

УДК 614.842

Д.А. Огурцов, инженер

Южно-Уральский государственный университет (НИУ) г. Челябинск

D.A. Ogurtsov, engineer

South Ural State University, Chelyabinsk.

УСТОЙЧИВЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОЗЗ В СЕТЯХ 6–35 кВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

SUSTAINABLE THERMOELECTRIC PROCESSES IN OZZ IN 6-35 KV NETWORKS WITH AN ISOLATED NEUTRAL

Аннотация.

В статье рассматривается пожарная опасность при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в воздушных линиях 6–35 кВ с изолированной нейтралью. Выполнен теоретический анализ термоэлектрических процессов с использованием уравнений теплопроводности и расчета тепловыделения. Проведено сравнение отечественных норм ПУЭ с международными стандартами IEEE и IEC. Предложен переход к риск-ориентированному подходу к профилактике, основанному на категорировании линий и проведению превентивных профилактических мероприятий.

Ключевые слова:

Однофазное замыкание на землю, изолированная нейтраль, термоэлектрические процессы, пожарная опасность

В сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью после ОЗЗ сохраняется неизмененным вектор фазовых напряжений (напряжение между неповрежденными фазами не меняется), при этом фазные напряжения оставшихся фаз возрастают в $\sqrt{3}$ раз. Ток замыкания определяется, в основном, емкостной составляющей сети и достигает лишь десятков ампер, что позволяет линии продолжать работу после первого замыкания. Однако длительное течение ОЗЗ может привести к сильному нагреву места контакта провода с землей, что создает пожарную опасность. Особенно актуально это в жаркую и сухую погоду при высоком риске распространения огня.

Цель работы – проанализировать физику и теплоэлектрические процессы при самоподдерживающемся ОЗЗ, их влияние на воспламенение растительности и грунта, и предложить модели прогнозирования и методы предотвращения пожароопасных ситуаций.

При ОЗЗ в изолированной нейтрали ток замыкания протекает через рабочие ёмкости фаз относительно земли и переходное сопротивление

контакта. Его величина примерно равна суммарному емкостному току, по формуле 1:

$$I_c = 2\pi f C_{\Sigma} U_{\phi} \quad (1)$$

где C_{Σ} – эквивалентная емкость фаз относительно земли.

U_{ϕ} – фазное напряжение сети

Для типичных линий 6–10 кВ емкостной ток не превышает десятков ампер. При этом фазное напряжение в месте замыкания приобретает зависимость от переходного сопротивления и при высоком переходном сопротивлении (сотни Ом) может оставаться значительным, вызывая протекания токов через объекты в точке замыкания.

В условиях эксплуатации воздушных линий электропередачи в России особую опасность представляют длительные ОЗЗ, так как согласно требованиям ПУЭ (Правила устройства электроустановок), допускается работа сетей 6–35 кВ с изолированной нейтралью в режиме однофазного замыкания на землю, что продиктовано необходимостью обеспечения непрерывности электроснабжения потребителей. Однако низкая чувствительность селективных защит не позволяет надежно обнаруживать повреждения с высоким переходным сопротивлением, характерные для контакта провода с грунтом или растительностью. Протяженность воздушных линий, проходящих через лесные массивы в труднодоступных районах, значительно затрудняет оперативную локализацию места повреждения, создавая условия для длительного существования ОЗЗ и накопления тепловой энергии в точке контакта.

При этом важную роль играет переходное сопротивление в точке контакта провод–земля. Типичные почвенные сопротивления высоки (сотни Ом·м и более), особенно в сухую погоду. При касании проводом грунта электрическое сопротивление канала возвращающего тока определяет тепловыделение по формуле 2:

$$P = I^2 R \quad (2)$$

Причем небольшая площадь контакта может приводить к сильному локальному нагреву. Следовательно, при длительном ОЗЗ даже сравнительно малый ток способен создать зачастую высокую температуру в месте контакта и вокруг него. Таким образом вероятность возникновения пламени во многом зависит от баланса между выделяемой мощностью и тепловыми потерями в окружающую среду.

Термическая динамика при ОЗЗ

При контакте провода с землей в месте замыкания происходит резкое локальное выделение тепла. Уравнение теплопроводности описывает изменение температуры по формуле 3:

$$\rho_m c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + J^2 \rho_e(T) \quad (3)$$

где k – теплопроводность почвы,

$\rho_m c$ – теплоемкость почвы,

J – плотность тока,

$\rho_e(T)$ – электрическое удельное сопротивление проводника (в точке контакта).

Кроме теплопроводности в грунте важны конвекция и испарение влаги на поверхности. Особо следует отметить, что при нагреве до ≈ 100 – 200 °C вода в почве и в структуре растительности начинает интенсивно испаряться, а при достижении ≈ 450 °C возникает самовоспламенение органики [3].

На начальной стадии ОЗЗ происходит тление: в нескольких десятках сантиметров вокруг контакта температура может достигать ~ 300 °C без видимого пламени. При дальнейшем нагреве (около 450 °C) начинается образование открытого пламени (стадия испарения влаги, далее – углеродизации и перехода в устойчивую пламенную дугу). Промежуточной границей между устойчивым и неустойчивым нагревом является момент, когда выделяемая мощность $I^2 R$ становится равна сумме тепловых потерь (проводимости, излучения и испарения). Если $I^2 R$ ниже критического, температура устанавливается на невысоком уровне (не происходит воспламенения), а если превыше – тепловой процесс идёт по восходящей и зафиксировать его без отключения невозможно.

В итоге, на пожарную опасность влияют такие параметры, как величина тока ОЗЗ, продолжительность протекания тока, климатические условия (влажность почвы, температура окружающего воздуха) и тип растительности.

Развитие пожара от ОЗЗ обусловлено тремя факторами: температура источника, длительность теплового воздействия и горючесть материалов.

В справочной литературе указано, что для горючей растительности (трава, листья, хвоя) температура воспламенения обычно составляет 250–450 °C, в зависимости от влажности и вида топлива [1].

В частности, эксперименты демонстрируют, что при контакте провода с растительностью возникающие локальные температуры около 300 °C вызывают термическую разложение органики, а при ~ 450 °C – открытое воспламенение. Для органогумусового слоя почвы температуру самовоспламенения оценивают в ~ 210 – 270 °C [2].

Исследования EPRI показали, что разогретый до высокой температуры обрывной провод, лежащий на траве, может зажечь её уже при токах порядка сотен миллиампер–единиц ампер, поскольку при этом выделяется достаточная энергия для воспламенения [3].

Так, в США энергетики отмечают, что между 2016 и 2020 годами около 19 % лесных пожаров были связаны с электрическими сетями. В Австралии анализ Викторианского энергетического совета показал, что пожары от электросетей составляют несколько процентов от общего числа лесных возгораний; а доля в регионе Виктория составила лишь ~2.7 % [4].

В России официальная позиция Минэнерго – «повреждения ЛЭП не являются основной причиной лесных пожаров» за счет наличия быстродействующих устройств релейной защиты и автоматики, отключающих линию при коротком замыкании в срок не более одной секунды. Однако, это утверждение справедливо для воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) напряжением 110 кВ и выше, где применяются эффективные системы защиты от коротких замыканий [5].

В разных странах подходы к нейтрали сетей и защите от ОЗЗ заметно различаются. Согласно нормам ПУЭ (раздел 3.2), линии 6–10 кВ с изолированной нейтралью обязательно оборудуются сигнализацией однофазных замыканий на землю. При этом ПУЭ регламентирует чувствительность трансформаторов тока и схемы защиты (обычно направленной или векторной), но не указывает жестких ограничений по времени отключения, полагаясь на автоматику. В российских сетях 6–35 кВ из-за изоляции нейтрали многие предприятия допускают работу после первого ОЗЗ до устранения аварии. Одновременно национальные стандарты ограничивают суммарный емкостной ток (например, не более ~30 А при 6 кВ), чтобы не превышать возможности защитных устройств.

За рубежом (IEEE, IEC) распространены схемы активного заземления: в США и Канаде обычно применяют глухозаземленную или низкоомную нейтраль (см. IEEE Std 142–2007), что обеспечивает большой ток ОЗЗ и мгновенное срабатывание защиты. В Европе и Китае часто используют резонансное заземление для компенсации емкостного тока. IEEE отмечает, что в изолированной нейтрали дуга при ОЗЗ часто не гаснет самостоятельно, поэтому применяют дополнительные системы подавления дуги. Международные стандарты IEC (например, IEC 60364) и IEEE рекомендуют минимизировать время протекания ОЗЗ (автоматическое отключение в 0.2–1 с) во избежание длительного горения.

Предотвращение пожароопасных ситуаций при длительных ОЗЗ требует комплексного подхода, включающего техническое оснащение, организационные меры и нормативное регулирование. Основные направления профилактики базируются на раннем обнаружении замыканий, ограничении токов и времени их протекания.

Риск-ориентированный подход предполагает категорирование линий на основе интегральной оценки параметров: величины емкостного тока сети, протяженности линии через лесные массивы, типа растительности в охранной зоне, климатических характеристик региона (среднегодовая температура, продолжительность засушливых периодов), состояния

изоляции и опор, частоты регистрации ОЗЗ в предыдущие периоды. Линии высокой категории риска должны оснащаться чувствительными защитами с порогом срабатывания 3–5 А и временем отключения не более 1 с, подлежать внеочередному тепловизионному контролю и приоритетной расчистке трасс.

Разработка такой методики требует создания математической модели термоэлектрических процессов с учетом реальных параметров линий и экспериментальной верификации критических условий воспламенения для различных типов грунтов и растительности. Внедрение риск-ориентированного подхода позволит оптимизировать распределение ресурсов на профилактические мероприятия и снизить вероятность возникновения пожаров от воздушных линий 6–35 кВ

Проведенный анализ термоэлектрических процессов при однофазных замыканиях на землю в сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью подтверждает существенную пожарную опасность длительных ОЗЗ. Установлено, что даже при относительно небольших токах замыкания локальное тепловыделение в точке контакта провод-земля способно достигать критических температур воспламенения растительности и органического слоя почвы. Сравнительный анализ отечественных и международных норм выявил необходимость совершенствования систем защиты и диагностики в российских распределительных сетях. Предложенный риск-ориентированный подход к категорированию линий позволит оптимизировать профилактические мероприятия и снизить вероятность возникновения пожаров. Дальнейшие исследования должны быть направлены на экспериментальную верификацию математических моделей термоэлектрических процессов и разработку методики оценки пожарного риска для конкретных климатических условий и типов линий.

Список литературы

1. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочник: в 2-х ч. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Пожнаука, 2004. — Ч. 1. — 713 с.; Ч. 2. — 774 с
2. A. Fahmi, R. A. Kaafarani, L. T. Al-Azhar и др. «Self-ignition temperature of peat and its implication in fire spread», *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1198, 2022, pp. 042021. DOI:10.1088/1742-6596/1198/4/042021.
3. EPRI. *Ignition Scenarios and Solution Options*, Technical Brief DRC-1, EPRI, 2022
4. Department of Energy, Environment and Climate Action (DEECA). Electricity Safety (Bushfire Mitigation) Regulations 2023: Regulatory Impact Statement. Melbourne: State Government of Victoria, 2023.
5. В Минэнерго заявили, что повреждения ЛЭП не являются основной причиной лесных пожаров // ТАСС. 2022. 11 мая. URL: <https://tass.ru/obschestvo/14599121> (дата обращения: 14.10.2025).

Reference

1. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing agents: Handbook: in 2 parts — 2nd ed., revised. and additional — M.: Pozhnauka, 2004. — Part 1. — 713 p.; Part 2. — 774 p
2. A. Fahmi, R. A. Kaafarani, L. T. Al-Azhar et al. "Self-ignition temperature of peat and its implication in fire spread", IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 1198, 2022, pp. 042021. DOI:10.1088/1742-6596/1198/4/042021.
3. EPRI. Ignition Scenarios and Solution Options, Technical Brief DRC-1, EPRI, 2022
4. Department of Energy, Environment and Climate Action (DEECA). Electricity Safety (Bushfire Mitigation) Regulations 2023: Regulatory Impact Statement. Melbourne: State Government of Victoria, 2023.5.
5. The Ministry of Energy stated that damage to power lines is not the main cause of forest fires // TASS. 2022. May 11. URL: <https://tass.ru/obschestvo/14599121> (date of request: 14.10.2025).