# Быстродействие дуговой защиты 0,4 и 6-35 кВ

Оценка требуемого быстродействия защиты **для предотвращения капитального ремонта электроустановки** после замыканий, сопровождающихся открытой электрической дугой

# ДУГОВАЯ ЗАЩИТА

## Небольшой эпиграф

Мы — «Микропроцессорные технологии», эксперты в области дуговой защиты. Наши устройства защищают энергетические объекты по всей стране, обеспечивая безопасность персонала и надёжность работы оборудования. Опираясь на передовые технологии и практический опыт, мы разрабатываем решения, которые не просто соответствуют стандартам — они их задают. Огромный багаж экспертных знаний в этой области позволил нам создать наилучшее предложение для наших клиентов. Мы предлагаем не только поставку оборудования, но и комплексный инжиниринг, который включает в себя проектирование, поставку, монтаж, наладку, обучение и сервис 24/7.

Всегда на связи, команда МТ

# Содержание

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

Методика определения допустимого времени отключения дугового замыкания в ячейках 6-35 кВ..... 12



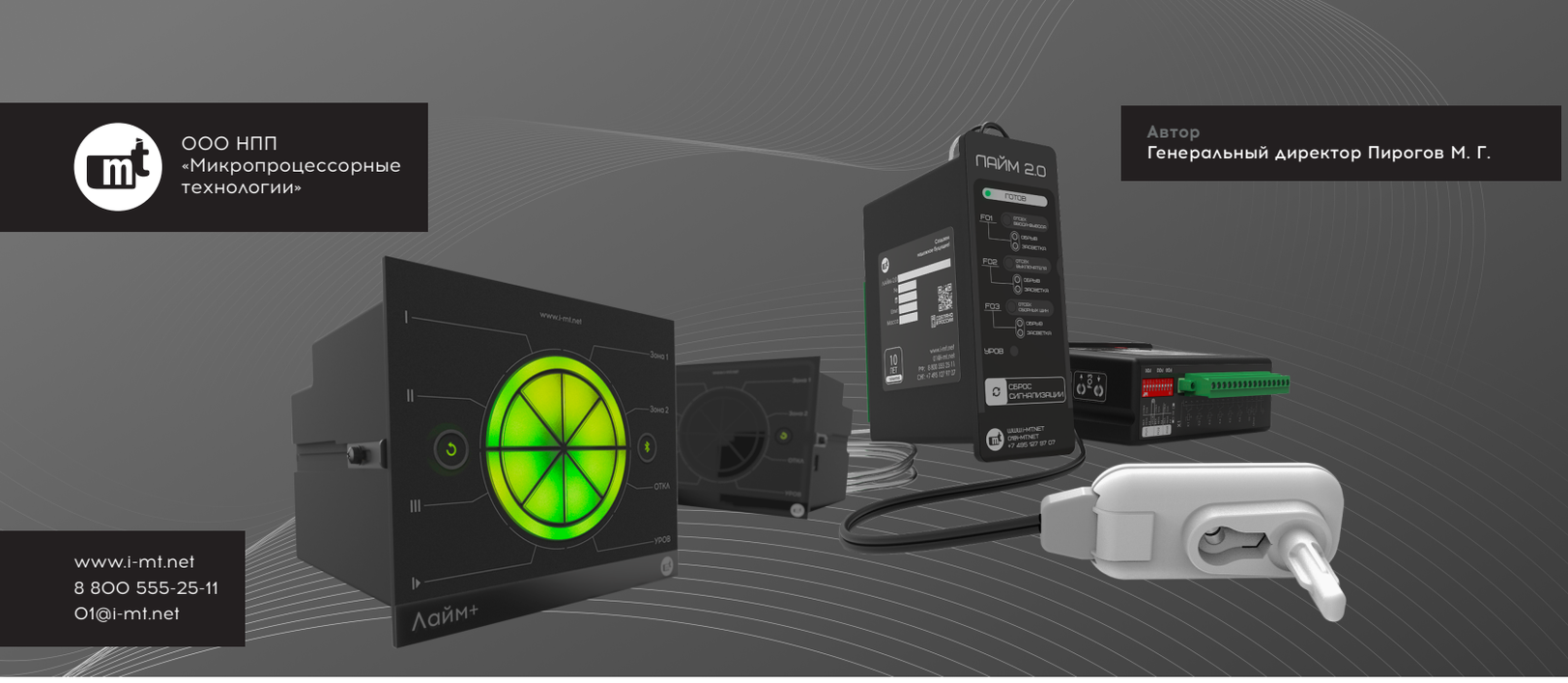
**Михаил Пирогов**
Генеральный директор
ООО НПП «Микропроцессорные технологии»

**VK:** vk.com/pirogovmg
**Почта:** pirogovmg@i-mt.net

СОЗДАЕМ
НАДЕЖНОЕ
БУДУЩЕЕ

ООО НПП
«Микропроцессорные технологии»

Автор
Генеральный директор Пирогов М. Г.




www.i-mt.net
8 800 555-25-11
01@i-mt.net

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

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 объёмах.

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 «ЛАЙМ-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 миллисекунд, тогда как типовое время отключения вводных автоматов с селективными задержками часто составляет сотни миллисекунд [2, 3].

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ ДУГИ (ИНЖЕНЕРНАЯ ОЦЕНКА)

Температура плазмы дуги в электроустановках обычно оценивается в диапазоне 6000-20 000 °С. Для инженерной оценки можно показать порядок величины энергии через мощность дуги и характерные параметры этого явления. Мощность дуги определяется по формуле

$$P_Д = U_Д \cdot I_{КЗ},$$

где $P_Д$ — мощность дуги, Вт;
$U_Д$ — напряжение дуги, В;
$I_{КЗ}$ — ток дуги при коротком замыкании, А.

Для РУ-0,4 кВ часто принимают $U_Д \approx 250…350$ В (в предлагаемой методике $U_Д \approx 300$ В) [1].
При токе $I_{КЗ} = 30$ кА получаем мощность дуги $P_Д \approx 9$ МВт.

При выполнении расчётов исходя из закона Стефана-Больцмана и с учётом излучательной способности плазмы дуги при такой высокой мощности, выделяемой в небольшом объёме, плотность теплового потока может достигать 100÷1000 МВт/м²:

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

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 экспериментальными данными по дуговым разрядам [1, 4].

**Важно:** для расчёта последствий дугового замыкания в электротехническом шкафу интересует 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]:

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

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

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

Анализ данных из таблицы 1 показывает, что уже при $S_{тр}$ ≥ 630 кВА 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].

Таблица 1 - Расчётные токи КЗ на шинах 0,4 кВ при $U_{кз}$ = 0,05

| 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, идущую на нагрев воздуха в отсеке. Тогда [1]

$$Q = \eta \cdot U_д \cdot I_{кз} \cdot t,$$

где Q — тепловая энергия, переданная воздуху, Дж;
η — коэффициент тепловыделения в воздух (в предлагаемой методике принимается η = 0,35);
$U_д$ — принято 300 В;
t — длительность 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:

$$T(t) = T_0 + (\eta \cdot U_д \cdot I_{кз} \cdot t) / (\rho \cdot V \cdot C_в),$$

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

Вывод: температура растёт линейно со временем и током дуги, и обратно пропорциональна объёму отсека. Поэтому наиболее опасный 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:

$$P(t) = k_б \cdot P_0 \cdot (T(t) / T_0),$$

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, K;
$T_0$ — начальная абсолютная температура, K;
$k_б$ — 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 миллисекунд), 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 % в сравнении с герметичным отсеком, где $k_б$=1,0.

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

**КРИТЕРИИ БЕЗОПАСНОСТИ И ТРЕБУЕМОЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ЛИКВИДАЦИИ ДУГИ**

В методике используются два простых и практичных критерия безопасности:
– температура воздуха в отсеке электротехнического шкафа не должна превышать 120 °C;
– 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].

$$T_б = 120\ °C;\ \ P_б = 2\ атм\ (абс.),$$

где $T_б$ - безопасная температура в отсеке электротехнического шкафа;
$P_б$ - безопасное абсолютное давление в отсеке электротехнического шкафа.

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

$$t_т = (\rho \cdot V \cdot C_в \cdot (T_б - T_0)) / (\eta \cdot U_д \cdot I_{кз})$$

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

$$t_P = (\rho \cdot V \cdot C_в \cdot T_0) / (\eta \cdot U_д \cdot I_{кз}) \cdot (P_б / (k_б \cdot P_0) - 1),$$

где $T_0$ — начальная температура;
$P_0$ = 1 атм.

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

$$t_{доп} = min(t_T, t_P)$$

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 времени 5-300 мс для характерного тока КЗ $I_{кз}$≈29 кА (трансформатор 1000 кВА при $U_{кз}$ = 0,05). На рисунках 1-2 представлены графики с темпом нарастания температуры воздуха в вводном отсеке объемом V=1 м³ и шинном отсеке объемом V= 6 м³.

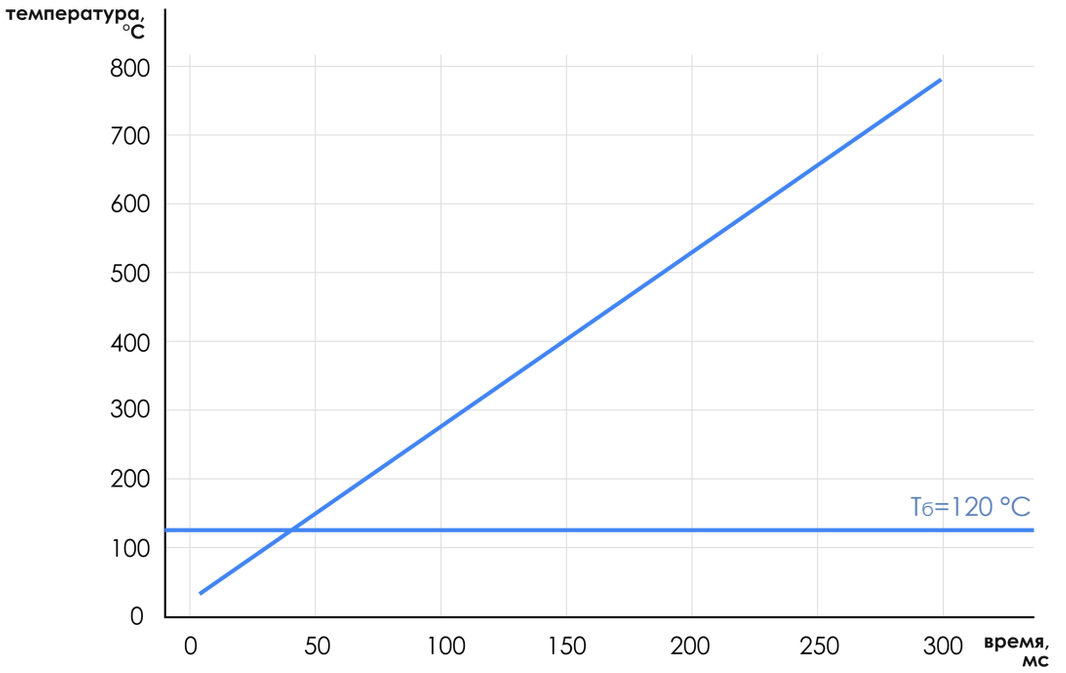



*Рисунок 1 - Температура воздуха во вводном отсеке электротехнического шкафа (V=1 м³)*

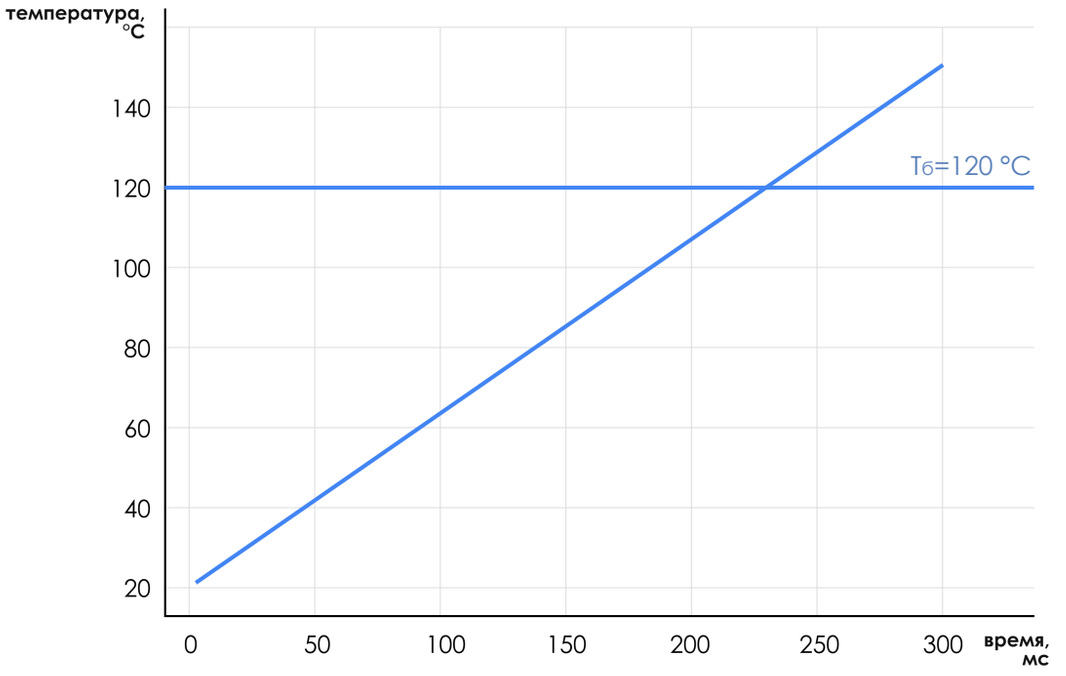



*Рисунок 2 - Температура воздуха в шинном отсеке электротехнического шкафа (V=6 м³)*

На рисунках 3-4 приведены графики с темпом нарастания давления воздуха в водном отсеке объемом V=1 м³ и шинном отсеке объемом V = 6 м³ при условии наличия клапана kб = 0,75 или его отсутствия kб =1.

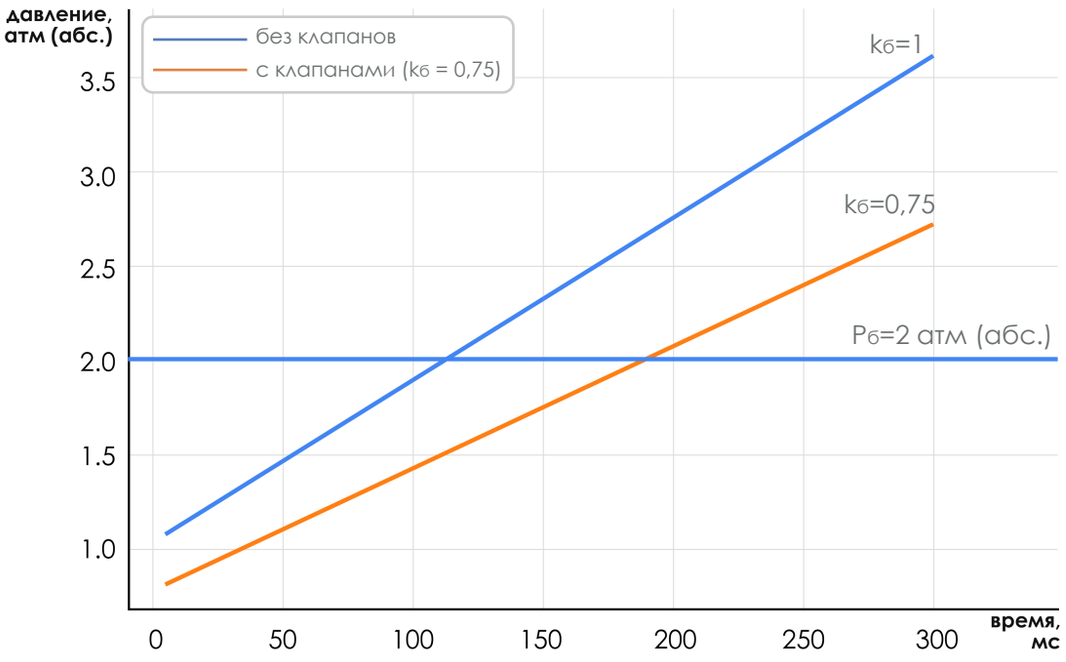



*Рисунок 3 - Давление во вводном отсеке электротехнического шкафа (V=1 м³) при kб =0,75 и kб =1*

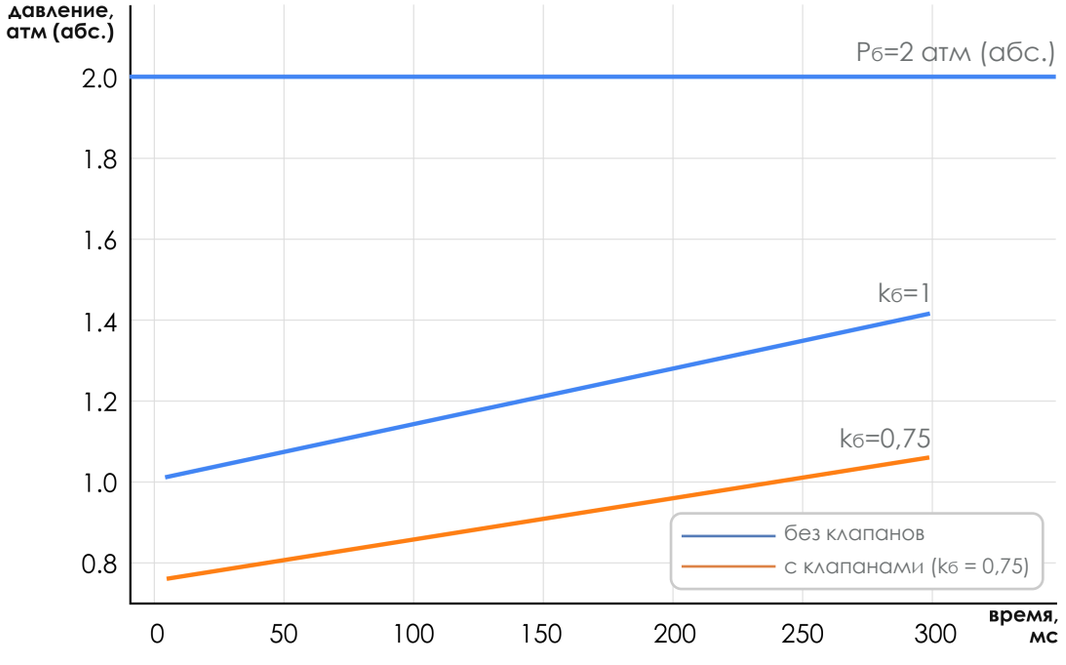



*Рисунок 4 - Давление в шинном отсеке электротехнического шкафа (V=6 м³) при kб =0.75 и kб =1*

Анализ данных, представленных на рисунках 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 $t_{доп} \propto V/I_{кз}$. Для принятых значений параметров η, $U_д$, ρ, $C_в$, а также с учётом критериев безопасности по температуре ($T_б$ = 120 °C) и давлению ($P_б$ = 2 атм (абс.)), получим приближённую формулу для допустимого времени существования дуги, мс:

$$t_{доп} \approx 1100 \cdot V / I_{кз},$$

где $V$ — объем защищаемого отсека, м³;
$I_{кз}$ — ток короткого замыкания, кА.

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

Графическая иллюстрация зависимости требуемого времени ликвидации электрической дуги от тока короткого замыкания (рисунки 5-6) для вводного (V=1 м³) и шинного (V=6 м³) отсеков электротехнического шкафа наглядно демонстрирует влияние объема защищаемого пространства на динамику термодинамических процессов при дуговом замыкании.

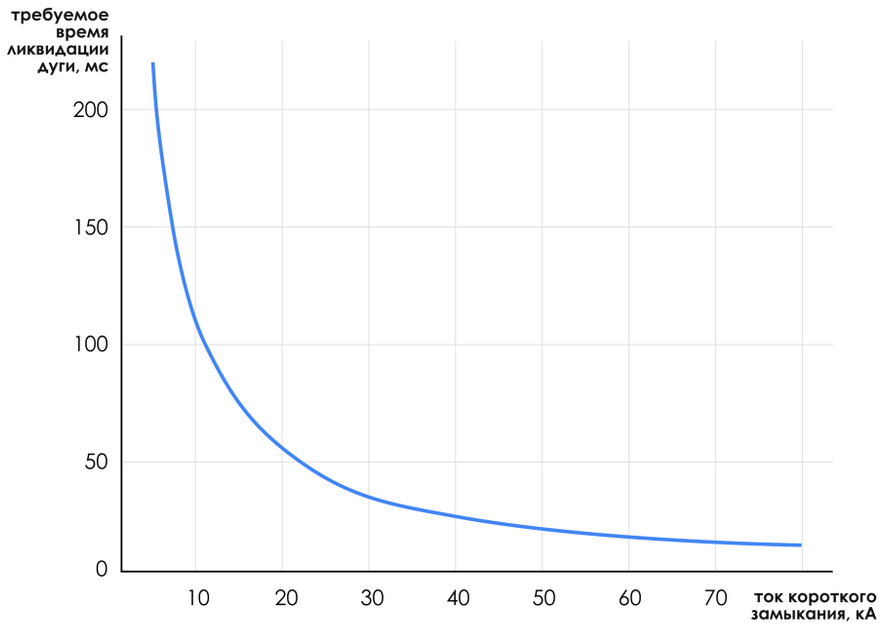



*Рисунок 5 - Требуемое время ликвидации дуги в зависимости от тока КЗ (вводной отсек, V=1 м³)*

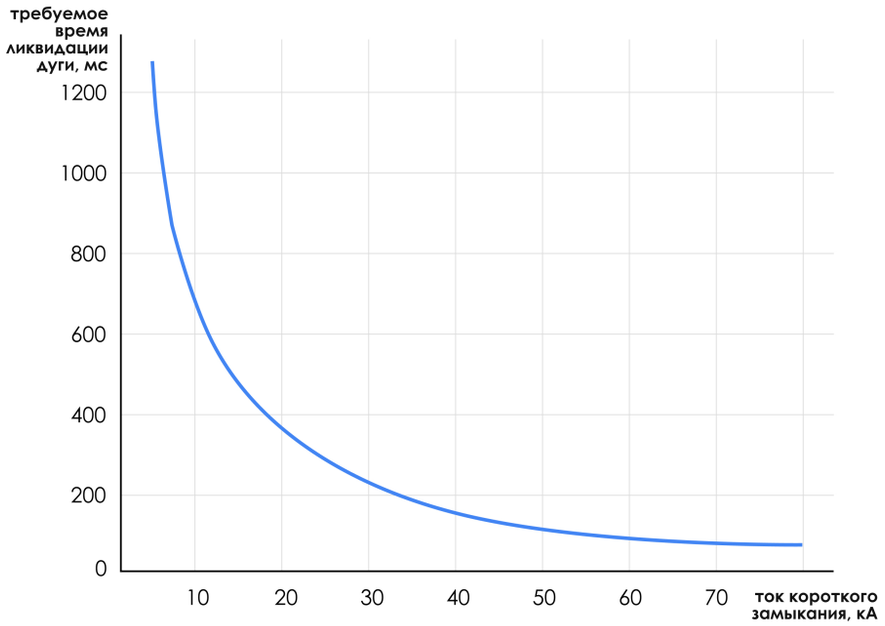



*Рисунок 6 - Требуемое время ликвидации дуги в зависимости от тока КЗ (шинный отсек, V=6 м³)*

**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].

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.

**РЕКОМЕНДОВАННАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

**Для практической реализации эффективной системы дуговой защиты рекомендуется комбинированная схема контроля:** точечные датчики света целесообразно размещать в вводном отсеке электротехнического шкафа, где вероятность возникновения дуги и тяжесть ее последствий максимальны, а петлевой оптоволоконный датчик обеспечивает мониторинг протяженных 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.

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.

**ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДУГОВОЙ ЗАЩИТЫ «ЛАЙМ-2.0»**

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

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 таблице 2.

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 |

Согласно таблице 2 стоимость восстановления оборудования (ремонта):

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

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:

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

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

Тогда коэффициент предотвращённого ущерба:

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

**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.

**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:

1. Мощность питаемого трансформатора не менее 630 кВА. При таком значении и стандартном напряжении короткого замыкания 5 % 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.
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 повреждений оборудования и обеспечения безопасности системы.
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 $U_{кз}$ = 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 счет ее 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: $t_д$ (мс) ≈ 1100 · V(м³)/ $I_{кз}$ (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.

**ИСТОЧНИКИ**


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 0,4кВ. – Л.: Энергоатомиздат,1988. – 172с.

ООО НПП
«Микропроцессорные технологии»

Автор
Генеральный директор Пирогов М. Г.




www.i-mt.net
8 800 555-25-11
01@i-mt.net

# Методика определения допустимого времени отключения дугового замыкания в ячейках 6-35 кВ

Системы дуговой защиты в КРУ 6-35 кВ должны классифицироваться не как опциональные элементы, а как фундаментально обоснованные средства ограничения деструктивных термических и механических воздействий внутренней дуги.

В настоящей статье предложена инженерная методика определения допустимого времени ликвидации внутреннего дугового замыкания в ячейках распределительных устройств напряжением 6, 10, 20 и 35 кВ. В основу разработанного подхода положены принципы энергетического баланса электрической дуги, алгоритмы расчета динамики нарастания температуры газовой среды в защищаемом отсеке, а также оценка повышения уровня абсолютного давления в замкнутом объеме ячейки.

В качестве базовых критериев безопасности утверждены предельно допустимая температура газовой среды на уровне 140 °С и предельное избыточное давление 1,5 атм.

Для каждого класса напряжения вычислены значения градиента напряжения дуги, произведена оценка степени влияния тепловой энергии дугового разряда на скорость изменения давления и температуры. На базе полученных данных выведены итоговые аналитические зависимости для определения допустимого времени ликвидации дугового замыкания, применение которых позволяет минимизировать уровень термической и механической деструкции оборудования ячеек 6-35 кВ, а также снизить риски для эксплуатационного персонала.

Дополнительно принимается во внимание тот факт, что интеграция клапанов сброса давления и газоотводящих каналов не только лимитирует рост избыточного давления, но и способствует замедлению повышения температуры вследствие отвода и последующего охлаждения нагретых масс газа.

На основании полученных данных продемонстрировано, что при соблюдении заданных критериев безопасности превалирующим лимитирующим фактором выступает температура газовой среды в отсеке. Кроме того, установлено, что увеличение тока короткого замыкания и повышение класса напряжения приводят к экспоненциальному ужесточению требований, предъявляемых к быстродействию комплексов дуговой защиты [1–14].

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие внутреннего дугового замыкания в комплектном распределительном устройстве (КРУ) среднего напряжения характеризуется интенсивным выделением тепловой энергии, стремительным нагревом окружающего воздуха и продуктов эрозии контактных соединений, а также резким повышением внутреннего давления с последующим выбросом высокотемпературных газов. Нормативная база, регламентирующая требования к распределительным устройствам в металлической оболочке и их стойкости к воздействию внутренней дуги, закреплена в отечественных и международных стандартах для КРУ соответствующего класса напряжения.

При этом требования к коммутационным аппаратам и общему уровню безопасности подстанций дополняются стандартами на высоковольтные выключатели, отраслевыми нормами проектирования и регламентами, описывающими технические характеристики систем дуговой защиты [1–4].

Ключевая практическая значимость вычисления предельно допустимого времени отключения замыкания, сопровождающегося открытой электрической дугой, заключается в том, что тяжесть последствий подобного аварийного режима детерминируется не только абсолютной величиной тока короткого замыкания, но и продолжительностью его протекания. Анализ отечественных публикаций, посвященных быстродействующим защитам 6-10 кВ и исследованию дуговых повреждений в сетях среднего напряжения, свидетельствует о необходимости отключения поврежденного участка без выдержки времени или с минимально возможной задержкой с целью минимизации ущерба [5, 6].

Вместе с тем, невзирая на отсутствие искусственной задержки времени в алгоритмах функционирования защит от дугового замыкания, итоговое время ликвидации повреждения подвержено существенным вариациям (от 5 до 90 мс) в зависимости от архитектуры схем вторичной коммутации, количества промежуточных звеньев в цепи отключения и собственного времени срабатывания коммутационных аппаратов и терминалов РЗА.

Современные исследования физики внутренней дуги в закрытых отсеках, ячейках 12 кВ, устройствах с элегазовой изоляцией и кабельных сборках демонстрируют, что для корректной инженерной оценки фундаментальными переменными остаются термическая энергия дугового разряда, температура газа, абсолютное давление и конфигурация путей сброса избыточного давления [7–14].

Ввиду этого, в рамках проектных изысканий целесообразно опираться на следующий логический алгоритм: мощность дугового разряда → энергия, аккумулированная воздухом в замкнутом отсеке → градиент температуры (и давления) → допустимое время локализации аварии.

**ПРИНЯТЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ И ИСХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ**

Все принятые для расчетов коэффициенты и исходные физические параметры сведены в табл. 1.

Таблица 1

| Обозначение | Параметр | Значение | Единица измерения |
|---|---|---|---|
| $\eta$ | Доля энергии дуги, переходящая в нагрев воздуха | 0,35 | о. е. |
| $\rho_в$ | Плотность воздуха | 1,2 | кг/м³ |
| $C_{возд}$ | Удельная теплоёмкость воздуха | 1000 | Дж/(кг·°С) |
| V | Объём отсека | переменный | м³ |
| $T_{нач}$ | Начальная температура воздуха в защищаемом отсеке (далее – отсеке) | 25 | °С |
| $T_{пред}$ | Предельно допустимая температура воздуха в отсеке | 140 | °С |
| $k_т$ | Коэффициент замедления роста температуры при наличии клапанов | 1,0..0,75 | о. е. |
| $k_б$ | Коэффициент снижения давления при наличии клапанов | 1,0..0,75 | о. е. |
| $E_{дуги}$ | Удельный градиент напряжения дуги | 15,7 | В/см |
| $k_{удл}$ | Коэффициент удлинения дуги | 8 | о. е. |

Коэффициент η рассматривается в качестве эмпирической величины (определяемой опытным путем на базе анализа физических экспериментов), отражающей тот факт, что на непосредственный нагрев воздушной среды в замкнутом пространстве расходуется лишь часть выделяемой энергии дуги. Оставшаяся часть диссипирует, расходуясь на эрозию электродных структур, термический нагрев токоведущих контуров и металлической оболочки ячейки, а также на электромагнитное и световое излучение. Исследования динамики внутренней дуги подчеркивают, что коэффициенты энергетического распределения не могут считаться универсальной константой, поскольку они сильно зависят от геометрии ячейки, величины межэлектродного зазора, архитектуры отсека и специфики термодинамической разгрузки [7, 11, 14].

Интеграция клапанов сброса давления и системы газоотводящих каналов обуславливает не только редукцию давления внутри ячейки, но и существенное торможение скорости нарастания температуры в отсеке. Подобный эффект достигается за счет активной эвакуации раскаленных масс газа во внешнюю среду и их последующего термодинамического охлаждения. Данное явление формализовано в расчетной модели посредством введения коэффициентов $k_т$ и $k_б$ [11, 14].

**БАЗОВЫЕ РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ**

Мощность электрической дуги, тепловая энергия, переданная объему воздуха, температура воздуха в защищаемом отсеке и абсолютное давление определяются следующими математическими выражениями:

$$P_{дуги} = U_{дуги} \cdot I_{кз},$$

$$Q_{возд} = \eta \cdot P_{дуги} \cdot t,$$

$$T_{отс} = T_{нач} + \frac{\eta \cdot k_т \cdot U_{дуги} \cdot I_{кз} \cdot t}{\rho_в \cdot V \cdot C_{возд}},$$

$$p_{абс} = p_0 \left[1 + k_б \left(\frac{273 + T_{отс}}{273 + T_{нач}} - 1\right)\right],$$

где $U_{дуги}$ — напряжение дуги, В;
$I_{кз}$ — ток короткого замыкания, А.

В представленных аналитических выражениях коэффициент $k_т$ вводится с целью количественного учета того факта, что функционирование сбросных клапанов обеспечивает более плавное нарастание температуры в отсеке по сравнению с абсолютно герметичным (изохорным) объемом. Подобное допущение не призвано полностью заменить исчерпывающий газодинамический расчет или проведение натурных испытаний КРУ, однако оно предоставляет возможность в корректной и прагматичной инженерной форме учесть эффект тепловой разгрузки ячейки [11, 14].

Анализ предложенных математических моделей позволяет сформулировать следующий фундаментальный физический вывод: интенсификация тока короткого замыкания и возрастание напряжения дуги обуславливают прямо пропорциональное увеличение скорости нагрева воздушной массы. Напротив, расширение полезного объема отсека демпфирует градиент роста температуры. Установка систем клапанного сброса выступает дополнительным фактором, подавляющим темпы роста как температуры, так и давления [7, 11, 14].

**ВЫБОР НАПРЯЖЕНИЯ ДУГИ ДЛЯ КЛАССОВ 6, 10, 20 И 35 кВ**

Для расчёта напряжение дуги принимается пропорциональным её эффективной длине:

$$U_{дуги} = E_{дуги} \cdot l_{эфф} = E_{дуги} \cdot k_{удл} \cdot g,$$

где $l_{эфф}$ — ффективная длина дуги, см;
g — межфазный зазор, см.

В специализированной научно-технической литературе для дуговых разрядов среднего напряжения приводится вариативный диапазон градиента напряжения порядка 10-16 В/см. Проведенные эмпирические исследования феномена внутренней дуги также подтверждают, что картина распределения термобарических характеристик в значительной степени детерминируется величиной межфазного зазора, архитектурой камеры и позиционированием самого разряда [7–10, 12, 13].

Исходя из этого, в настоящем расчёте оперируют унифицированным инженерным значением $U_{дуги}$, экстраполированным из табл. 2.

Таблица 2

| Класс напряжения | Межфазный зазор g, см | $U_{дуги}$, В |
|---|---|---|
| 6 кВ | 10 | 1250 |
| 10 кВ | 15 | 1900 |
| 20 кВ | 23 | 2900 |
| 35 кВ | 30 | 3800 |

Анализируя данные из табл. 2, можно заключить, что повышение класса напряжения оборудования напрямую коррелирует с увеличением генерируемого напряжения дуги. Следствием этого факта является рост аккумулируемой тепловой мощности разряда (при условии неизменности тока короткого замыкания), что диктует императивную необходимость пропорционального сокращения предельно допустимого времени ликвидации аварии.

**ФОРМУЛА ДОПУСТИМОГО ВРЕМЕНИ ОТКЛЮЧЕНИЯ ДУГОВОГО ЗАМЫКАНИЯ**

Исходя из граничного условия температурного критерия $T_{отс} \le T_{пред}$, формируется базовое аналитическое выражение для расчета допустимого времени отключения дугового разряда:

$$t_{доп} = \frac{\rho_в \cdot V \cdot C_{возд} \cdot (T_{пред} - T_{нач})}{\eta \cdot k_т \cdot U_{дуги} \cdot I_{кз}}$$

Путем приведения размерностей к миллисекундам и килоамперам уравнение трансформируется в более компактный вид с использованием агрегированного коэффициента K:

$$t_{доп} = \frac{K \cdot V}{k_т \cdot I_{кз}}$$

В условиях консервативного подхода к расчету уставок (при отсутствии верифицированных экспериментальных профилей) следует принимать коэффициент $k_т$ равным 1,0. При расчетах архитектуры, оснащенной системами разгрузочных клапанов, значение $k_т$ постулируется на уровне 0,75.

Расчеты подтверждают, что критерий безопасности, базирующийся на мониторинге избыточного давления, демонстрирует значительно меньшую степень жесткости по сравнению с термодинамическим критерием. В связи с этим, детерминирующим параметром при расчете допустимого времени ликвидации дуги выступает именно предельная температура воздушной среды [7, 11, 14].

**ПРИМЕР РАСЧЁТА КОЭФФИЦИЕНТА K ДЛЯ КЛАССА 6 кВ**

Для ячейки 6 кВ из табл. 2 принимается $U_{дуги}$ = 1250 В. Тогда коэффициент K определяется следующим образом:

$$K_{6кВ} = \frac{\rho_в \cdot C_{возд} \cdot (T_{пред} - T_{нач})}{\eta \cdot U_{дуги}} = \frac{1{,}2 \cdot 1000 \cdot (140 - 25)}{0{,}35 \cdot 1250} = 315{,}4 \text{ мс} \cdot \frac{\text{кА}}{\text{м}^3}$$

**ГРАФИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РОСТА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ЯЧЕЙКЕ 6 кВ ПРИ $I_{кз}$ = 15 кА**

На рис. 1 приведена динамика роста температуры воздуха при возникновении дугового замыкания 6 кВ (по оси абсцисс — время развития аварии в мс, по оси ординат — температура в °C) для тока короткого замыкания 15 кА и расчётного объёма отсека 1 м³. Синяя кривая иллюстрирует процесс стремительного линейного нагрева в полностью замкнутом отсеке (без клапанов) — предельно допустимое значение 140 °C (отмечено горизонтальной пунктирной линией) достигается всего за ~21 мс. Оранжевая кривая демонстрирует более пологий темп нагрева при наличии клапанов сброса давления, что существенно задерживает достижение критической температуры, предоставляя релейной защите дополнительное время на реакцию.

Клапаны сброса давления значительно снижают интенсивность теплового воздействия на конструкцию.

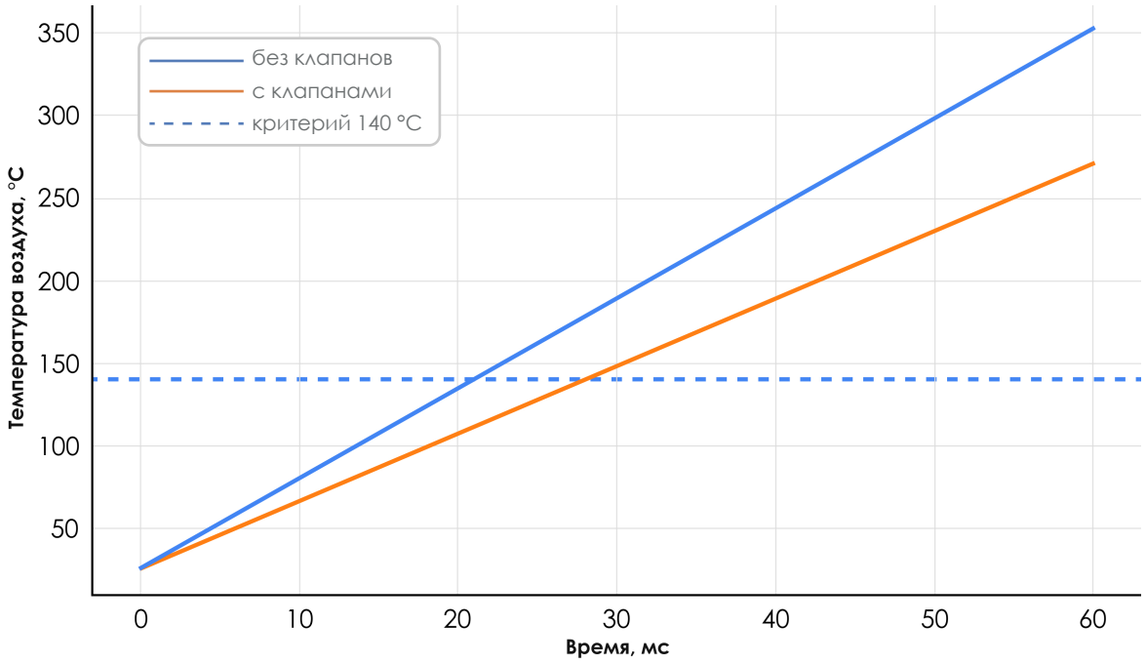



*Рис. 1. – Рост температуры воздуха при дуговом замыкании 6 кВ, Iкз = 15 кА*

**ГРАФИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РОСТА ДАВЛЕНИЯ В ЯЧЕЙКЕ 6 кВ ПРИ Iкз = 15 кА**

На рис. 2 показана динамика изменения абсолютного давления в отсеке 6 кВ при аналогичных условиях (по оси абсцисс — время в мс, по оси ординат — абсолютное давление в атм). Синяя кривая (без клапанов) и оранжевая кривая (с клапанами) показывают, что давление внутри ячейки нарастает значительно медленнее, чем температура. Горизонтальной пунктирной линией отмечен критерий предельного давления в 2,5 атм (абсолютных), до которого кривые не доходят в рассматриваемом временном интервале. Это подтверждает вывод о том, что именно температура воздуха в защищаемом отсеке, а не избыточное давление, является первичным ограничивающим параметром.

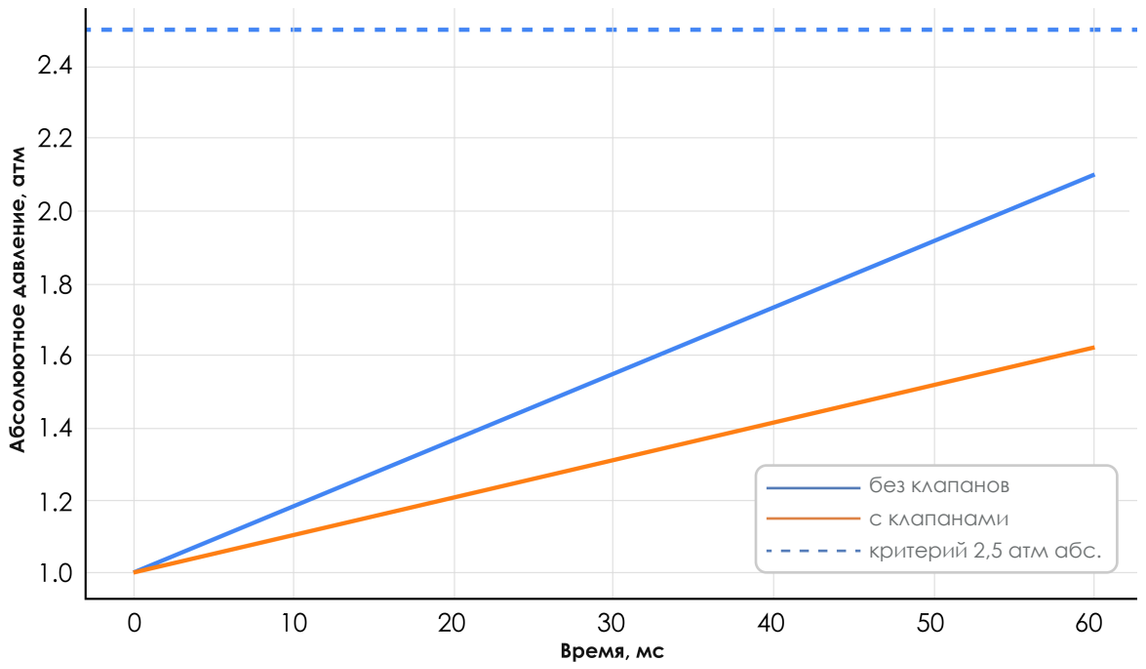



*Рис. 2. – Рост абсолютного давления при дуговом замыкании 6 кВ, Iкз = 15 кА*

**СВОДНЫЙ ГРАФИК ПРЕДЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ЛИКВИДАЦИИ ДУГИ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ 6-35 кВ**

На рис. 3 представлен сводный график зависимости допустимого времени ликвидации дуги от величины тока короткого замыкания (по оси абсцисс — ток КЗ в кА, по оси ординат — допустимое время в мс) для различных классов напряжения (6, 10, 20 и 35 кВ) при условии наличия клапанов сброса ($k_т$ = 0,75) и объеме отсека V = 1 м³. График имеет вид гиперболических кривых (обратно пропорциональная зависимость): чем выше ток КЗ и класс напряжения, тем меньше времени остается на безопасное отключение повреждения.

Рост тока замыкания вызывает быстрое уменьшение допустимого времени ликвидации дуги даже при наличии разгрузочных клапанов.

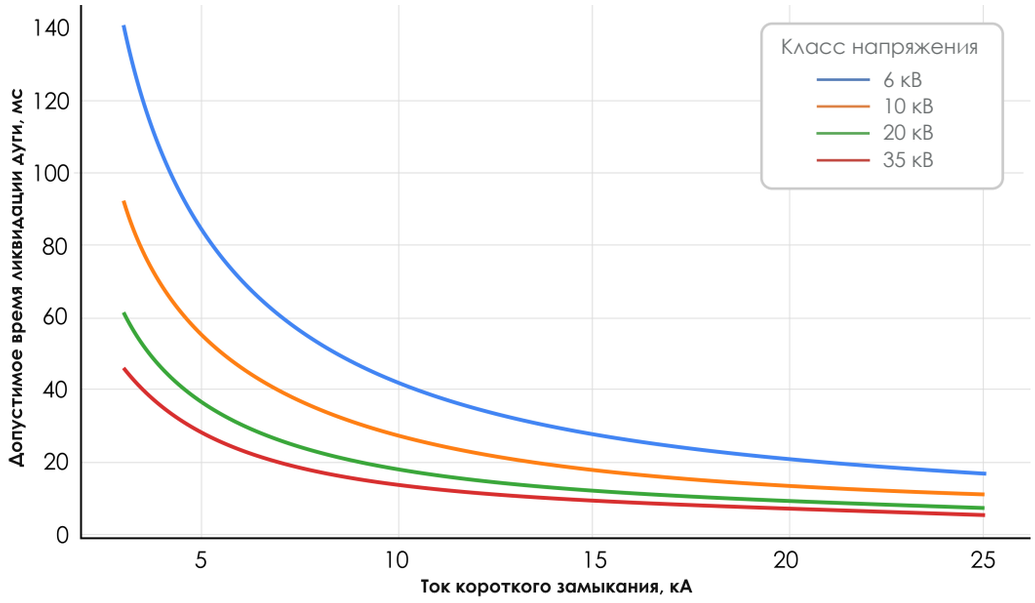



*Рис. 3 – Сводный график допустимого времени ликвидации дуги при наличии клапанов (V = 1 м³)*

## СВОДНАЯ ТАБЛИЦА ДОПУСТИМОГО ПРЕДЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ЛИКВИДАЦИИ ДУГИ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ 6-35 кВ

Ниже в табл. 3 приведены значения допустимого времени ликвидации дуги в миллисекундах для случая наличия клапанов: V = 1 м³ и $k_т$ = 0,75.

Таблица 3

| $I_{кз}$, кА | $t_{доп}$, 6 кВ | $t_{доп}$, 10 кВ | $t_{доп}$, 20 кВ | $t_{доп}$, 35 кВ |
|---|---|---|---|---|
| 3 | 140 | 92 | 60 | 46 |
| 5 | 84 | 56 | 36 | 27 |
| 7,5 | 56 | 37 | 24 | 19 |
| 10 | 42 | 28 | 18 | 14 |
| 15 | 28 | 19 | 12 | 9 |
| 20 | 21 | 14 | 10 | 7 |
| 25 | 17 | 12 | 8 | 5 |

Представленные расчеты наглядно иллюстрируют, что классические селективные выдержки времени токовых защит являются недостаточными для обеспечения безопасности. В связи с этим возникает острая необходимость внедрения специализированных технологических решений, гарантирующих локализацию повреждения без выдержки времени [4–6], с обязательной верификацией полного быстродействия аппаратной архитектуры применяемых дуговых защит.

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ ФОРМУЛА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОГО ВРЕМЕНИ ЛИКВИДАЦИИ ДУГОВОГО ЗАМЫКАНИЯ

Итоговая универсальная формула для всех рассматриваемых классов напряжения с уточнением по объему защищаемого отсека ячейки 6-35 кВ имеет общий вид:

$$t_{доп} = \frac{K \cdot V}{k_т \cdot I_{кз}},$$

где значения коэффициента K представлены в таблице 4.

Таблица 4

| Класс напряжения | $U_{дуги}$, В | K, (мс · кА) / м³ |
|---|---|---|
| 6 кВ | 1250 | 315,4 |
| 10 кВ | 1900 | 207,5 |
| 20 кВ | 2900 | 136,0 |
| 35 кВ | 3800 | 103,8 |

**ВЫВОДЫ**

1. Разработана и обоснована унифицированная инженерная методика расчета допустимого времени ликвидации внутренней дуги для ячеек 6, 10, 20 и 35 кВ, базирующаяся на оценке энергетического баланса и температурного критерия. Применение данной методики позволяет минимизировать риски термической деструкции оборудования ячейки при возникновении замыканий, сопровождающихся открытым дуговым разрядом.
2. При соблюдении заданных критериев безопасности (предельная температура 140 °C и избыточное давление 1,5 атм), ориентированных на предотвращение необходимости капитального ремонта ячейки после аварийного инцидента, основным лимитирующим фактором выступает динамика нагрева воздушной среды в защищаемом отсеке.
3. С целью обеспечения возможности проведения высокоточных расчетов, итоговая аналитическая зависимость интегрирует физический объем отсека V (м³), что позволяет учитывать уникальные конструктивные особенности различных модификаций ячеек и тем самым повышает общую достоверность оценки безопасности.
4. Выведенные аналитические зависимости убедительно свидетельствуют о том, что системы дуговой защиты в КРУ 6-35 кВ должны классифицироваться не как опциональные элементы, а как фундаментально обоснованные средства ограничения деструктивных термических и механических воздействий внутренней дуги. Подобный подход всецело коррелирует с требованиями ГОСТ к распределительным устройствам и базируется на передовой инженерной практике быстродействующего отключения дуговых повреждений [1–6].
5. В процессе проектирования архитектуры дуговой защиты критически важно производить учет суммарного времени срабатывания всей цепи: терминалов защиты, дискретных входов/выходов, промежуточных реле и силового выключателя. В случае, если совокупное время срабатывания цепи отключения превышает расчетный лимит допустимого времени для конкретного отсека, регламентируется применение мер технической модернизации проектного решения (внедрение твердотельных реле, дугогасительных камер) с целью заблаговременной нейтрализации угроз для персонала и оборудования.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**


1. ГОСТ Р 55190-2012 (МЭК 62271-200:2003). Устройства комплектные распределительные в металлической оболочке (КРУ) на номинальное напряжение до 35 кВ. Общие технические условия.
2. ГОСТ Р 52565-2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия.
3. СТО 56947007-29.240.10.248-2017. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ.
4. ПАО «Россети». Технические требования к дуговым защитам ячеек КРУ 6-35 кВ.
5. Нагай В. И. и др. Релейные защиты от дуговых коротких замыканий и замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. // Изв. Вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2010 – Спецвыпуск. – С. 81-87.
6. Клецель М. Я. И др. Быстродействующая защита шин и отходящих присоединений напряжением 6-10 кВ. // Электроэнергетика. – 2013 – С. 175-178.
7. Li P. et al. Analysis of Pressure Rise in a Closed Container Due to Internal Arcing. Energies, 2017.
8. Hu Dingyin et al. Research and Analysis of Two-Phase Arc Fault Test in 12 kV Switchgear.
9. Wang Zhining et al. Research on Pressure and Temperature Characteristics of Arc Fault in Gas-Insulated Switchgear.
10. Guo Qing et al. Calculation and Analysis of Arc Pressure Rise in AIS Cable Chamber of Switchgear.
11. Li P. et al. Influence of Buffer Volume on the Effect of Pressure Relief for the Metal-Enclosed Switchgear due to Arc Fault.

12. IEC 62271-200:2021. Комплектные распределительные устройства переменного тока в металлической оболочке на напряжение свыше 1 кВ и до 52 кВ включительно.
13. Short T. A. Arc Flash Analysis Approaches for Medium-Voltage Distribution. IEEE / EPRI, 2009.
14. Материалы по снижению воздействия внутренней дуги за счёт разгрузочных устройств и отвода горячих газов в КРУ.



**Михаил Пирогов**
Генеральный директор
ООО НПП «Микропроцессорные технологии»

**VK:** vk.com/pirogovmg
**Почта:** pirogovmg@i-mt.net

СОЗДАЕМ
НАДЕЖНОЕ
БУДУЩЕЕ



# МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Создаем надежное будущее

www.i-mt.net