Д.С., Гарькин И.Н. Причины дефектов при производстве монолитных железобетонных конструкций, связанных с коррозией бетона // Региональная архитектура и строительство. 2020. № 4 (45). С. 105-109

6. Гарькин И.Н., Агафонкина Н.В. Анализ причин обрушения мачты сотовой связи в Пензенской области // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2016. № 3. С. 49-55

7. Шеин А.И., Зайцев М.Б. Анализ спектральных характеристик высотного здания в среде "MATLAB" // Моделирование и механика конструкций. 2024. № 19. С. 9-21