

DOI: 10.71527/EP.EN.2026.04.009

УДК 621.311

EDN: ETQKWE

Инженерная методика обоснования применения дуговой защиты в распределительных устройствах 0,4 кВ¹

Дуговые короткие замыкания в низковольтных распределительных устройствах (РУ-0,4 кВ) относятся к наиболее разрушительным авариям: помимо электрических воздействий они формируют термодинамический удар — быстрый рост температуры и давления в замкнутых объемах.

В статье предложена инженерная методика, позволяющая быстро и однозначно определить необходимость дуговой защиты для подстанций 0,4 кВ в зависимости от мощности силового трансформатора. Методика включает расчёт токов КЗ на шинах 0,4 кВ, аналитическую оценку роста температуры и давления в отсеках (объёмы вводного отсека — 1 м³ и шинного отсека — 6 м³) в интервале 5 – 300 мс, учёт наличия клапанов сброса давления с использованием барического коэффициента, вывод формулы требуемого быстродействия ликвидации дуги и экономическое обоснование применения универсального устройства дуговой защиты ЛАИМ-2.0.

Физика дугового короткого замыкания и опасные факторы

Электрическая дуга — это устойчивый плазменный канал между токоведущими частями. В условиях РУ-0,4 кВ дуга возникает при повреждении изоляции, ослаблении контактных соединений, попадании посторонних предметов, ошибках при обслуживании и т. п.

Опасность дуги обусловлена не только тепловым воздействием на проводники и изоляцию, но и быстрым нагревом воздуха и продуктов испарения металла, что приводит к росту давления и механическим разрушениям [1, 2].

Экспериментальные данные и практические испытания внутренних дуг в оболочках распределительных устройств показывают, что критические последствия могут наступать за десятки микросекунд, тогда как типовое время отключения вводных автоматов с селективными задержками часто составляет сотни микросекунд [2, 3].

Инженерная оценка температуры плазмы дуги

Температура плазмы дуги в электроустановках обычно находится в диапазоне 6000 – 20 000 °С. Для инженерной оценки порядка величины энергии можно определить через мощность дуги и характерные параметры этого явления. Мощность дуги вычисляется по формуле

$$P_d = U_d I_{K3},$$

где P_d — мощность дуги, Вт; U_d — напряжение дуги, В; I_{K3} — ток дуги при коротком замыкании, А.

Для РУ-0,4 кВ часто принимают $U_d \approx 250 \div 350$ В (в предлагаемой методике $U_d \approx 300$ В) [1]. При токе $I_{K3} = 30$ кА получаем мощность дуги $P_d \approx 9$ МВт. При выполнении расчётов исходя из закона Стефана – Больцмана и с учётом излучательной способности плазмы дуги при такой высокой мощности, вы-

деляемой в небольшом объёме, плотность теплового потока может достигать 100 – 1000 МВт/м²:

$$q = \sigma T^4,$$

где q — плотность теплового потока, Вт/м²; σ — постоянная Стефана – Больцмана; T — температура, К.

При плотности теплового потока 100 – 1000 МВт/м² определяется температура плазмы порядка 10 000 – 15 000 °С, что согласуется с известными экспериментальными данными по дуговым разрядам [1, 4].

Важно: для расчёта последствий дугового замыкания в электротехническом шкафу интересуют не температура плазмы как таковая, а то, насколько быстро энергия дуги преобразуется в рост температуры и давления воздуха в отсеках.

Расчёт токов короткого замыкания на шинах 0,4 кВ

Для первичного обоснования дуговой защиты достаточно оценить ожидаемый ток КЗ на шинах 0,4 кВ от питаемого силового трансформатора. Для трёхфазного КЗ на стороне НН трансформатора используют выражение [5]:

$$I_{K3} = S_{тр} / (3U \cdot U_{K3}),$$

где I_{K3} — ток короткого замыкания на шинах, А; $S_{тр}$ — номинальная мощность трансформатора, В·А; U — линейное напряжение, В (для шин 0,4 кВ принимается линейное напряжение 400 В); U_{K3} — напряжение короткого замыкания трансформатора.

Для распределительных трансформаторов U_{K3} обычно находится в диапазоне 4 – 6 % номинального напряжения, что соответствует данным производителей и справочным материалам по расчёту КЗ [5]. Далее в расчётах принимается $U_{K3} = 0,05$ В.

Анализ данных из табл. 1 показывает, что уже при $S_{тр} \geq 630$ кВ·А токи КЗ на шинах 0,4 кВ переходят в диапазон десятков килоампер, а значит энергия дуги при задержках отключения порядка 0,1 – 0,3 с становится разрушительной [2].

¹ На правах рекламы.

Статья поступила 26 марта 2026 г., принята к опубликованию 1 апреля 2026 г.

Таблица 1

Расчётные токи КЗ на шинах 0,4 кВ при $U_{КЗ} = 0,05$ В

Мощность трансформатора, кВА	Ток КЗ, кА
250	7
400	11
630	18
1000	29
1600	46
2500	72

Энергия дуги и распределение энергии в электротехническом шкафу

Энергия, выделяемая дугой за время t , определяется как произведение мощности дуги на время. Для практической оценки вводится коэффициент η , отражающий долю энергии, которая идёт на нагрев воздуха в отсеке. Тогда [1]

$$Q = \eta U_{д} I_{кз} t,$$

где Q — тепловая энергия, переданная воздуху, Дж; η — коэффициент тепловыделения в воздух (в предлагаемой методике принимается $\eta = 0,35$); $U_{д}$ — напряжение дуги, принятое 300 В; t — длительность электрической дуги, с.

Даже если часть энергии, выделяемая дугой, уходит на нагрев, испарение металла и излучение, с точки зрения безопасности достаточно оценивать «опасную» долю, нагревающую воздух, — именно она прямо влияет на рост температуры и давления в электротехническом шкафу и может привести к разлёту дверей или панелей и травмированию персонала [2, 3].

Аналитический расчёт температуры воздуха в отсеке

Рост температуры воздуха в отсеке электротехнического шкафа определяется на основании закона сохранения энергии:

$$T(t) = T_0 + (\eta U_{д} I_{кз} t) / (\rho V c_{в}),$$

где $T(t)$ — температура воздуха, °С; T_0 — начальная температура воздуха в отсеке (принято 20 °С); ρ — плотность воздуха (принято 1,2 кг/м³); V — объём отсека, м³; $c_{в}$ — теплоёмкость воздуха (принято 1000 Дж/кг·К).

Вывод: температура воздуха растёт линейно со временем и током дуги, и обратно пропорциональна объёму отсека. Поэтому наиболее опасен, с точки зрения быстрого перегрева, малый объём отсека.

Аналитический расчёт давления и барический коэффициент

Для оценки давления используется уравнение состояния идеального газа. При постоянном объёме отношение давлений пропорционально отношению абсолютных температур с поправкой на барический коэффициент:

$$P(t) = k_{б} P_0 (T(t) / T_0),$$

где $P(t)$ — абсолютное давление в момент времени t в отсеке, атм (абс.); P_0 — начальное атмосферное давление (1 атм); $T(t)$ — абсолютная температура воздуха в момент времени t , К; T_0 — начальная абсолютная температура, К; $k_{б}$ — барический коэффициент, учитывающий наличие клапанов сброса давления.

Барический коэффициент вводится потому, что часть электротехнических шкафов оснащают клапанами/мембранами сброса давления. Однако их эффективность ограничена инерцией срабатывания (время открытия — десятки миллисе-

кунд), а также тем, что основная часть энергии может быть передана воздуху до полного открытия, и направление плазменной струи не всегда совпадает с зоной клапанов [2]. Для отсеков с клапанами сброса давления в инженерной практике принято использовать коэффициент $k_{б} = 0,75$. Данный показатель означает, что благодаря работе клапанов пиковое давление снижается на 25 % по сравнению с давлением в герметичном отсеке, где $k_{б} = 1,0$.

Таким образом, наличие клапанов в электротехническом шкафу приводит к снижению расчётного давления не более чем на 25 %. Такой подход обоснован тем, что при расчётах не предполагается «идеальная» работа клапанов, и время задержки учитывается при их срабатывании.

Критерии безопасности и требуемое быстродействие ликвидации дуги

В предлагаемой методике используются два простых и практичных критерия безопасности:

- температура воздуха в отсеке электротехнического шкафа не должна превышать 120 °С;
- абсолютное давление в отсеке электротехнического шкафа не должно превышать 2 атм (то есть избыточного давления, равного 1 атм). Критерий давления соответствует уровню, при котором возможны разрушения оболочки электротехнического шкафа и выброс продуктов дуги [2, 3].

$$T_6 = 120^{\circ}\text{C}; P_6 = 2 \text{ атм (абс.)},$$

где T_6 — безопасная температура в отсеке электротехнического шкафа, а P_6 — безопасное абсолютное давление.

С учётом критерия безопасности по температуре $T(t) = T_6$ получаем допустимое время существования дуги по температуре t_T , с:

$$t_T = (\rho V c_{в} (T_6 - T_0)) / (\eta U_{д} I_{кз}).$$

Из критерия безопасности по давлению $P(t) = P_6$ получаем допустимое время существования дуги по давлению, t_P , с:

$$t_P = (\rho V c_{в} T_0) / (\eta U_{д} I_{кз}) (P_6 / (k_{б} P_0) - 1),$$

где T_0 — начальная температура в отсеке, К; $P_0 = 1$ атм.

Требуемое время ликвидации дугового замыкания (допустимое время существования дуги) выбирается как минимальное из двух ограничений:

$$t_{д} = \min(t_T, t_P).$$

Для практического применения методики приняты типовые объёмы отсеков электротехнического шкафа: вводной отсек $V = 1$ м³ и шинный отсек $V = 6$ м³. Расчёт выполнен в диапазоне

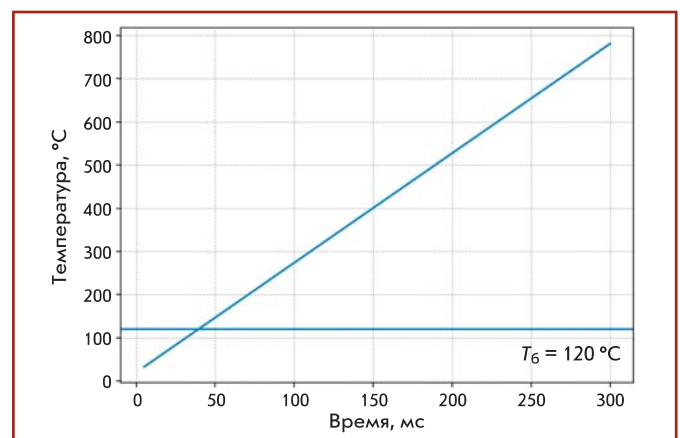


Рис. 1. Температура воздуха во вводном отсеке электротехнического шкафа ($V = 1$ м³)

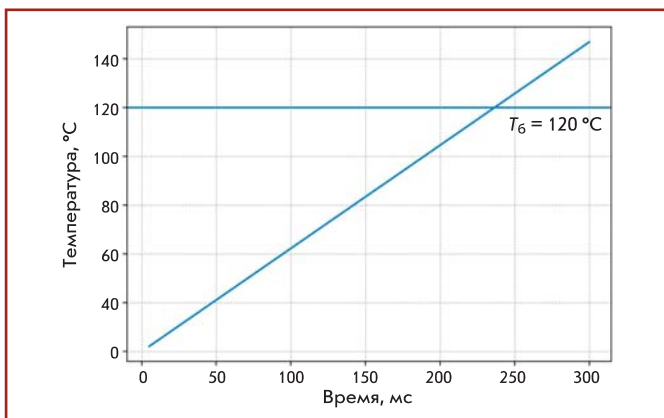


Рис. 2. Температура воздуха в шинном отсеке электротехнического шкафа ($V = 6 \text{ м}^3$)

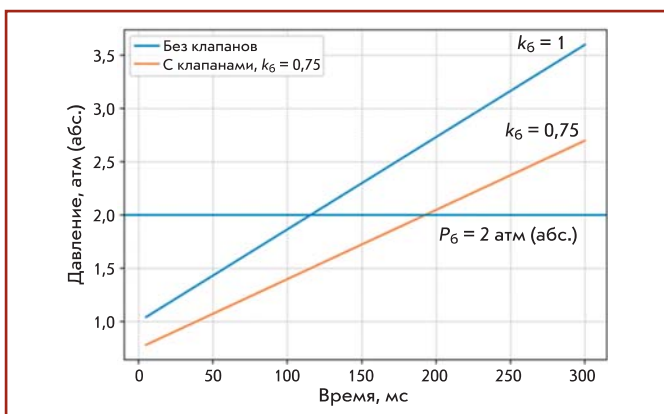


Рис. 3. Давление во вводном отсеке электротехнического шкафа ($V = 1 \text{ м}^3$) при $k_b = 0,75$ и $k_b = 1$

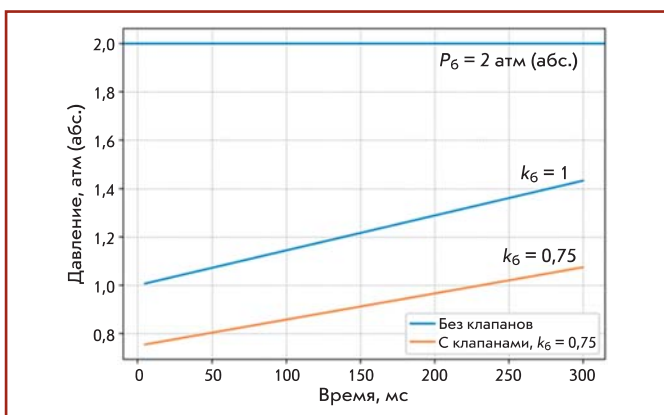


Рис. 4. Давление в шинном отсеке электротехнического шкафа ($V = 6 \text{ м}^3$) при $k_b = 0,75$ и $k_b = 1$

времени 5–300 мс для характерного тока КЗ $I_{КЗ} \approx 29 \text{ кА}$ (трансформатор 1000 кВ·А при $U_{КЗ} = 0,05 \text{ В}$). На рис. 1 и 2 представлены графики с темпом нарастания температуры воздуха во вводном отсеке объёмом $V = 1 \text{ м}^3$ и шинном отсеке объёмом $V = 6 \text{ м}^3$.

На рис. 3 и 4 приведены графики с темпом нарастания давления воздуха во вводном отсеке объёмом $V = 1 \text{ м}^3$ и шинном отсеке объёмом $V = 6 \text{ м}^3$ при условии наличия клапана, $k_b = 0,75$, или его отсутствия, $k_b = 1$.

Анализ данных, представленных на рис. 1–4 показывает, что вводной отсек электротехнического шкафа имеет существенно меньший объём и по этой причине в нём происходит наиболее быстрый рост температуры и давления в случае

возникновения электрической дуги. Данный вывод подтверждается практическим опытом эксплуатации электроустановок: именно вводные отсеки, содержащие автоматические выключатели и контакты ввода, являются критическими с точки зрения возможных последствий дугового замыкания.

Шинный отсек электротехнического шкафа обладает значительно большим объёмом, что теоретически позволяет увеличить допустимое время существования дуги без достижения критических параметров. Однако при больших токах короткого замыкания даже в этом отсеке наблюдается быстрое нарастание температуры и давления воздуха, что требует тщательного учёта при проектировании систем дуговой защиты и расчёте времени срабатывания защитных устройств.

Универсальная инженерная формула определения требований к быстродействию дуговой защиты

Для инженерной оценки требований к быстродействию дуговой защиты на стадии проектирования удобно свести аналитическую зависимость времени существования дуги к простой пропорции $t_d \propto V/I_{КЗ}$. Для принятых значений параметров η , $U_{дг}$, ρ , $c_{вр}$ а также с учётом критериев безопасности по температуре ($T_6 = 120 \text{ °C}$) и давлению ($P_6 = 2 \text{ атм (абс.)}$), получим приближённую формулу для допустимого времени существования дуги, мс:

$$t_d \approx 1100V / I_{КЗ}$$

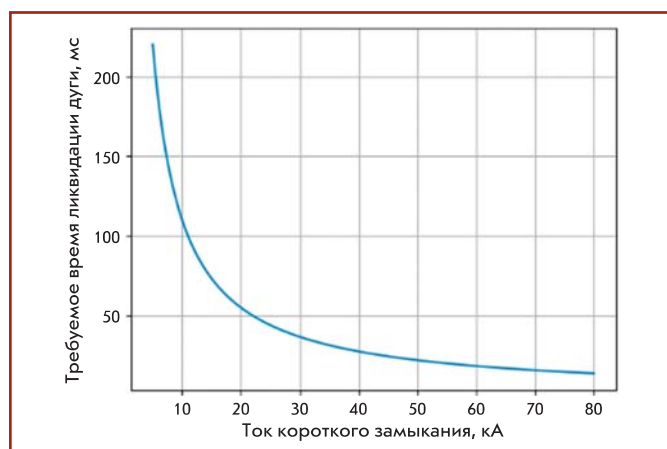


Рис. 5. Требуемое время ликвидации дуги в зависимости от тока КЗ (вводной отсек, $V = 1 \text{ м}^3$)

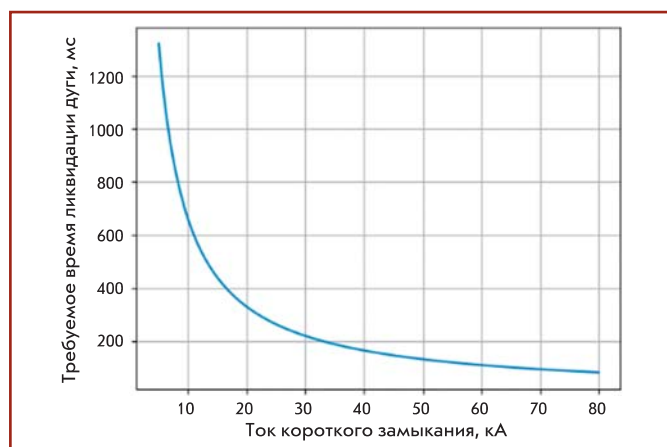


Рис. 6. Требуемое время ликвидации дуги в зависимости от тока КЗ (шинный отсек, $V = 6 \text{ м}^3$)

где V — объём защищаемого отсека, м^3 ; $I_{\text{кз}}$ — ток короткого замыкания, kA .

Таблица 2

Оценка стоимости восстановления оборудования (условный пример)

Статья затрат	Стоимость, руб
Восстановление/замена шкафа НКУ	1 050 000
Замена автоматов/аппаратов	280 000
Кабели, материалы, монтаж	210 000
ПНР и ввод в эксплуатацию	140 000

Формула для расчёта допустимого времени существования дуги $t_{\text{д}}$ удобна для быстрой проверки необходимости дуговой защиты на стадии проектирования. Если реальное время отключения защиты превышает $t_{\text{д}}$, установка дуговой защиты обязательна — это позволит минимизировать возможный ущерб от дугового замыкания.

Графическая иллюстрация зависимости требуемого времени ликвидации электрической дуги от тока короткого замыкания (рис. 4 – 5) для вводного ($V = 1 \text{ м}^3$) и шинного ($V = 6 \text{ м}^3$) отсеков электротехнического шкафа наглядно демонстрирует влияние объёма защищаемого пространства на динамику термодинамических процессов при дуговом замыкании.

Согласно табл. 2 стоимость восстановления оборудования (ремонта):

$$C_{\text{рем}} \approx 1\,680\,000 \text{ руб.}$$

Учёт селективности вводных автоматов

В РУ-0,4 кВ широко применяются селективные схемы: отходящие автоматы/предохранители должны отключать повреждение на линии быстрее вводного автомата, чтобы не обесточивать всю секцию шин. Поэтому вводной автомат часто имеет временную задержку токовой защиты (150 – 300 мс, а в ряде схем — до 500 мс). Это корректно с точки зрения селективности, но плохо с точки зрения дуговой безопасности: дуга за это время успевает выделить энергию, достаточную для разрушения оборудования [3].

Дополнительно учитываются потери от простоя оборудования. Для промышленного потребителя простой оборудования даже 1 – 2 суток зачастую оказывается существеннее затрат на прямой ремонт. В методике используется консервативная оценка простоя 1 000 000 руб (конкретное значение зависит от отрасли и может быть выше).

Общий ущерб оценивается выражением:

$$C = C_{\text{рем}} + C_{\text{простоя}} \approx 1\,680\,000 + 1\,000\,000 = 2\,680\,000 \text{ руб.}$$

Стоимость системы дуговой защиты ЛАЙМ-2.0 с тремя датчиками составляет 30 000 руб.

Тогда коэффициент предотвращённого ущерба:

$$K = C / C_{\text{лайм}} \approx 2\,680\,000 / 30\,000 \approx 89.$$

Следовательно, возникает «конфликт целей»: селективность требует задержки, а дуговая безопасность требует мгновенного отключения. Применение дуговой защиты обеспечивает сверхбыстрое отключение именно при возникновении дуги, не ухудшая селективность токовых защит.

Экономический эффект от внедрения системы дуговой защиты ЛАЙМ-2.0 достигает 90-кратной окупаемости. Это делает внедрение системы экономически оправданным даже при низкой вероятности возникновения дуговой аварии: предотвращение всего одной серьёзной дуговой аварии за весь период эксплуатации обеспечивает многократную окупаемость без учёта полной стоимости владения.

Рекомендованная конфигурация оптических датчиков

Для практической реализации эффективной системы дуговой защиты рекомендуется комбинированная схема контроля: точечные датчики света целесообразно размещать во вводном отсеке электротехнического шкафа, где вероятность возникновения дуги и тяжесть её последствий максимальны, а петлевой оптоволоконный датчик обеспечивает мониторинг протяжённых участков с потенциальным риском дуги: шинного отсека, шинного моста и смежных критических зон. Такой подход обеспечивает полное покрытие защищаемых площадей при минимальной стоимости оборудования и монтажа.

Условия обязательного применения дуговой защиты

Для практики проектирования удобно сформулировать критерии применения дуговой защиты. **Дуговая защита рекомендуется/обязательна**, если выполняется хотя бы одно из условий:

Возможность комбинирования точечных и петлевых датчиков является практическим преимуществом универсального устройства дуговой защиты ЛАЙМ-2.0 для РУ-0,4 кВ, где геометрия отсеков неоднородна.

1. Мощность питаемого трансформатора не менее 630 кВА. При таком значении и стандартном напряжении короткого замыкания 5 % номинального напряжения ожидаемый ток короткого замыкания составит не менее 18 кА. Начиная с этой мощности токи КЗ и энергия дуги при селективных задержках вводных защит переходят в область, где последствия дуги становятся разрушительными за десятки миллисекунд. Если вводной автомат имеет задержку по времени для обеспечения селективности, установка дуговой защиты становится практически неизбежной.

Экономическое обоснование применения универсального устройства дуговой защиты ЛАЙМ-2.0

Экономическое обоснование — один из ключевых факторов при принятии решения заказчиком о необходимости внедрения системы дуговой защиты.

2. Время, за которое выключатель реагирует на короткое замыкание и начинает процесс отключения, должно быть больше времени, которое допустимо для существования дуги в цепи. Это критически важно для предотвращения повреждённого оборудования и обеспечения безопасности системы.

Дуговая авария в РУ-0,4 кВ приводит к серьёзным последствиям: разрушению секции низковольтного комплектного устройства (НКУ) или главного распределительного щита, повреждению автоматических выключателей и кабельных линий, а также к необходимости дорогостоящих восстановительных работ. Ориентировочная стоимость оборудования и проведения работ при таких авариях представлена в табл. 2.

3. Наличие постоянного персонала в зоне потенциальной аварии.

4. Высокие требования к надёжности электроснабжения.

Выводы

1) Для подстанций 6/0,4 и 10/0,4 кВ токи короткого замыкания на шинах 0,4 кВ достигают десятков килоампер (например, ~29 кА для 1000 кВА при $U_{\text{кз}} = 0,05$).

2) Температура плазмы дуги достигает порядка 10 000 – 15 000 °С, при этом критически важен быстрый перенос энергии в воздух отсека, приводящий к росту температуры и давления [1, 4].

3) Графические зависимости показывают, что для отсеков электротехнического шкафа с выключателями объемом около 1 м³ (например, вводной отсек) допустимое время существования дуги составляет десятки миллисекунд, что существенно меньше типовых задержек срабатывания вводных автоматических выключателей, что обуславливает необходимость установки дуговой защиты.

4) Дуговая защита позволяет устранить конфликт между селективностью (задержки вводного аппарата) и безопасностью (требование сверхбыстрого отключения дуги) за счёт её способности оперативно обнаруживать дугу и мгновенно отключать повреждённый участок, не дожидаясь срабатывания стандартных защитных устройств с задержками.

5) Определена универсальная формула определения требования к быстродействию дуговой защиты для РУ-0,4 кВ:

$$t_d(\text{мс}) \approx 1100V(\text{м}^3) / I_{кз}(\text{кА}).$$

6) В результате проведения экономического обоснования применения универсального устройства дуговой защиты ЛАЙМ-2.0 (при стоимости системы дуговой защиты ЛАЙМ-2.0 с тремя датчиками, равной 30 000 руб.) рассчитан коэффициент предотвращённого ущерба порядка 89, что делает внедрение дуговой защиты экономически целесообразным.

7) Разработанная инженерная методика и предложенное устройство дуговой защиты ЛАЙМ-2.0 представляют собой эффективное и экономически обоснованное решение для повышения безопасности и надёжности подстанций 0,4 кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *IEEE 1584–2018. Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations.* — URL: <https://standards.ieee.org/ieee/1584/5802/>.

2. *ГОСТ IEC/TR 61641–2022. Низковольтное комплектное распределительное устройство. Руководство по проведению испытаний на воздействие электрической дуги в месте внутреннего короткого замыкания.* — М.: Изд-во стандартов, 2022. — 24 с.

3. *NFPA 70E. Standard for Electrical Safety in the Workplace by National Fire Protection Association.* — URL: <https://archive.org/stream/gov.law.nfpa.70E.2015/gov.law.nfpa.70E.2015.djvu.txt>.

4. *Lee R. H. The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns // IEEE Transactions on Industry Applications. May 1982. Vol. IA-186. Iss. 3. P. 246 – 251.*

5. *Беляев А. В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ.* — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — 172 с.

**ПИРОГОВ М. Г., генеральный директор
ООО НПП «Микропроцессорные технологии»
г. Новосибирск
mt@i-mt.net
<https://i-mt.net/>**

Вышли в свет в 2025 году следующие выпуски журнала «Библиотечка электротехника» — приложения к журналу «Энергетик»

№ 1. Папков Б. В., Илюшин П. В., Куликов А. Л. **Элементы теории живучести в системах электроэнергетики**

№ 2 – 3. **SMART GRID: интеллектуальные сети — технология и применение.** Часть 2. Технологии измерений, управления и автоматизация. Под ред. Г. Б. Лазарева, А. Н. Новаковского; общ. редакция доктора техн. наук, проф. В. Э. Воротницкого

№ 4. Овсянников А. Г., Арбузов Р. С., Жарич Д. С., Швец Н. А. **Ультрафиолетовый контроль высоковольтного оборудования**

№ 5. Кувшинов А. А., Вахнина В. В., Хренников А. Ю. **Защита силовых трансформаторов от токов геомагнитной индукции (по материалам СИГРЭ-2024).** Часть 1

№ 6. Куликов А. Л., Осокин В. Ю. **Методы определения места повреждения ЛЭП при замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью**

№ 7 – 8. **SMART GRID: интеллектуальные сети — технология и применение.** Часть 3. Силовая электроника и хранение энергии. Под ред. Г. Б. Лазарева, А. Н. Новаковского; общая ред. доктора техн. наук, проф. В. Э. Воротницкого

№ 9. Кувшинов А. А., Вахнина В. В., Хренников А. Ю. **Защита силовых трансформаторов от токов геомагнитной индукции (по материалам СИГРЭ-2024).** Часть 2

№ 10. Дудченко Л. Н. **Управление частотой и активной мощностью агрегатами гидроэлектростанций.** Часть 1

№ 11. Куликов А. Л., Пелевин П. С. **Автоматическое повторное включение высоковольтных кабельно-воздушных линий электропередачи.** Часть 1

№ 12. Куликов А. Л., Пелевин П. С. **Автоматическое повторное включение высоковольтных кабельно-воздушных линий электропередачи.** Часть 2