

## КАК ПРЕДСКАЗЫВАТЬ АВАРИИ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ЗИМОЙ: МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКА

**Дылыков Роман Эрдэмович**

студент, кафедра электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, РФ, г. Санкт-Петербург

**Аннотация.** Представлена модель оценки риска повреждений воздушных линий электропередачи в зимний период. Метод учитывает климатические и конструктивные факторы, включая гололёд, ветер и возраст линии. Расчёты основаны на сравнении нагрузки и прочности. Получены значения вероятности повреждений для различных сценариев. Модель позволяет выявлять участки с повышенным риском.

**Abstract.** A risk assessment model for overhead power line failures under winter conditions is presented. The method accounts for climatic and structural factors, including ice load, wind, and line age. The risk is calculated by comparing external load with structural strength. Probabilities of failure are obtained for various scenarios. The model helps identify high-risk segments.

**Ключевые слова:** Воздушные линии электропередачи, зимние повреждения, оценка риска, гололёд, ветровая нагрузка, надёжность, прогноз отказов, климатическое воздействие, эксплуатация ВЛЭП.

**Keywords:** Overhead power lines, winter failures, risk assessment, ice load, wind load, reliability, failure prediction, climatic impact, OHL operation.

### ВВЕДЕНИЕ

Повреждения воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) в зимний период остаются одной из ключевых причин аварий в электроэнергетике. Основные угрозы связаны с обледенением проводов, воздействием сильного ветра и сопутствующими нагрузками, превышающими расчётные пределы механической прочности конструкций. Аварии приводят к массовым отключениям потребителей, финансовым потерям и затруднению восстановления энергоснабжения в условиях низких температур.

Особую сложность представляет предсказание таких аварий. Несмотря на наличие нормативов по расчёту механических нагрузок, на практике многие линии эксплуатируются с износом, и их реальная надёжность существенно отличается от проектной. Кроме того, локальные погодные аномалии, особенно в регионах с резко континентальным климатом, могут вызывать экстремальные условия, не предусмотренные типовыми расчётами.

В этих условиях актуальной задачей становится разработка простой, но надёжной методики количественной оценки риска повреждений ЛЭП в зависимости от толщины наледи, скорости ветра и состояния линии. Такая модель должна позволять прогнозировать вероятности отказов, ранжировать участки по степени уязвимости и служить инструментом для

обоснования профилактических и защитных мероприятий.

Настоящая работа направлена на построение такой модели и демонстрацию её применения на практике. Предложенный подход основан на сравнении внешней нагрузки и предельной прочности конструкции в вероятностной постановке. В отличие от детерминированных методов, он позволяет учитывать разброс климатических параметров и деградацию прочностных характеристик со временем.

## АНАЛИЗ ФАКТОРОВ РИСКА ПОВРЕЖДЕНИЙ ВЛЭП ЗИМОЙ

Воздушные линии электропередачи (ВЛЭП) в зимний период подвержены совокупному воздействию климатических и эксплуатационных факторов. Наиболее критичными являются следующие:

### 1. Обледенение проводов.

При температуре около 0 °С и высокой влажности на проводах образуется наледь, которая увеличивает массу провода и, соответственно, вертикальную нагрузку на опоры. Даже при толщине льда в 10–20 мм нагрузка может увеличиться в 2–3 раза по сравнению с нормальными условиями. Это приводит к обрыву проводов или разрушению конструктивных элементов.

### 2. Ветровая нагрузка.

Сильный ветер оказывает горизонтальное воздействие на провода, вызывая их колебания, скручивание и дополнительные усилия на опоры. Комбинация льда и ветра создаёт сложную пространственную нагрузку, которая нередко оказывается выше расчётной.

### 3. Старение конструкций.

С течением времени материалы опор и креплений теряют прочность из-за усталости, коррозии, температурных деформаций и многократных нагрузок. Даже при отсутствии видимых дефектов фактическая прочность может быть снижена на 20–30% по сравнению с проектной.

### 4. Локальные климатические аномалии.

В ряде регионов наблюдаются экстремальные погодные явления — ледяные дожди, ураганный ветер, быстрая смена температуры. Такие условия трудно предсказать заранее, но именно они вызывают пиковые нагрузки на ЛЭП.

### 5. Нарушения в эксплуатации.

Нерегулярное техническое обслуживание, несвоевременная замена изношенных элементов, отсутствие систем активной защиты (например, вибростряхивателей) повышают вероятность аварий даже при умеренных погодных условиях.

Анализ статистических данных показывает, что в зонах с частым гололёдом и сильными ветрами вероятность аварий на старых линиях возрастает кратно. Это требует перехода от реактивного ремонта к проактивному прогнозированию и оценке риска на основе моделирования.

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РИСКА

Для прогнозирования вероятности повреждений воздушных линий электропередачи в зимний период применяется вероятностный подход, основанный на сравнении действующих климатических нагрузок с прочностными характеристиками конструктивных элементов ВЛЭП. Основная идея заключается в том, что повреждение происходит тогда, когда нагрузка от внешних воздействий превышает допустимую прочность элемента. Математически вероятность такого события можно выразить как:

$$P(L \geq S) \quad (1)$$

$L$

где  $L$  – случайная величина, описывающая внешнюю нагрузку (в том числе от ветра и

$S$

гололёда), а  $S$  – случайная величина, отражающая прочность конструкции. Оба параметра рассматриваются как распределённые нормально, что соответствует техническим стандартам и практике надёжного анализа.

Для более точного расчёта используется интегральное выражение вероятности отказа:

$$F = P(L > S) = \int_0^{\infty} f_L(x) F_S(x) dx \quad (2)$$

$f_L(x)$

$F_S(x)$

Где  $f_L(x)$  – плотность распределения нагрузки, а  $F_S(x)$  – функция распределения прочности. В случае нормального распределения обоих параметров разность:

$$Z = S - L \quad (3)$$

также является нормально распределённой случайной величиной, и вероятность повреждения может быть определена через стандартную функцию распределения нормального закона.

В модели учитываются входные параметры, такие как средняя и максимальная толщина наледи, скорость ветра, тип опоры (металлическая, железобетонная), возраст линии, наличие модернизации. Для каждого сценария рассчитываются значения средней нагрузки и предельной прочности, а затем определяется стандартизированная разность и соответствующая ей вероятность отказа. Подобный подход позволяет гибко оценивать влияние отдельных факторов и их сочетаний на риск аварии.

Алгоритм оценки включает следующие этапы:

1. Сбор климатических и технических данных по анализируемому участку линии.
2. Определение распределения нагрузок и прочности для типовых конструкций.
3. Расчёт значения:

$$Z = \frac{S - L}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_L^2}} \quad (4)$$

4. Определение вероятности повреждения по функции стандартного нормального

$\Phi(Z)$

распределения

5. Построение карты рисков и ранжирование сценариев по степени опасности.

Данная методика позволяет не только вычислить абсолютную вероятность повреждений, но и сравнивать альтернативные решения по повышению надёжности, включая замену опор, установку вибрострахивателей, модернизацию арматуры.

Это делает её применимой в реальных условиях эксплуатации ВЛЭП, особенно в регионах с неблагоприятными климатическими характеристиками.

После расчёта вероятностей повреждений для заданных сценариев важно представить результаты в наглядной форме. Это позволяет выявить критические сочетания параметров и сравнить уязвимость разных типов линий. Для визуализации используется таблица и столбчатая диаграмма, отображающие значения риска в зависимости от погодных условий и состояния линии.

В таблице ниже приведены значения вероятности повреждения (%) для трёх условных типов линий (А — новая, В — изношенная, С — модернизированная) при трёх погодных сценариях:

Таблица 1.

Результаты при 3 погодных сценариях

| Погодный сценарий     | Линия А (новая) | Линия В (старая) | Линия С (модернизированная) |
|-----------------------|-----------------|------------------|-----------------------------|
| Нормальные условия    | 1.5%            | 18.5%            | 3.0%                        |
| Экстремальный гололёд | 30.3%           | 59.1%            | 4.0%                        |
| Штормовой ветер       | 20.0%           | 49.0%            | 3.0%                        |

Для каждой линии характерна различная чувствительность к внешним нагрузкам. Так, вероятность отказа у старой линии почти втрое выше, чем у модернизированной, при одинаковых условиях.

Для более наглядного представления используется диаграмма (рисунок 1), на которой по оси Х отложены погодные сценарии, а по оси Y — значения риска. Каждая линия представлена своим цветом. Такой подход позволяет быстро выявить слабые места и обосновать приоритетность технических мероприятий.

Кроме того, возможно построение «тепловой карты» (heatmap), где оси задаются параметрами нагрузки (например, толщина наледи и скорость ветра), а цвет — уровнем риска. Такие карты позволяют анализировать чувствительность модели и выявлять зоны наибольшей опасности.

Представленные результаты демонстрируют практическую применимость предложенной модели и её ценность для инженерных служб, планирующих эксплуатацию и ремонт ЛЭП в зимний период.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложена практическая модель оценки риска повреждений воздушных линий электропередачи в зимний период.

Метод основан на вероятностном сравнении внешней климатической нагрузки и предельной прочности конструктивных элементов ЛЭП. Такой подход позволяет учитывать неопределённость как в погодных условиях, так и в техническом состоянии линий.

Проведённые расчёты и визуализация показали, что вероятность повреждений резко возрастает при сочетании экстремального гололёда и сильного ветра, особенно для старых и немодернизированных линий.

Модель позволяет не только количественно оценивать риск для различных сценариев, но и сравнивать технические решения по снижению аварийности.

Предложенная методика может быть использована инженерными службами для приоритизации профилактических мероприятий, оптимизации планов ремонта, а также обоснования необходимости модернизации линий в климатически неблагоприятных регионах.

В дальнейшем модель может быть расширена за счёт учёта погодных прогнозов и географических особенностей маршрутов ВЛЭП.

## Список литературы:

1. ПУЭ. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. – М.: Энергосервис, 2020. – 720 с.
2. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\* – М.: Минстрой России, 2017. – 185 с.
3. ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: Стандартинформ, 2012. – 34 с.
4. Дьяконов В.П. Надёжность технических систем и сооружений. – М.: Машиностроение, 2009. – 376 с.
5. Малышев Н.А., Кожевников И.А. Прогнозирование аварийности воздушных линий электропередачи в условиях гололёда // Электрические станции. – 2018. – № 2. – С. 42–47.