УДК 630

И.А. Саютина

I.A. Sayutina

СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, ОБРАЗОВАННЫХ ВОЗДУШНЫМИ ЛИНИЯМИ

METHODS FOR ASSESSING THE FIRE HAZARD OF ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS COMPRISING OVERHEAD LINES

Аннотация. Распределительные воздушные линии электропередачи напряжением 6–35 кВ представляют собой специфический объект пожарной опасности. Специфика линий в том, что они проходят через лесные и степные массивы, имеют низкие габариты и работают в режиме изолированной нейтрали, допускающем длительное существование однофазного замыкания на землю. Существующие подходы к оценке пожарной опасности таких линий либо заимствованы из практики магистральных ЛЭП, либо ограничиваются качественным описанием факторов без выхода на количественные показатели. Но для линий 6 – 35 кВ ключевым параметром является не мощность источника зажигания, а длительность существования замыкания.

Abstract. Overhead distribution power lines with a voltage of 6–35 kV represent a specific fire hazard, as they pass through forest and steppe areas, are situated at relatively low heights, and operate with an isolated neutral—a configuration that allows a single-phase-to-ground fault to persist for an extended period. Existing approaches to assessing the fire risk of such lines are either adapted from practices used for high-voltage transmission lines or are limited to qualitative descriptions of risk factors without providing quantitative metrics. However, for 6–35 kV lines, the critical parameter is not the power of the ignition source, but rather the duration of the fault, which is determined by the sensitivity of the protection systems and the neutral grounding regime.

Введение

Оценка пожарной опасности воздушных линий электропередачи традиционно строится вокруг двух полюсов: либо это статистика инцидентов, либо нормативные требования к габаритам и охранным зонам, однако основной проблемой такого подхода является отсутствие конкретики, в понимании, где именно и при каких климатических условиях, появляется риск возникновения ландшафтного пожара.

Статистика фиксирует уже случившееся, а нормативы задают минимальные расстояния, но не учитывают, что сухая трава под линией готова вспыхнуть от малейшей частицы. Для распределительных линий эта проблема стоит особенно остро, с одной стороны, они не являются стратегическими объектами и реже попадают в фокус исследователей, чем магистральные ЛЭП, с другой – именно распределительные линии чаще проходят через лесные массивы, имеют меньшие габариты и чаще становятся причиной возгораний в расчёте на километр длины, чем линии высокого напряжения.

Матричный подход

Матричный подход, представленный в научной работе Д. А. Огурцова «Матрица факторов пожарной опасности воздушных линий электропередачи как основа для моделирования риска», определяет представление пожара как результат взаимодействия трёх компонентов: источника зажигания, горючей среды, условий распространения горения. При определенной последовательности взаимодействий данных компонентов происходит закономерное протекание процессов, на чем и базируется основная логика представленного метода.

В представленной работе данного метода отображены двадцать четыре сценария, которые формируют в себе комбинации между собой трех компонентов, а те, в свою очередь, имеют собственную классификацию. Источники зажигания дифференцируются по типу: однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) и межфазное замыкание (МФЗ), горючая среда классифицируется по составу и способности к тлению, условия распространения описываются через класс пожарной опасности погоды и скорость ветра. Каждому сценарию присваивается уровень риска от R1 до R4, где R4 критический уровень. Такой подход позволяет увидеть, что один и тот же источник зажигания, например ОЗЗ, при разных условиях может давать совершенно разный результат от тления без последствий, до перехода в пожар.

Для линий 6–35 кВ этот подход ценен и универсален тем, что позволяет отделить ряд сценариев ОЗЗ с высоким переходным сопротивлением от МФЗ с выбросом раскалённых частиц. В этом случае происходит мгновенный выброс энергии, от которого сухая трава вспыхивает.

Вероятностное моделирование

Примером вероятностного моделирования может служить оценка риска лесных пожаров от распределительных линий 10 кВ в южном Аньхое, Китай. Показательно, что авторы выбрали именно этот регион, поскольку там распределительные сети проходят через густые леса, а статистика пожаров от ЛЭП фрагментарна.

Сам метод вероятности моделирования, сочетает анализ иерархий для взвешивания факторов и байесовскую сеть как расчет вероятности. В качестве исходных данных использовались не многолетние ряды пожаров, а материалы полевых обследований и истории эксплуатации, состояние изоляции, расстояние до деревьев, наличие горючего мусора под линией, ширину просек. Результат определял вероятность пожара на уровне региона и выявлял линии, требующие первоочередных мер.

Применимость этого метода к российским условиям ограничена, поскольку байесовская сеть строится под конкретную территорию, а перенос модели требует пересчёта взаимосвязанных условий и климатической закономерности. Кроме того, метод не учитывает физику теплового процесса он оценивает вероятность события, но не условия, при которых событие переходит в устойчивое горение.

Физический расчёт тепловой динамики в точке контакта

Наиболее приемлемым способом оценки является расчёт нагрева в месте замыкания провода на грунт или растительность. Такой расчет напрямую связан с особенностью линий 6 – 35 кВ – длительное существование ОЗЗ. Если матрица и байесовская сеть работают с вероятностями и категориями, то тепловой расчёт работает с физикой: сколько тепла выделяется, сколько рассеивается, когда наступает порог воспламенения.

Модель расчета строится на уравнении теплопроводимости с учётом выделяемой мощности и потери на испарение влаги. Ключевые пороговые значения: при температуре около 100–200 °C влага в почве и растительности испаряется, а при достижении примерно 450 °C начинается воспламенение органики. Если выделяемая мощность превышает тепловые потери, процесс идёт по восходящей и без отключения линии его остановить нельзя.

Ограничение метода в том, что необходимо знать переходное сопротивление в точке контакта, которое зависит от типа грунта, влажности и площади касания и в полевых условиях редко бывает известным. Такой перечень накладывает индивидуальность к территориальному расположению сети и на практике его приходится либо оценивать по косвенным признакам, либо задавать диапазоном.

Заключение

Пожароопасность распределительных электрических сетей, образованных воздушными линиями, не может быть сведена к одному конкретному методу оценки, поскольку всегда нужно учитывать индивидуальность климатических условий и территориальное местонахождения.

Наиболее перспективным направлением представляется гибридность представленных методов: использование матрицы для выделения потенциально опасных участков, байесовской сети для оценки вероятности и тепловой модели для расчёта временных окон.

Список использованной литературы

1. Огурцов Д. А. Матрица факторов пожарной опасности воздушных линий электропередачи как основа для моделирования риска // Техносферная безопасность. — 2026. — Т. 10, № 1. — С. 7–18
2. Тепловая динамика при однофазном замыкании на землю в сетях 6–35 кВ // Сборник материалов конференции КузГТУ. — 2025
3. Ландшафтные пожары часто возникают из-за коротких замыканий на линиях электропередачи // Technosphere Safety : журнал. – URL: https://www.bps-journal.ru/jour/article/download/528/583 (дата обращения: 24.10.2026). – Текст : электронный. – Яз. англ.
4. Jiang Hongrui, Zhang Jiaqing, Ding Long, Zhang Binbin, Sun Tao, Ji Jie. Региональная оценка риска лесных пожаров, вызванных распределительными линиями // Journal of University of Science and Technology of China. — 2024. — Vol. 54, no. 12. — P. 50–61. — DOI: 10.52396/JUSTC-2023-0115.