ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 71959— 2025

Система стандартов безопасности труда

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

Методика расчета вероятного значения падающей энергии электрической дуги в электроустановках

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2025

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью «Экспертиза СИЗ» (ООО «Экспертиза СИЗ»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 251 «Безопасность труда»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 февраля 2025 г. № 104-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2025

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины, определения и сокращения 2
4 Общие положения 3
5 Параметры для расчетов падающей энергии электрической дуги 3
6 Модели расчета вероятного значения падающей энергии электрической дуги 8
Приложение А (справочное) Пример расчета вероятного значения падающей энергии электрической дуги в ЭУ 18
Приложение Б (рекомендуемое) Применение результатов расчета вероятного значения падающей энергии электрической дуги в ЭУ 26
Библиография 27

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Система стандартов безопасности труда

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

Методика расчета вероятного значения падающей энергии электрической дуги в электроустановках

Occupational safety standards system. Electrical safety. Methods for calculating the probable value of the incident energy of an electric arc in electrical installations

Дата введения — 2025—11—10

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает порядок расчета вероятного значения падающей энергии электрической дуги в электроустановках (далее — расчет падающей энергии электрической дуги) на основе эмпирических моделей расчета.

Модели расчета вероятного значения падающей энергии электрической дуги (далее — модели расчета), приведенные в настоящем стандарте, применяют для электроустановок переменного тока, при эксплуатации которых существует вероятность возникновения электрической дуги.

Требования настоящего стандарта не распространяются на электроустановки постоянного тока и комплектные распределительные устройства с элегазовой изоляцией.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.1.009 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Термины и определения

ГОСТ 24291 Электрическая часть электростанции и электрической сети. Термины и определения

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку

Издание официальное

3 Термины, определения и сокращения

3.1 В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 12.1.009, ГОСТ 24291, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **время горения электрической дуги:** Общая продолжительность протекания электродугового разряда между возникновением тока короткого замыкания и окончательным разрывом цепи при номинальном напряжении, включая собственное время срабатывания устройств релейной защиты и автоматики и собственное время срабатывания предохранительного устройства.

3.1.2 **изоляционное расстояние:** Кратчайшее расстояние по воздуху между двумя токопроводящими частями.

3.1.3 **импеданс:** Комплексное (активное и реактивное) электрическое сопротивление.

3.1.4 **класс напряжения:** Номинальное междуфазное (линейное) напряжение электрической сети, для работы в которой предназначено электрооборудование.

3.1.5 **пространственное расположение проводников:** Ориентация и расположение токоведущих частей оборудования, между которыми возможно возникновение электрической дуги.

3.1.6 **короткое замыкание;** КЗ: Электрическое соединение двух точек электрической цепи с различными значениями потенциала, не предусмотренное конструкцией устройства и нарушающее его нормальную работу, возникающее в результате нарушения изоляции токоведущих элементов или механического соприкосновения неизолированных элементов и приводящее к значительному тепловыделению.

3.1.7 **местное управление:** Управление коммутационными аппаратами и заземляющими разъединителями, технологическим режимом работы оборудования путем воздействия на механический привод или от местной кнопки, ключа управления, расположенных непосредственно у коммутационного аппарата или управляемого оборудования.

3.1.8 **однофазное короткое замыкание:** Повреждение, при котором одна из фаз трехфазной системы сети с заземленной нейтралью замыкается на землю или на элемент, электрически связанный с землей.

3.1.9 **опасная точка:** Коммутационные аппараты, ячейки, отсеки и другие токоведущие части электроустановки, при выполнении работ на которых (в которых), вследствие особенностей их технического состояния, исполнения или конструкции, существует риск возникновения электрической дуги.

Примечание — Коммутационные аппараты, имеющие дистанционное управление, расценивают как опасную точку и расчет падающей энергии электрической дуги проводят исходя из условий воздействия на органы местного управления.

3.1.10 **падающая энергия электрической дуги:** Тепловая энергия, получаемая единицей площади, как прямой результат воздействия электрической дуги.

Примечание — Падающая энергия измеряется в килоджоулях на квадратный метр (кДж/м^2) или в киловатт-секундах на квадратный метр (кВт · с/м^2), или в калориях на квадратный сантиметр (кал/см^2).

3.1.11 **предохранительное устройство:** Коммутационный электрический аппарат, предназначенный для отключения защищаемой цепи размыканием или разрушением специально предусмотренных для этого токоведущих частей под действием тока, превышающего определенное значение.

3.1.12 **расстояние между проводниками:** Расстояние между контактами полюса разъединителя/отделителя/рубильника, находящегося в отключенном положении; выключателя-разъединителя; выкаченного автоматического выключателя, контактами полюсов фаз; либо расстояние от токоведущих частей, находящихся под напряжением, до заземленных конструкций в свету.

3.1.13 **расстояние до источника электрической дуги:** Принимаемое для расчетов расстояние между областью лица и груди работника и ожидаемым источником электрической дуги.

3.1.14 **термическое поражение:** Повреждение тканей организма человека (ожог), возникающее при воздействии на них теплового потока, генерируемого электрической дугой.

3.1.15 **ток дуги:** Ток короткого замыкания, проходящий через плазму электрической дуги, с учетом импеданса.

3.1.16 **ток короткого замыкания:** Ожидаемый симметричный сверхток при номинальном напряжении, появляющийся в результате короткого замыкания.

Примечание — В данной точке в цепи максимальный ток, который электрическая система может передать через данную цепь на любое короткое замыкание с пренебрежимо малым импедансом, прилагаемое к данной

точке или к любой другой точке, заставляющей ток самого высокого уровня проходить через данную точку. За значение тока КЗ для проведения расчетов принимают действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени, вплоть до расчетного времени размыкания цепи.

3.1.17 **трехфазное короткое замыкание:** Короткое замыкание между тремя фазами в трехфазной электроэнергетической системе.

3.2 В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ВЛ — воздушная линия электропередачи;

ВРБ — вертикальное расположение проводников с изолирующим барьером внутри отсека ячейки;

ВРЗ — вертикальное расположение проводников в ЗРУ;

ВРО — вертикальное расположение проводников на ОРУ;

ГРЗ — горизонтальное расположение проводников в ЗРУ;

ГРО — горизонтальное расположение проводников на ОРУ;

ЗН — заземляющий нож;

ЗРУ — закрытое распределительное устройство;

КЛ — кабельная линия электропередачи;

КРУ — комплектное распределительное устройство;

КРУ(Н) — комплектное распределительное устройство (наружной установки);

КРУЭ — комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией;

КТП — комплектная трансформаторная подстанция;

ОРУ — открытое распределительное устройство;

РЗиА — релейная защита и автоматика;

РУ — распределительное устройство;

ЭУ — электроустановка.

4 Общие положения

4.1 Расчет падающей энергии электрической дуги проводят для действующих, строящихся и/или реконструируемых ЭУ с целью оценки риска термического поражения в них персонала и проведения мероприятий, направленных на обеспечение безопасных условий работы в ЭУ.

4.2 При расчете падающей энергии электрической дуги проводят:

- анализ главной схемы электрических соединений энергообъекта и определение опасных точек;
- сбор параметров для расчета падающей энергии электрической дуги по каждой опасной точке;
- расчет падающей энергии электрической дуги для каждой опасной точки на основании одной из моделей расчета, приведенных в настоящем стандарте, и с учетом анализа места нахождения и передвижения работника, особенностей производства работ в каждой опасной точке.

Примечание — При наличии нескольких вариантов расположения проводников в выбранной для расчета опасной точке расчет падающей энергии электрической дуги следует проводить для каждого из вариантов. За окончательный расчетный вариант принимают наибольшее из расчетных значений.

4.3 Пример расчета падающей энергии электрической дуги приведен в приложении А.

4.4 Рекомендации по применению полученных результатов расчетов вероятных значений падающей энергии электрической дуги для каждой выявленной опасной точки приведены в приложении Б.

5 Параметры для расчетов падающей энергии электрической дуги

5.1 Для расчетов падающей энергии электрической дуги в опасных точках определяют следующие параметры:

- значение тока КЗ, $I_{кз}$, кА;
- класс напряжения ЭУ (линейное), U, В;
- время горения электрической дуги, T, мс;
- расстояние до источника электрической дуги, D, мм;
- расстояние между проводниками, G, мм;
- вариант пространственного расположения проводников в РУ;
- внутренние размеры отсека ячейки ЗРУ (высота, ширина, глубина).

5.2 Значение тока КЗ

Для расчетов падающей энергии электрической дуги для каждой из опасных точек должны использоваться значения тока однофазного КЗ ($I_к^{(1)}$) (при наличии данных) и трехфазного тока КЗ ($I_к^{(3)}$) или значение тока, который проходит через предохранительное устройство, обеспечивающее защиту данного участка электрической цепи.

Примечание — Для ЭУ 6-35 кВ, работающих с изолированной нейтралью, должен быть проведен расчет падающей энергии электрической дуги при однофазном замыкании на землю и трехфазном замыкании.

5.3 Класс напряжения ЭУ

Для каждой из опасных точек выбор класса напряжения сводится к определению (по паспортным данным) номинального напряжения, для которого предназначена данная ЭУ.

5.4 Время горения электрической дуги

5.4.1 Время горения электрической дуги выбирают в соответствии с режимом работы сети и настройками устройств РЗиА, а также с условиями, перечисленными в 5.4.2 и 5.4.3.

5.4.2 Если опасная точка:

- одновременно входит в зону действия нескольких видов устройств РЗиА, то для расчета выбирают наименьшее время срабатывания;
- входит в зону действия защит, действующих без выдержки времени, то для расчета используют минимальное расчетное значение времени — 0,1 с;
- входит в зону, защищаемую устройствами с зависимыми характеристиками, то для расчета выбирают данные из времятоковых характеристик данных защитных устройств или используют минимальное расчетное значение времени — 0,1 с.

5.4.3 Для ЭУ, где используются защитные устройства с времятоковыми характеристиками, необходимо рассчитывать значение тока дуги и пониженное значение тока дуги с учетом ее импеданса и определять время горения электрической дуги, соответствующее этим токам.

5.5 Расстояние до источника электрической дуги

5.5.1 При определении расстояния до источника электрической дуги измеряют кратчайшее расстояние от работника до токоведущих частей оборудования.

5.5.2 При невозможности измерения расстояния до источника электрической дуги рекомендуется принимать 300 мм, что соответствует усредненному расстоянию от источника опасности до области лица и груди работника, выполняющего работы.

5.5.3 В ЭУ выше 1000 В при невозможности измерения расстояния до источника электрической дуги рекомендуют принимать расстояние в соответствии с [1] (таблица № 1).

5.6 Расстояние между проводниками

5.6.1 В качестве расстояния между проводниками для опасной точки принимают расстояние между токоведущими частями разных фаз или расстояние между полюсами одной фазы, или расстояние от токоведущих частей, находящихся под напряжением до ближайших заземленных элементов конструкции.

5.6.2 Расстояние между проводниками определяют исходя из технических данных и габаритных расстояний, указанных в паспорте или в руководстве по эксплуатации ЭУ.

5.6.3 При отсутствии данных по конкретному оборудованию для расчетов могут быть приняты наименьшие расстояния от токоведущих частей до различных элементов ОРУ (подстанций) в свету согласно [2], наиболее часто встречающиеся значения приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Расстояния от токоведущих частей до различных элементов ОРУ (подстанций) в свету

Наименование расстояния	Изоляционное расстояние, мм, не менее (для номинального напряжения, кВ)								
	До 10	20	35	110	150	220	330	500	750
От токоведущих частей или от элементов оборудования и изоляции, находящихся под напряжением, до заземленных конструкций или постоянных внутренних ограждений высотой не менее 2 м	200	300	400	900	1300	1800	2500	3750	5500
Между проводами разных фаз	220	330	440	1000	1400	2000	2800	4200	8000

5.6.4 При отсутствии данных по конкретному оборудованию для расчетов могут быть приняты наименьшие расстояния в свету от токоведущих частей до различных элементов ЗРУ (подстанций) 6—330 кВ, защищенных разрядниками, и ЗРУ 110—330 кВ, защищенных ограничителями перенапряжений (в знаменателе) согласно [2]. Наиболее часто встречающиеся значения приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Наименьшие расстояния в свету от токоведущих частей до различных элементов ЗРУ (подстанций) 6—330 кВ, защищенных разрядниками, и ЗРУ 110—330 кВ, защищенных ограничителями перенапряжений (в знаменателе)

Наименование расстояния	Изоляционное расстояние, мм, не менее (для номинального напряжения, кВ)						
	6	10	35	110	150	220	330
От токоведущих частей до заземленных конструкций и частей зданий	90	120	290	700 600	1100 800	1700 1200	2400 2000
Между проводниками разных фаз	100	130	320	800 750	1200 1050	1800 1600	2600 2200
От токоведущих частей до сплошных ограждений	120	150	320	730 630	1130 830	1730 1230	2430 2030
От токоведущих частей до сетчатых ограждений	190	220	390	800 700	1200 900	1800 1300	2500 2100
Между неогражденными токоведущими частями разных цепей	2000	2000	2200	2900 2800	3300 3000	3800 3400	4600 4200
От контакта и ножа разъединителя в отключенном положении до ошиновки, присоединенной ко второму контакту	110	150	350	900 850	1300 1150	2000 1800	3000 2500

5.6.5 В случае пофазного исполнения разъединителя за расстояние между проводниками следует выбирать значение между разомкнутыми контактами полюса, а в случае исполнения разъединителя с общим приводом на все фазы следует выбирать расстояние между токоведущими частями крайних фаз.

5.6.6 Для силовых КЛ независимо от вариантов исполнения изоляции за минимальное расстояние между проводниками принимают расстояние в местах подключения фаз КЛ к оборудованию либо расстояние между фазами в переходных или концевых муфтах, или в кабельных воронках. Для упрощения и удобства определения расстояния между проводниками принимают расстояние от центров фазных жил силовых кабелей.

5.7 Вариант пространственного расположения проводников в РУ

5.7.1 В моделях расчета, приведенных в настоящем стандарте, все рассматриваемые ЭУ могут быть отнесены только к двум типам исполнения РУ переменного тока: к открытому типу (ОРУ) или к закрытому типу (ЗРУ).

5.7.2 В настоящем стандарте ВЛ при расчете падающей энергии электрической дуги должны быть отнесены к типу ОРУ. КЛ при варианте проложения в кабельных трассах и кабельных мостах необходи-

мо расценивать как ОРУ, в случае, где проложение КЛ имеет ограниченное пространство (кабельные лотки, кабельные полуэтажи и шахты) — как ЗРУ.

5.7.3 Анализируют расположение токоведущих частей и выбирают один из пяти предложенных вариантов пространственного расположения проводников: ВРО, ГРО, ВРЗ, ГРЗ, ВРБ. Для каждого из вариантов в расчетах применяют коэффициенты, указанные в соответствующих таблицах.

5.8 Внутренние размеры отсека ячейки оборудования ЗРУ

5.8.1 Внутренние размеры отсека ячейки оборудования ЗРУ оказывают влияние на итоговое значение падающей энергии электрической дуги из-за того, что выделяемая электрической дугой энергия частично отражается от стенок ячейки, частично поглощается. Интенсивность теплового потока зависит от расстояния между стенками и размеров проема передней стенки отсека. По этой причине и для более точного расчета падающей энергии электрической дуги необходимо учитывать внутренние размеры отсека ячейки ЗРУ: высоту, ширину, глубину, которые получают путем измерения или берут из паспортов оборудования, руководств по эксплуатации или справочных материалов.

5.8.2 Поправочный коэффициент на внутренний размер отсека ячейки ЗРУ (*CF*)

5.8.2.1 При определении поправочного коэффициента на внутренний размер отсека ячейки ЗРУ (далее — поправочный коэффициент *CF*) учитывают следующие положения:

- значения эквивалентной ширины $W_{экв}$ и высоты $H_{экв}$ определяют по таблице 3 и формулам (1) и (2) соответственно, исходя из напряжения электрической системы, пространственного расположения проводников, высоты и ширины отсека. Глубину не учитывают, если ширина и высота менее 500 мм, а напряжение в системе менее 1000 В. Глубину учитывают для определения типа отсека: «типовой» или «неглубокий»;
- тип, эквивалентные высота и ширина внутренних размеров отсека ячейки ЗРУ используют для определения параметра его эквивалентного размера, который определяет поправочный коэффициент *CF*;
- если ширина и высота отсека ячейки ЗРУ превышают 1250 мм, то применяют такой же поправочный коэффициент, как и для отсека ячейки ЗРУ с размерами: длина — 1250 мм, ширина — 1250 мм, глубина — 1250 мм;
- при невозможности определения внутренних размеров отсека ячейки ЗРУ следует применять поправочный коэффициент *CF* = 1.

5.8.2.2 Отсек ячейки с внутренними размерами: длина — 500 мм, ширина — 500 мм, глубина — 500 мм, в настоящем стандарте принят как «типовой». Если же фактические внутренние размеры отсека ячейки ЗРУ отличаются от размеров «типового», то необходимо применять поправочный коэффициент для более точного расчета падающей энергии электрической дуги.

5.8.2.3 Отсек ячейки относят к типу «неглубокий», если выполнены следующие условия:

- напряжение в системе составляет менее 1000 В;
- высота и ширина отсека — менее 500 мм;
- глубина отсека — не более 200 мм.

Если любое из этих условий не выполнено, то отсек ячейки относят к «типовому».

5.8.2.4 После определения типа отсека ячейки вычисляют эквивалентные высоту и ширину, сравнивая фактические значения высоты и ширины с конкретными пределами каждого из трех вариантов пространственного расположения проводников по таблице 3 и формулам (1) и (2).

Таблица 3 — Определение эквивалентных высоты и ширины

Вариант пространственного расположения проводников	Параметр	Пределы внутренних размеров отсека ячейки ЗРУ (ширины и высоты), мм				
		До 500		От 500 до 660 включ.	Св. 660 до 1250 включ.	Св. 1250
		«Типовой» отсек ячейки	«Неглубокий» отсек ячейки			
ВРЗ	$W_{экв}$	20	0,03937 × Ширина	0,03937 × Ширина	Вычисляют по формуле (1) и фактической ширине	Вычисляют по формуле (1) с шириной 1250 мм
	$H_{экв}$	20	0,03937 × Высота	0,03937 × Высота	0,03937 × Высота	49

Окончание таблицы 3

Вариант пространственного расположения проводников	Параметр	Пределы внутренних размеров отсека ячейки ЗРУ (ширины и высоты), мм				
		До 500		От 500 до 660 включ.	Св. 660 до 1250 включ.	Св. 1250
		«Типовой» отсек ячейки	«Неглубокий» отсек ячейки			
ВРБ	$W_{экв}$	20	0,03937 × Ширина	0,03937 × Ширина	Вычисляют по формуле (1) и фактической ширине	Вычисляют по формуле (1) с шириной 1250 мм
	$H_{экв}$	20	0,03937 × Высота	0,03937 × Высота	Вычисляют по формуле (2) и фактической высоте	Вычисляют по формуле (2) с высотой 1250 мм
ГРЗ	$W_{экв}$	20	0,03937 × Ширина	0,03937 × Ширина	Вычисляют по формуле (1) и фактической ширине	Вычисляют по формуле (1) с шириной 1250 мм
	$H_{экв}$	20	0,03937 × Высота	0,03937 × Высота	Вычисляют по формуле (2) и фактической высоте	Вычисляют по формуле (2) с высотой 1250 мм

$$W_{экв} = (660,4 + \left(W - 660,4) \times \left(\frac{U + A}{B} \right) \right) \times 25,4^{-1}, \quad (1)$$

$$H_{экв} = (660,4 + \left(H - 660,4) \times \left(\frac{U + A}{B} \right) \right) \times 25,4^{-1}, \quad (2)$$

где $W_{экв}$ — эквивалентная ширина отсека;
W — фактическая ширина отсека, мм;
U — напряжение в системе, кВ;
A — константа, равная 4 для ВРЗ и 10 для ВРБ и ГРЗ;
B — константа, равная 20 для ВРЗ, 24 для ВРБ и 22 для ГРЗ;
$H_{экв}$ — эквивалентная высота отсека;
H — фактическая высота отсека, мм.

5.8.2.5 На основании эквивалентных ширины и высоты вычисляют эквивалентный размер отсека *EES* по формуле

$$EES = \frac{H_{экв} + W_{экв}}{2}, \quad (3)$$

где $H_{экв}$ — эквивалентная высота отсека;
$W_{экв}$ — эквивалентная ширина отсека.

5.8.2.6 Поправочный коэффициент для «типового» отсека ячейки ЗРУ *CF* вычисляют по формуле

$$CF = b_1 \times EES^2 + b_2 \times EES + b_3, \quad (4)$$

где *EES* — эквивалентный размер отсека;
b_1—b_3 — коэффициенты, приведенные в таблице 4.

Таблица 4 — Коэффициенты для расчета *CF* по формулам (4) и (5)

Тип отсека ячейки	Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты для расчета *CF*		
		b_1	b_2	b_3
«Типовой»	ВРЗ	–0,000302	0,03441	0,4325
	ВРБ	–0,0002976	0,032	0,479
	ГРЗ	–0,0001923	0,01935	0,6899

Окончание таблицы 4

Тип отсека ячейки	Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты для расчета *CF*		
		b_1	b_2	b_3
«Неглубокий»	ВРЗ	0,002222	–0,02556	0,6222
	ВРБ	–0,002778	0,1194	–0,2778
	ГРЗ	–0,0005556	0,03722	0,4778

5.8.2.7 Поправочный коэффициент для «неглубокого» отсека ячейки ЗРУ *CF* вычисляют по формуле

$$CF = \frac{1}{b_1 \times EES^2 + b_2 \times EES + b_3}, \quad (5)$$

где *EES* — эквивалентный размер отсека;

b_1—b_3 — коэффициенты, приведенные в таблице 4.

6 Модели расчета вероятного значения падающей энергии электрической дуги

6.1 Настоящий стандарт рассматривает три модели расчета с различными диапазонами токов КЗ:

- модель расчета для ЭУ напряжением до 1000 В включительно;
- модель расчета для ЭУ напряжением свыше 1000 В и токами КЗ до 65 000 А включительно;
- модель расчета для ЭУ напряжением свыше 1000 В и токами КЗ свыше 65 000 А.

6.2 В моделях расчета применяют двухэтапный процесс, в ходе которого для определения окончательных значений падающей энергии электрической дуги интерполируют промежуточные значения тока дуги и падающей энергии. Для уточнения результатов вводят поправочные коэффициенты на пространственное расположение проводников, внутренние размеры отсека ячейки ЗРУ и изменчивость тока дуги.

6.3 Модель расчета для ЭУ напряжением до 1000 В включительно

6.3.1 Модель расчета для ЭУ напряжением до 1000 В включительно применяют при выполнении следующих условий:

- пространственное расположение проводников: ВРЗ, ВРО, ГРЗ, ГРО, ВРБ;
- любой режим работы нейтрали для $I_к^{(3)}$ и заземленная нейтраль для $I_к^{(1)}$.

6.3.2 Промежуточное значение тока дуги $I_{\text{дуги } U \le 1000\text{В}}$, кА, вычисляют по формуле

$$I_{\text{дуги } U \le 1000\text{ В}} = 10^{\left(k_1 + k_2 \times \lg I_{\text{кз}} + k_3 \times \lg G\right)} \times \left(k_4 \times I_{\text{кз}}^4 + k_5 \times I_{\text{кз}}^3 + k_6 \times I_{\text{кз}}^2 + k_7 \times I_{\text{кз}} + k_8\right), \quad (6)$$

где $I_{\text{кз}}$ — значение тока КЗ, кА;

G — расстояние между проводниками (расчетная длина дуги), мм;

k_1—k_8 — коэффициенты, приведенные в таблице 5.

Таблица 5 — Коэффициенты для расчета промежуточного значения тока дуги по формуле (6)

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты							
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8
ВРЗ	–0,04287	1,035	–0,083	$-4{,}783 \times 10^{-9}$	$1{,}962 \times 10^{-6}$	–0,000229	0,003141	1,092
ВРБ	–0,017432	0,98	–0,05	$-5{,}767 \times 10^{-9}$	$2{,}524 \times 10^{-6}$	–0,00034	0,01187	1,013
ГРЗ	0,054922	0,988	–0,11	$-5{,}382 \times 10^{-9}$	$2{,}316 \times 10^{-6}$	–0,000302	0,0091	0,9725
ВРО	0,043785	1,04	–0,18	$-4{,}783 \times 10^{-9}$	$1{,}962 \times 10^{-6}$	–0,000229	0,003141	1,092
ГРО	0,111147	1,008	–0,24	$-3{,}859 \times 10^{-9}$	$1{,}641 \times 10^{-6}$	–0,000197	0,002615	1,1

6.3.3 Значение тока дуги при $U \le 1000$ В $I_{\text{дуги}}$, кА, вычисляют по формуле

$$I_{\text{дуги}} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0,6}{U}\right]^2 \times \left[\frac{1}{I_{\text{дуги}\,U \le 1000\,\text{В}}^2} - \left(\frac{0,6^2 - U^2}{0,6^2 \times I_{\text{кз}}^2}\right)\right]}}, \quad (7)$$

где U — номинальное напряжение ЭУ (линейное), В.

6.3.4 Для защитных устройств с времятоковыми характеристиками изменение тока дуги влечет за собой изменение времени горения дуги, что в свою очередь может оказывать значительное влияние на окончательное расчетное значение падающей энергии электрической дуги. Поэтому для корректного определения расчетного времени горения электрической дуги и дальнейшего определения наибольшего расчетного значения падающей энергии электрической дуги необходимо учитывать влияние изменчивости тока дуги с учетом импеданса и определять пониженное значение тока дуги по формуле (8).

$$I_{\text{дуги}_{\min}} = I_{\text{дуги}} \times (1 - 0,5 \times B), \quad (8)$$

$$B = a_1 \times U^6 + a_2 \times U^5 + a_3 \times U^4 + a_4 \times U^3 + a_5 \times U^2 + a_6 \times U + a_7, \quad (9)$$

где $I_{\text{дуги}_{\min}}$ — пониженное значение тока дуги с учетом поправочного коэффициента на импеданс, кА;

$I_{\text{дуги}}$ — значение тока, рассчитанное по формуле (7), кА;

B — поправочный коэффициент изменчивости тока дуги с учетом импеданса;

U — номинальное напряжение ЭУ (линейное), В;

a_1—a_7 — коэффициенты, приведенные в таблице 6.

Таблица 6 — Коэффициенты для формулы (9)

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты						
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
ВРЗ	0	$-1,4269 \times 10^{-6}$	0,000083137	–0,0019382	0,022366	–0,12645	0,30226
ВРБ	$1,138 \times 10^{-6}$	$-6,0287 \times 10^{-5}$	0,0012758	–0,013778	0,080217	–0,24066	0,33524
ГРЗ	0	$-3,097 \times 10^{-6}$	0,00016405	–0,0033609	0,033308	–0,16182	0,34627
ВРО	$9,5606 \times 10^{-7}$	$-5,1543 \times 10^{-5}$	0,0011161	–0,01242	0,075125	–0,23584	0,33696
ГРО	0	$-3,1555 \times 10^{-6}$	0,0001682	-0,0034607	0,034124	–0,1599	0,34629

6.3.5 Вероятное значение падающей энергии электрической дуги для $I_{\text{дуги}}$ вычисляют по формуле

$$E_{I_{\text{дуги}}} = \frac{12,552}{50} \times T \times 10^{\left(n_1 + n_2 \times \lg G + \frac{n_3 \times I_{\text{дуги}\,U<1000\,\text{В}}}{n_4 \times I_{\text{КЗ}}^5 + n_5 \times I_{\text{КЗ}}^4 + n_6 \times I_{\text{КЗ}}^3 + n_7 \times I_{\text{КЗ}}^2 + n_8 \times I_{\text{КЗ}}} + n_9 \times \lg I_{\text{кз}} + n_{10} \times \lg D + n_{11} \times \lg I_{\text{дуги}} + \lg \frac{1}{CF}\right)}, \quad (10)$$

где $E_{I_{\text{дуги}}}$ — падающая энергия электрической дуги в ЭУ напряжением до 1000 В включительно, соответствующая току $I_{\text{дуги}}$, Дж/см^2;

$I_{\text{дуги}}$ — значение тока, рассчитанное по формуле (7), кА;

$I_{\text{кз}}$ — значение тока КЗ, кА;

T — время горения электрической дуги, соответствующее значению тока дуги, полученному по формуле (7), мс;

D — расстояние до источника электрической дуги, мм;

G — расстояние между проводниками (расчетная длина дуги), мм;

n_1—n_{11} — коэффициенты, приведенные в таблице 7.

Примечание — Для перевода полученного значения падающей энергии электрической дуги в кал/см^2 необходимо разделить результат расчета на 4,184.

Таблица 7 — Коэффициенты для расчета вероятного значения падающей энергии электрической дуги по формулам (10) и (11)

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты				
	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5
ВРЗ	0,753364	0,566	1,752636	$-4,783 \times 10^{-9}$	0,000001962
ВРБ	3,068459	0,26	–0,098107	$-5,767 \times 10^{-9}$	0,000002524
ГРЗ	4,073745	0,344	–0,370259	$-5,382 \times 10^{-9}$	0,000002316
ВРО	0,679294	0,746	1,222636	$-4,738 \times 10^{-9}$	0,000001962
ГРО	3,470417	0,465	–0,261863	$-3,895 \times 10^{-9}$	0,000001641

Окончание таблицы 7

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты					
	n_6	n_7	n_8	n_9	n_{10}	n_{11}
ВРЗ	–0,000229	0,003141	1,092	0	–1,598	0,957
ВРБ	–0,00034	0,01187	1,013	–0,06	–1,809	1,19
ГРЗ	–0,000302	0,0091	0,9725	0	–2,03	1,036
ВРО	–0,000229	0,003141	1,092	0	–1,598	0,997
ГРО	–0,000197	0,002615	1,1	0	–1,99	1,04

6.3.6 Для защитных устройств с времятоковыми характеристиками аналогично проводят вычисления значения падающей энергии электрической дуги по формуле (11) для пониженного значения тока дуги $I_{\text{дуги}_{\min}}$ и времени горения электрической дуги, соответствующего данному току:

$$E_{I_{\text{дуги}_{\min}}} = \frac{12,552}{50} \times T \times 10^{\left(n_1 + n_2 \times \lg G + \frac{n_3 \times I_{\text{дуги}\, U < 1000\ \text{В}}}{n_4 \times I_{\text{кз}}^5 + n_5 \times I_{\text{кз}}^4 + n_6 \times I_{\text{кз}}^3 + n_7 \times I_{\text{кз}}^2 + n_8 \times I_{\text{кз}}} + n_9 \times \lg I_{\text{кз}} + n_{10} \times \lg D + n_{11} \times \lg I_{\text{дуги}_{\min}} + \lg \frac{1}{CF} \right)}, \quad (11)$$

где $E_{I_{\text{дуги}_{\min}}}$ — падающая энергия электрической дуги в ЭУ напряжением до 1000 В включительно, соответствующая току $I_{\text{дуги}_{\min}}$, Дж/см^2;

$I_{\text{дуги}_{\min}}$ — пониженное значение тока дуги, рассчитанное по формуле (8), кА;

$I_{\text{кз}}$ — значение тока КЗ, кА;

T — время горения электрической дуги, соответствующее значению току дуги, полученному по формуле (8), мс;

D — расстояние до источника электрической дуги, мм;

G — расстояние между проводниками (расчетная длина дуги), мм;

n_1—n_{11} — коэффициенты, приведенные в таблице 7.

Примечание — Для перевода полученного значения падающей энергии электрической дуги в кал/см^2 необходимо разделить результат расчета на 4,184.

6.3.7 Для защитных устройств с времятоковыми характеристиками в качестве окончательного вероятного значения падающей энергии электрической дуги выбирают максимальное из двух расчетных значений $E_{I_{\text{дуги}_{\min}}}$ и $E_{I_{\text{дуги}}}$, рассчитанных по формулам (10) и (11).

6.3.8 В случае размещения в опасной точке токоведущих частей одновременно горизонтально и вертикально проводят два расчета.

6.4 Модель расчета для ЭУ напряжением свыше 1000 В и токами КЗ до 65 000 А включительно

6.4.1 Модель расчета для ЭУ напряжением свыше 1000 В и токами КЗ до 65 000 А применяют при выполнении следующих условий:

- пространственное расположение проводников: ВРЗ/ ВРО/ ГРЗ/ ГРО/ ВРБ;
- любой режим работы нейтрали.

6.4.2 Вычисляют промежуточные значения токов дуги, эквивалентных значениям промежуточных напряжений U_1 и U_2, по формуле

$$I_{\text{дуги}U_{\text{хх}}} = 10^{\left(k_1+k_2\times\lg I_{\text{кз}}+k_3\times\lg G\right)}\times\left(k_4\times I_{\text{кз}}^6+k_5\times I_{\text{кз}}^5+k_6\times I_{\text{кз}}^4+k_7\times I_{\text{кз}}^3+k_8\times I_{\text{кз}}^2+k_9\times I_{\text{кз}}+k_{10}\right), \quad (12)$$

где $I_{\text{дуги }U_{\text{хх}}}$ — промежуточное значение тока дуги при $U_{\text{хх}} = U_1, U_2$, кА;

$I_{\text{кз}}$ — значение тока КЗ, кА;

G — расстояние между проводниками (расчетная длина дуги), мм;

k_1—k_8 — коэффициенты, приведенные в таблице 8.

Таблица 8 — Коэффициенты для расчета промежуточного значения тока дуги по формуле (12)

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты					
	$U_{\text{хх}}$	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
ВРЗ	U_1	0,0065	1,001	–0,024	$-1{,}557\times10^{-12}$	$4{,}556\times10^{-10}$
	U_2	0,005795	1,015	–0,011	$-1{,}557\times10^{-12}$	$4{,}556\times10^{-10}$
ВРБ	U_1	0,002823	0,995	–0,0125	0	$-9{,}204\times10^{-11}$
	U_2	0,014827	1,01	–0,01	0	$-9{,}204\times10^{-11}$
ГРЗ	U_1	0,001011	1,003	–0,0249	0	0
	U_2	0,008693	0,999	–0,02	0	$-5{,}043\times10^{-11}$
ВРО	U_1	– 0,02395	1,006	–0,0188	$-1{,}557\times10^{-12}$	$4{,}556\times10^{-10}$
	U_2	0,005371	1,0102	–0,029	$-1{,}557\times10^{-12}$	$4{,}556\times10^{-10}$
ГРО	U_1	0,000435	1,006	–0,038	0	0
	U_2	0,000904	0,999	–0,02	0	0

Окончание таблицы 8

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты				
	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}
ВРЗ	$-4{,}186\times10^{-8}$	$8{,}346\times10^{-7}$	$5{,}482\times10^{-5}$	–0,003191	0,9729
	$-4{,}186\times10^{-8}$	$8{,}346\times10^{-7}$	$5{,}482\times10^{-5}$	–0,003191	0,9729
ВРБ	$2{,}901\times10^{-8}$	$-3{,}262\times10^{-6}$	0,0001569	–0,004003	0,9825
	$2{,}901\times10^{-8}$	$-3{,}262\times10^{-6}$	0,0001569	–0,004003	0,9825
ГРЗ	$-4{,}859\times10^{-10}$	$-1{,}814\times10^{-7}$	$-9{,}128\times10^{-6}$	–0,0007	0,9881
	$2{,}233\times10^{-8}$	$-3{,}046\times10^{-6}$	0,000116	–0,001145	0,9839
ВРО	$-4{,}186\times10^{-8}$	$8{,}346\times10^{-7}$	$5{,}482\times10^{-5}$	–0,003191	0,9729
	$-4{,}186\times10^{-8}$	$8{,}346\times10^{-7}$	$5{,}482\times10^{-5}$	–0,003191	0,9729
ГРО	$7{,}859\times10^{-10}$	$1{,}914\times10^{-7}$	$-9{,}128\times10^{-6}$	–0,0007	0,9981
	$7{,}859\times10^{-10}$	$1{,}914\times10^{-7}$	$-9{,}128\times10^{-6}$	–0,0007	0,9981

6.4.3 Для защитных устройств с времятоковыми характеристиками вычисляют значение тока дуги $I_{\text{дуги}}$ и пониженное значение тока дуги $I_{\text{дуги}_{\min}}$ по формулам (13) и (14) соответственно с учетом пониженных значений тока дуги $I_{\text{дуги}U_{1\min}}$ и $I_{\text{дуги}U_{2\min}}$ при U_1 и U_2, определяемых по формулам (15) и (16) соответственно:

$$I_{\text{дуги}} = \frac{I_{\text{дуги}U_2} - I_{\text{дуги}U_1}}{11{,}6}\left(U - 14{,}3\right) + I_{\text{дуги}U_2}, \tag{13}$$

$$I_{\text{дуги}_{\min}} = \frac{I_{\text{дуги}U_{2\min}} - I_{\text{дуги}U_{1\min}}}{11{,}6}\left(U - 14{,}3\right) + I_{\text{дуги}U_{2\min}}, \tag{14}$$

$$I_{\text{дуги}U_{1\min}} = I_{\text{дуги}U_1} \times \left(1 - 0{,}5 \times B\right), \tag{15}$$

$$I_{\text{дуги}U_{2\min}} = I_{\text{дуги}U_2} \times \left(1 - 0{,}5 \times B\right), \tag{16}$$

где B — поправочный коэффициент изменчивости тока дуги с учетом импеданса, рассчитанный по формуле (9);

$I_{\text{дуги}U_1}$, $I_{\text{дуги}U_2}$ — промежуточные значения тока дуги при U_1 и U_2 соответственно, кА.

6.4.4 Вычисляют промежуточные значения падающей энергии электрической дуги, эквивалентные значениям напряжения U_1 и U_2, по формулам

$$E_{U_1} = \frac{12{,}552}{50} \times T \times 10^{\left(m_1 + m_2 \times \lg G + \frac{m_3 \times I_{\text{дуги}U_1}}{m_4 \times I_{\text{кз}}^7 + m_5 \times I_{\text{кз}}^6 + m_6 \times I_{\text{кз}}^5 + m_7 \times I_{\text{кз}}^4 + m_8 \times I_{\text{кз}}^3 + m_9 \times I_{\text{кз}}^2 + m_{10} \times I_{\text{кз}}} + m_{11} \times \lg I_{\text{кз}} + m_{12} \times \lg D + m_{13} \times \lg I_{\text{дуги}U_1} + \lg\frac{1}{CF}\right)}, \tag{17}$$

где E_{U_1} — промежуточное значение падающей энергии электрической дуги при промежуточном напряжении U_1, Дж/см^2;

$I_{\text{дуги}U_1}$ — значение тока дуги при промежуточном напряжении U_1, кА;

$I_{\text{кз}}$ — значение тока КЗ, кА;

D — расстояние до источника электрической дуги, мм;

T — время горения электрической дуги, соответствующее значению тока дуги $I_{\text{дуги}U_1}$, мс;

m_1—m_{13} — коэффициенты, приведенные в таблице 9.

Таблица 9 — Коэффициенты для расчета значения промежуточного среднего квадратического значения падающей энергии электрической дуги по формулам (17), (21)

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты					
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6
ВРЗ	2,40021	0,165	0,354202	$-1{,}557 \times 10^{-12}$	$4{,}556 \times 10^{-10}$	$-4{,}186 \times 10^{-8}$
ВРБ	3,870592	0,185	–0,736618	0	$-9{,}204 \times 10^{-11}$	$2{,}901 \times 10^{-8}$
ГРЗ	3,486391	0,177	–0,193101	0	0	$4{,}859 \times 10^{-10}$
ВРО	3,880724	0,105	–1,906033	$-1{,}557 \times 10^{-12}$	$4{,}556 \times 10^{-10}$	$-4{,}186 \times 10^{-8}$
ГРО	3,616266	0,149	–0,761561	0	0	$7{,}859 \times 10^{-10}$

Окончание таблицы 9

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты						
	m_7	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}	m_{13}
ВРЗ	$8{,}346 \times 10^{-7}$	$5{,}482 \times 10^{-5}$	–0,003191	0,9729	0	–1,569	0,9778
ВРБ	$-3{,}262 \times 10^{-6}$	0,0001569	–0,004003	0,9825	0	–1,742	1,09
ГРЗ	$-1{,}814 \times 10^{-7}$	$-9{,}128 \times 10^{-6}$	–0,0007	0,9881	0,027	–1,723	1,055
ВРО	$8{,}346 \times 10^{-7}$	$5{,}482 \times 10^{-5}$	–0,003191	0,9729	0	–1,515	1,115
ГРО	$-1{,}914 \times 10^{-7}$	$-9{,}128 \times 10^{-6}$	–0,0007	0,9981	0	–1,639	1,078

$$E_{U_2} = \frac{12{,}552}{50} \times T \times 10^{\left(p_1 + p_2 \times \lg G + \frac{p_3 \times I_{\text{дуги}\,U_2}}{p_4 \times I_{\text{кз}}^7 + p_5 \times I_{\text{кз}}^6 + p_6 \times I_{\text{кз}}^5 + p_7 \times I_{\text{кз}}^4 + p_8 \times I_{\text{кз}}^3 + p_9 \times I_{\text{кз}}^2 + p_{10} \times I_{\text{кз}}} + p_{11} \times \lg I_{\text{кз}} + p_{12} \times \lg D + p_{13} \times \lg I_{\text{дуги}\,U_2} + \lg \frac{1}{CF} \right)}, \quad (18)$$

где E_{U_2} — промежуточное значение падающей энергии электрической дуги при промежуточном напряжении U_2, Дж/см^2;

$I_{\text{дуги}U_2}$ — значение тока дуги при промежуточном напряжении U_2, кА;

$I_{\text{кз}}$ — значение тока КЗ, кА;

D — расстояние до источника электрической дуги, мм;

T — время горения электрической дуги, соответствующее значению тока дуги $I_{\text{дуги}U_2}$, мс;

p_1—p_{13} — коэффициенты, приведенные в таблице 10.

Таблица 10 — Коэффициенты для расчета значения промежуточного значения падающей энергии электрической дуги по формулам (18), (21)

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты					
	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
ВРЗ	3,825917	0,11	–0,999749	$-1{,}557 \times 10^{-12}$	$4{,}556 \times 10^{-10}$	$-4{,}186 \times 10^{-8}$
ВРБ	3,644309	0,215	–0,585522	0	$-9{,}204 \times 10^{-11}$	$2{,}901 \times 10^{-8}$
ГРЗ	3,044516	0,125	0,245106	0	$-5{,}043 \times 10^{-11}$	$2{,}233 \times 10^{-8}$
ВРО	3,405454	0,12	–0,93245	$-1{,}557 \times 10^{-12}$	$4{,}556 \times 10^{-10}$	$-4{,}186 \times 10^{-8}$
ГРО	2,04049	0,177	1,005092	0	0	$7{,}859 \times 10^{-10}$

Окончание таблицы 10

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты						
	p_7	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}	p_{12}	p_{13}
ВРЗ	$8{,}346 \times 10^{-7}$	$5{,}482 \times 10^{-5}$	–0,003191	0,9729	0	–1,568	0,99
ВРБ	$-3{,}262 \times 10^{-6}$	0,0001569	–0,004003	0,9825	0	–1,677	1,06
ГРЗ	$-3{,}046 \times 10^{-6}$	0,000116	–0,001145	0,9839	0	–1,655	1,084
ВРО	$8{,}346 \times 10^{-7}$	$5{,}482 \times 10^{-5}$	–0,003191	0,9729	0	–1,534	0,979
ГРО	$-1{,}914 \times 10^{-7}$	$-9{,}128 \times 10^{-6}$	–0,0007	0,9981	–0,05	–1,633	1,151

6.4.5 Вероятное значение падающей энергии электрической дуги для тока дуги $I_{\text{дуги}}$ определяют по формуле

$$E_{I_{\text{дуги}}} = \frac{E_{U_2} - E_{U_1}}{11{,}6}\left(U - 14{,}3\right) + E_{U_2}, \quad (19)$$

где $E_{I_{\text{дуги}}}$ — вероятное значение падающей энергии электрической дуги для тока дуги $I_{\text{дуги}}$;

E_{U_1} — промежуточное значение падающей энергии электрической дуги при промежуточном напряжении U_1, Дж/см^2;

E_{U_2} — промежуточное значение падающей энергии электрической дуги при промежуточном напряжении U_2, Дж/см^2.

Примечание — Для перевода полученного значения падающей энергии электрической дуги в кал/см^2 необходимо разделить результат расчета на 4,184.

6.4.6 Для защитных устройств с времятоковыми характеристиками аналогично проводят вычисления промежуточных значений падающей энергии электрической дуги, эквивалентные тем, что соответствуют значениям напряжения $U_{1\min}$ и $U_{2\min}$, по формулам (20), (21) — для пониженного значения тока дуги $I_{\text{дуги}_{\min}}$:

$$E_{U_{1\min}} = \frac{12{,}552}{50} \times T \times 10^{\left(m_1 + m_2 \times \lg G + \frac{m_3 \times I_{\text{дуги}U_{1\min}}}{m_4 \times I_{\text{кз}}^7 + m_5 \times I_{\text{кз}}^6 + m_6 \times I_{\text{кз}}^5 + m_7 \times I_{\text{кз}}^4 + m_8 \times I_{\text{кз}}^3 + m_9 \times I_{\text{кз}}^2 + m_{10} \times I_{\text{кз}}} + m_{11} \times \lg I_{\text{кз}} + m_{12} \times \lg D + m_{13} \times \lg I_{\text{дуги}U_{1\min}} + \lg\frac{1}{CF}\right)}, \quad (20)$$

где $E_{U_{1\min}}$ — промежуточное значение падающей энергии электрической дуги при промежуточном напряжении $U_{1\min}$, Дж/см^2;

$I_{\text{дуги}U_{1\min}}$ — пониженное значение тока дуги при промежуточном напряжении $U_{1\min}$, кА;

T — время горения электрической дуги, соответствующее значению токf дуги $I_{\text{дуги}_{1\min}}$, мс;

m_1—m_{13} — коэффициенты, приведенные в таблице 9.

$$E_{U_{2\min}} = \frac{12{,}552}{50} \times T \times 10^{\left(p_1 + p_2 \times \lg G + \frac{p_3 \times I_{\text{дуги}U_{2\min}}}{p_4 \times I_{\text{кз}}^7 + p_5 \times I_{\text{кз}}^6 + p_6 \times I_{\text{кз}}^5 + p_7 \times I_{\text{кз}}^4 + p_8 \times I_{\text{кз}}^3 + p_9 \times I_{\text{кз}}^2 + p_{10} \times I_{\text{кз}}} + p_{11} \times \lg I_{\text{кз}} + p_{12} \times \lg D + p_{13} \times \lg I_{\text{дуги}U_{2\min}} + \lg\frac{1}{CF}\right)}, \quad (21)$$

где $E_{U_{2\min}}$ — промежуточное значение падающей энергии электрической дуги при промежуточном напряжении $U_{2\min}$, Дж/см^2;

$I_{\text{дуги}\,U_{2\min}}$ — пониженное значение тока дуги при промежуточном напряжении $U_{2\min}$, кА;

T — время горения электрической дуги, соответствующее значению тока дуги $I_{\text{дуги}_{2\min}}$, мс;

p_1—p_{13} — коэффициенты, приведенные в таблице 10.

6.4.7 Вероятное значение падающей энергии электрической дуги для пониженного тока дуги $I_{\text{дуги}_{\min}}$ определяют по формуле

$$E_{I_{\text{дуги}_{\min}}} = \frac{E_{U_{2\min}} - E_{U_{1\min}}}{11{,}6}\left(U - 14{,}3\right) + E_{U_{2\min}}, \quad (22)$$

где $E_{I_{\text{дуги}_{\min}}}$ — вероятное значение падающей энергии электрической дуги для пониженного тока дуги $I_{\text{дуги}_{\min}}$;

$E_{U_{1\min}}$ — промежуточное значение падающей энергии электрической дуги при промежуточном напряжении $U_{1\min}$, Дж/см^2;

$E_{U_{2\min}}$ — промежуточное значение падающей энергии электрической дуги при промежуточном напряжении $U_{2\min}$, Дж/см^2;

Примечание — Для перевода полученного значения падающей энергии электрической дуги в кал/см^2 необходимо разделить результат расчета на 4,184.

6.4.8 Для защитных устройств с времятоковыми характеристиками в качестве окончательного вероятного значения падающей энергии электрической дуги выбирают максимальное из двух расчетных значений $E_{I_{дуги_{min}}}$ и $E_{I_{дуги}}$, полученных в результате вычислений по формулам (19) и (22).

6.4.9 В случае размещения в опасной точке токоведущих частей одновременно горизонтально и вертикально проводят два расчета.

6.5 Модель расчета для ЭУ напряжением свыше 1000 В и токами КЗ свыше 65 000 А

6.5.1 Модель расчета для ЭУ напряжением свыше 1000 и токами КЗ свыше 65 000 А применяют при выполнении следующих условий:

- пространственное расположение проводников: ВРЗ/ВРО/ГРЗ/ГРО/ВРБ;
- любой режим работы нейтрали.

6.5.2 Вычисляют промежуточные значения токов дуги, эквивалентных значениям промежуточных напряжений U_1 и U_2, по формуле

$$I_{дуги\ U_{хх}} = 10^{\left(k_1+k_2\times\lg\left(\frac{I_{КЗ}}{2}\right)+k_3\times\lg G\right)}\times$$
$$\times\left(k_4\times\left(\frac{I_{КЗ}}{2}\right)^6+k_5\times\left(\frac{I_{КЗ}}{2}\right)^5+k_6\times\left(\frac{I_{КЗ}}{2}\right)^4+k_7\times\left(\frac{I_{КЗ}}{2}\right)^3+k_8\times\left(\frac{I_{КЗ}}{2}\right)^2+k_9\times\left(\frac{I_{КЗ}}{2}\right)+k_{10}\right), \quad (23)$$

где $I_{дуги\ U_{хх}}$ — промежуточное значение тока дуги при $U_{хх} = U_1, U_2$, кА;

$I_{кз}$ — значение тока КЗ, кА;

k_1—k_8 — коэффициенты, приведенные в таблице 11.

Таблица 11 — Коэффициенты для расчета промежуточного значения тока дуги по формуле (23)

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты					
	$U_{хх}$	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
ВРЗ	U_1	0,0065	1,001	–0,024	$-1{,}557\times10^{-12}$	$4{,}556\times10^{-10}$
	U_2	0,005795	1,015	–0,011	$-1{,}557\times10^{-12}$	$4{,}556\times10^{-10}$
ВРБ	U_1	0,002823	0,995	–0,0125	0	$-9{,}204\times10^{-11}$
	U_2	0,014827	1,01	–0,01	0	$-9{,}204\times10^{-11}$
ГРЗ	U_1	0,001011	1,003	–0,0249	0	0
	U_2	0,008693	0,999	–0,02	0	$-5{,}043\times10^{-11}$
ВРО	U_1	–0,02395	1,006	–0,0188	$-1{,}557\times10^{-12}$	$4{,}556\times10^{-10}$
	U_2	0,005371	1,0102	–0,029	$-1{,}557\times10^{-12}$	$4{,}556\times10^{-10}$
ГРО	U_1	0,000435	1,006	–0,038	0	0
	U_2	0,000904	0,999	–0,02	0	0

Окончание таблицы 11

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты				
	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}
ВРЗ	$-4{,}186\times10^{-8}$	$8{,}346\times10^{-7}$	$5{,}482\times10^{-5}$	–0,003191	0,9729
	$-4{,}186\times10^{-8}$	$8{,}346\times10^{-7}$	$5{,}482\times10^{-5}$	–0,003191	0,9729
ВРБ	$2{,}901\times10^{-8}$	$-3{,}262\times10^{-6}$	0,0001569	–0,004003	0,9825
	$2{,}901\times10^{-8}$	$-3{,}262\times10^{-6}$	0,0001569	–0,004003	0,9825
ГРЗ	$-4{,}859\times10^{-10}$	$-1{,}814\times10^{-7}$	$-9{,}128\times10^{-6}$	–0,0007	0,9881
	$2{,}233\times10^{-8}$	$-3{,}046\times10^{-6}$	0,000116	–0,001145	0,9839
ВРО	$-4{,}186\times10^{-8}$	$8{,}346\times10^{-7}$	$5{,}482\times10^{-5}$	–0,003191	0,9729
	$-4{,}186\times10^{-8}$	$8{,}346\times10^{-7}$	$5{,}482\times10^{-5}$	–0,003191	0,9729
ГРО	$7{,}859\times10^{-10}$	$1{,}914\times10^{-7}$	$-9{,}128\times10^{-6}$	–0,0007	0,9981
	$7{,}859\times10^{-10}$	$1{,}914\times10^{-7}$	$-9{,}128\times10^{-6}$	–0,0007	0,9981

6.5.3 Вычисляют промежуточные значения падающей энергии электрической дуги, эквивалентные тем, что соответствуют значениям напряжения U_1 и U_2, по формулам:

$$E_{U_1} = \frac{12{,}552}{50} \times T \times 10^{\left(m_1 + m_2 \times \lg G + \frac{m_3 \times I_{\text{дуги}\,U_1}}{m_4 \times \left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right)^7 + m_5 \times \left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right)^6 + m_6 \times \left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right)^5 + m_7 \times \left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right)^4 + m_8 \times \left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right)^3 + m_9 \times \left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right)^2 + m_{10} \times \left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right)} + m_{11} \times \lg\left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right) + m_{12} \times \lg D + m_{13} \times \lg I_{\text{дуги}\,U_1} + \lg\frac{1}{CF} \right)},$$

(24)

где E_{U_1} — промежуточное значение падающей энергии электрической дуги при промежуточном напряжении U_1, Дж/см^2;

$I_{\text{дуги}\,U_1}$ — значение тока дуги при промежуточном напряжении U_1, кА;

$I_{\text{кз}}$ — значение тока КЗ, кА;

m_1—m_{13} — коэффициенты, приведенные в таблице 12.

Таблица 12 — Коэффициенты для расчета значения промежуточного среднего квадратического значения падающей энергии электрической дуги по формуле (24)

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты					
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6
ВРЗ	2,40021	0,165	0,354202	$-1{,}557 \times 10^{-12}$	$4{,}556 \times 10^{-10}$	$-4{,}186 \times 10^{-8}$
ВРБ	3,870592	0,185	–0,736618	0	$-9{,}204 \times 10^{-11}$	$2{,}901 \times 10^{-8}$
ГРЗ	3,486391	0,177	–0,193101	0	0	$4{,}859 \times 10^{-10}$
ВРО	3,880724	0,105	–1,906033	$-1{,}557 \times 10^{-12}$	$4{,}556 \times 10^{-10}$	$-4{,}186 \times 10^{-8}$
ГРО	3,616266	0,149	–0,761561	0	0	$7{,}859 \times 10^{-10}$

Окончание таблицы 12

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты						
	m_7	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}	m_{13}
ВРЗ	$8{,}346 \times 10^{-7}$	$5{,}482 \times 10^{-5}$	–0,003191	0,9729	0	–1,569	0,9778
ВРБ	$-3{,}262 \times 10^{-6}$	0,0001569	–0,004003	0,9825	0	–1,742	1,09
ГРЗ	$-1{,}814 \times 10^{-7}$	$-9{,}128 \times 10^{-6}$	–0,0007	0,9881	0,027	–1,723	1,055
ВРО	$8{,}346 \times 10^{-7}$	$5{,}482 \times 10^{-5}$	–0,003191	0,9729	0	–1,515	1,115
ГРО	$-1{,}914 \times 10^{-7}$	$-9{,}128 \times 10^{-6}$	–0,0007	0,9981	0	–1,639	1,078

$$E_{U_2} = \frac{12{,}552}{50} \times T \times 10^{\left(p_1 + p_2 \times \lg G + \frac{p_3 \times I_{\text{дуги}\,U_2}}{p_4 \times \left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right)^7 + p_5 \times \left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right)^6 + p_6 \times \left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right)^5 + p_7 \times \left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right)^4 + p_8 \times \left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right)^3 + p_9 \times \left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right)^2 + p_{10} \times \left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right)} + p_{11} \times \lg\left(\frac{I_{\text{КЗ}}}{2}\right) + p_{12} \times \lg D + p_{13} \times \lg I_{\text{дуги}\,U_2} + \lg\frac{1}{CF} \right)},$$

(25)

где E_{U_2} — промежуточное значение падающей энергии электрической дуги при промежуточном напряжении U_2, Дж/см^2;

$I_{\text{дуги}\,U_2}$ — значение тока дуги при промежуточном напряжении U_2, кА;

$I_{\text{кз}}$ — значение тока КЗ, кА;

p_1—p_{13} — коэффициенты, приведенные в таблице 13.

Таблица 13 — Коэффициенты для расчета значения промежуточного значения падающей энергии электрической дуги по формуле (25)

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты					
	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
ВРЗ	3,825917	0,11	–0,999749	$-1,557 \times 10^{-12}$	$4,556 \times 10^{-10}$	$-4,186 \times 10^{-8}$
ВРБ	3,644309	0,215	–0,585522	0	$-9,204 \times 10^{-11}$	$2,901 \times 10^{-8}$
ГРЗ	3,044516	0,125	0,245106	0	$-5,043 \times 10^{-11}$	$2,233 \times 10^{-8}$
ВРО	3,405454	0,12	–0,93245	$-1,557 \times 10^{-12}$	$4,556 \times 10^{-10}$	$-4,186 \times 10^{-8}$
ГРО	2,04049	0,177	1,005092	0	0	$7,859 \times 10^{-10}$

Окончание таблицы 13

Вариант пространственного расположения проводников	Коэффициенты						
	p_7	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}	p_{12}	p_{13}
ВРЗ	$8,346 \times 10^{-7}$	$5,482 \times 10^{-5}$	–0,003191	0,9729	0	–1,568	0,99
ВРБ	$-3,262 \times 10^{-6}$	0,0001569	–0,004003	0,9825	0	–1,677	1,06
ГРЗ	$-3,046 \times 10^{-6}$	0,000116	–0,001145	0,9839	0	–1,655	1,084
ВРО	$8,346 \times 10^{-7}$	$5,482 \times 10^{-5}$	–0,003191	0,9729	0	–1,534	0,979
ГРО	$-1,914 \times 10^{-7}$	$-9,128 \times 10^{-6}$	–0,0007	0,9981	–0,05	–1,633	1,151

6.5.4 Окончательное вероятное значение падающей энергии электрической дуги вычисляют по формуле

$$E = \left(\frac{E_{U_2} - E_{U_1}}{11,6} \left(U - 14,3 \right) + E_{U_2} \right) \times 2, \tag{26}$$

где E — вероятное значение падающей энергии электрической дуги в ЭУ напряжением свыше 1000 В и токами КЗ свыше 65 000 А, Дж/см^2.

Примечание — Для перевода полученного значения падающей энергии электрической дуги в кал/см^2 необходимо разделить результат расчета на 4,184.

6.5.5 В случае размещения в опасной точке токоведущих частей одновременно горизонтально и вертикально проводят два расчета.

Приложение А
(справочное)

Пример расчета вероятного значения падающей энергии электрической дуги в ЭУ

А.1 На примере одполинейной схемы электрических соединений для РУ 220 кВ и 10 кВ определяют опасные точки (см. рисунки А.1 и А.2).

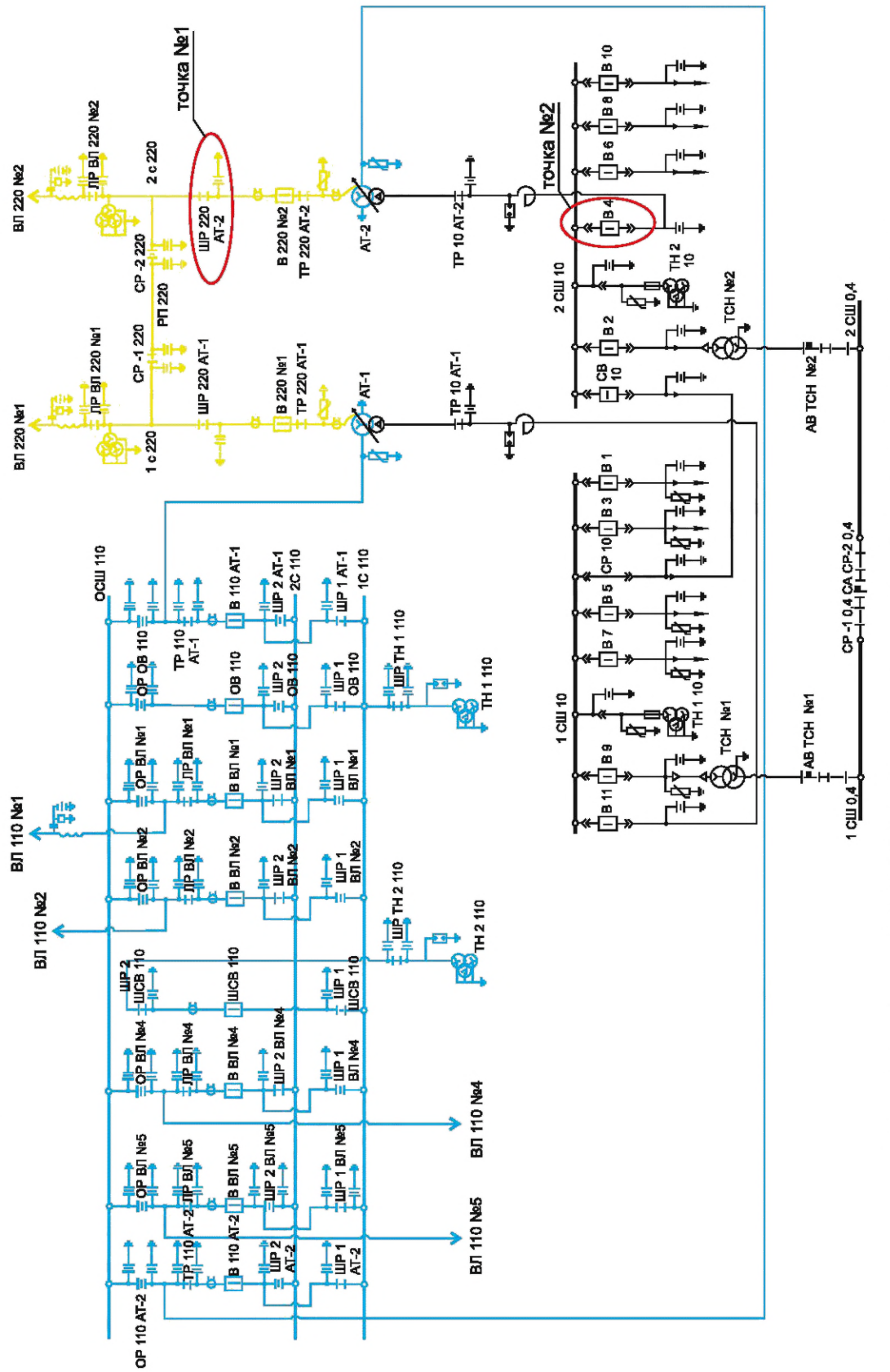

Рисунок А.1 — Схема ПС 220/110/10 кВ «Пример» с указанием выбранных для расчета опасных точек

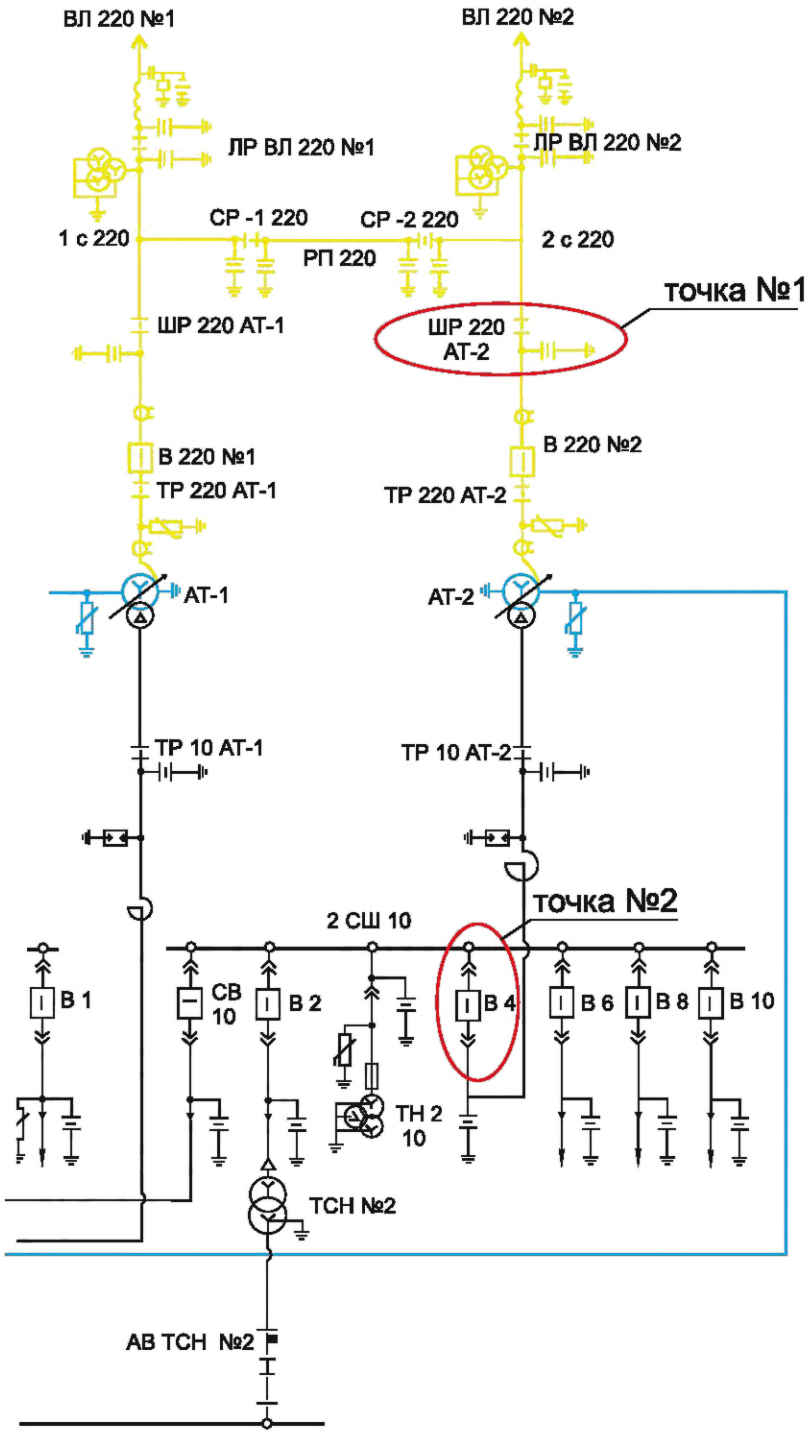

Рисунок А.2 — Увеличенный фрагмент схемы ПС 220/110/10 кВ «Пример» с указанием выбранных для расчета опасных точек

А.2 В качестве опасных точек выбирают следующие коммутационные аппараты:

- по РУ 220 кВ в качестве примера: ШР 220 АТ-2 как опасную точку № 1;
- по РУ 10 кВ в качестве примера: ячейку с В 4 как опасную точку № 2.

А.3 На примере опасных точек № 1 и № 2 определяют параметры для расчета вероятного значения падающей энергии электрической дуги.

А.3.1 Опасная точка № 1

А.3.1.1 Опасная точка № 1: ШР 220 АТ-2 является разъединителем типа РДЗ-1-220Б /2000 УХЛ1, параметры для расчета:

$I_{кз}$ = 11,56 кА (ток трехфазного КЗ на ВЛ 220);

U = 220 кВ;

X_1 — ГРО, так как разъединитель двухколонковый с горизонтально-поворотным механизмом главных ножей, и их перемещение происходит в горизонтальной плоскости;

T = 0,06 + 0,13 = 0,19 с (время срабатывания определяют по картам уставок и с учетом полного времени отключения выключателя). Время — согласно карте уставок по таблице А.1. Данные защиты будут воздействовать на отключение В 220 № 1 типа ВМТ-220Б-20/1000, полное время отключения которого согласно паспорту составляет 0,13 с.

Таблица А.1

Устройства РЗиА	Параметры устройств РЗиА		
ДФЗ	Тип ТТ, Ктт		ТФЗМ-220 2000/1
	Тип ТН, Ктн		НКФ-220 2200/0,1
	Iср, А		2600
	Tср, с		**0,06**
	Уставки заданы письмом		
ДЗ	Тип ТТ, Ктт		ТФЗМ-220 2000/1
	I ступень	Xср	12
		Rср	6
		Ф1	80
	II ступень	Xср	20
		Rср	10
		Ф4	–10
		Ф1	80
		Tср	1,8
	III ступень	Xср	74
		Rср	38
		Ф1	80
		Tср	2,3
	IV ступень	Xср	34
		Rср	18
		Ф1	80
		Tср	1,2
		Направление	Вперед
	V ступень	Xср	177
		Rср	91
		Ф1	80
		Tср	5,9
		Направление	Вперед
ТЗНП	I ступень	Iср	4890
		Tср	**0,06**

Окончание таблицы А.1

Устройства РЗиА	Параметры устройств РЗиА		
ТЗНП	II ступень	Iср	3370
		Tср	0,7
	III ступень	Iср	2600
		Tср	1,2
	IV ступень	Iср	1280
		Tср	1,9
	V ступень	Iср	600
		Tср	4,1
	VI ступень	Iср	415
		Tср	6,9
АПВ	$T_{АПВ}$, с		3,7
	РН на шинах	U ном	50 В
	РН на линии	U ном	50 В

D = 2000 мм (в качестве расстояния до источника дуги принимают фактическое расстояние от персонала до источника дуги, при его размещении (пространственном положении) при выполнении операций с данным коммутационным аппаратом, соответствующее 2000 мм).

G = 2000 мм (исходя из паспортных данных на разъединитель (см. рисунок А.3), так как привод на все фазы общий, то для варианта расположения X_1 выбирают 2000 мм).

Вид РУ — ОРУ.

Наименование параметров	**Значения для РДЗ 220**			**Значения для РДЗ 150**		**Значения для РДЗ 110**		
	Номинальный ток, А							
	1000	***2000***	***3150***	***1000***	***2000***	***1000***	***2000***	***3150***
Время протекания тока термической стойкости, с: **для главных ножей** **для заземляющих ножей**	**3** **1**							
Длина пути утечки внешней изоляции, см, не менее	**405**			**270**		**200**		
Тяжение проводов в горизонтальной плоскости с учетом влияния ветра Н, не менее	**1000**	**1200**	**1200**	**800**	**1000**	**800**	**1000**	**1000**
Минимальные изоляционные расстояния от токоведущих частей до различных элементов разъединителя в свету, мм: **- от токоведущих частей до заземленных конструкций;** **- между токоведущими частями разных фаз;** **- между разомкнутыми контактами полюса**	**1800** **2000** **1800**			**1300** **1400** **1300**		**900** **1000** **900**		
Примечание – Разъединители на номинальный ток 1000 А допускают длительное протекание тока 1200 А при температуре окружающего воздуха до 28 °С, разъединители на номинальный ток 2000 А - тока величиной 2400 А при температуре окружающего воздуха до 18° С, разъединители на номинальный ток 3150 А - тока величиной 3780 А при температуре окружающего воздуха до 20 °С.								

Рисунок А.3 — Паспортные данные разъединителя

А.3.1.2 Расчет вероятного значения падающей энергии электрической дуги для опасной точки № 1 (вариант X_1 — ГРЗ)

Вычисляют средние квадратические значения токов дуги для промежуточных напряжений:

$$I_{\text{дуги } U_1} = 10^{(0{,}000435 + 1{,}006 \times \lg(11{,}56) - 0{,}038 \times \lg 2000)} \times (7{,}859 \times 10^{-10} \times 11{,}56^4 + 1{,}914 \times 10^{-7} \times 11{,}56^3 - 9{,}128 \times 10^{-6} \times 11{,}56^2 - 0{,}0007 \times 11{,}56 + 0{,}9981) = 8{,}701 \text{ кА},$$

$$I_{\text{дуги } U_2} = 10^{(0{,}000904 + 0{,}009 \times \lg(11{,}56) - 0{,}02 \times \lg 2000)} \times (7{,}859 \times 10^{-10} \times 11{,}56^4 + 1{,}914 \times 10^{-7} \times 11{,}56^3 - 9{,}128 \times 10^{-6} \times 11{,}56^2 - 0{,}0007 \times 11{,}56 + 0{,}9981) = 9{,}812 \text{ кА}.$$

Далее рассчитывают промежуточные вероятные значения падающей энергии электрической дуги:

$$E_{U_1} = \frac{12{,}552}{50} \times 190 \times 10^{\left(3{,}616266 + 0{,}149 \times \lg 2000 + \frac{-0{,}761561 \times 8{,}701}{7{,}859 \times 10^{-10} \times 11{,}56^5 - 1{,}914 \times 10^{-7} \times 11{,}56^4 - 9{,}128 \times 10^{-6} \times 11{,}56^3 - 0{,}0007 \times 11{,}56^2 + 0{,}9981 \times 11{,}56} - 1{,}639 \times \lg 2000 + 1{,}078 \times \lg 8{,}701 + \lg 1\right)} = 6{,}444 \text{ Дж/см}^2,$$

$$E_{U_2} = \frac{12{,}552}{50} \times 190 \times$$

$$\times 10^{\left(2{,}04049 + 0{,}177 \times \lg 2000 + \frac{1{,}005092 \times 9{,}812}{7{,}859 \times 10^{-10} \times 11{,}56^5 - 1{,}914 \times 10^{-7} \times 11{,}56^4 - 9{,}128 \times 10^{-6} \times 11{,}56^3 - 0{,}0007 \times 11{,}56^2 + 0{,}9981 \times 11{,}56} - 0{,}05 \times \lg 11{,}56 - 1{,}633 \times \lg 2000 - 1{,}633 \times \lg 9{,}812 + \lg 1\right)} = 7{,}312 \text{ Дж/см}^2.$$

Расчет окончательного вероятного значения падающей энергии электрической дуги:

$$E = \frac{7{,}312 - 6{,}444}{11{,}6}(220 - 14{,}3) + 7{,}312 = 22{,}704 \text{ Дж/см}^2 = 5{,}426 \text{ кал/см}^2.$$

А.3.2 Опасная точка № 2

А.3.2.1 Опасная точка № 2: ячейка выключателя В 4 является выкатным выключателем типа ВМПЭ-10-630-20У2, расположенным в ячейке типа К-49, параметры для расчета:

$I_{\text{кз}}$ = 19,34 кА (ток трехфазного КЗ на 2 СШ 10);

U = 10 кВ;

X_1 — ГРЗ (в случае межфазного замыкания контактов выключателя в горизонтальной плоскости);

X_2 — ВРЗ (в случае межфазного замыкания контактов выключателя в вертикальной плоскости или при перемещении заземляющих ножей);

T = 0,65 + 0,11 = 0,76 с (время срабатывания определяют по картам уставок и с учетом полного времени отключения выключателя). Время — согласно карте уставок по таблице А.2. Данные защиты будут воздействовать на отключение выключателей В 4 типа ВМПЭ-10-630-20У2, полное время отключения которого согласно паспорту составляет 0,11 с.

Таблица А.2

Устройства РЗиА	Параметры устройства РЗиА	Ввод В 11	Ввод В 4
	Тип защиты	SPAC 801-03	SPAC 810-B
	Тип ТТ	TPU43.23ABB	ТЛК-10-6У3
	Ктт	1000/5	1000/5
I>>>(МТЗ I ст)	$I_{\text{сз пер}}$, А	1200	1200
	$T_{\text{сз}}$, с	0,65	0,65
I>>(МТЗ II ст)	$I_{\text{сз пер}}$, А	520	520
	$T_{\text{сз}}$, с	0,85	0,85
ЛЗШ	$T_{\text{сз}}$, с	0,3	0,3

D = 600 мм (в качестве расстояния до источника дуги принимают фактическое расстояние от персонала до источника дуги, при его размещении (пространственном положении) при выполнении операций с данным коммутационным аппаратом, соответствующее 600 мм).

Исходя из паспортных данных на выключатель/руководства по эксплуатации и ремонту (см. рисунок А.4):

G_1 = 200 × 2 = 400 мм (для трехфазного КЗ с перекрытием контактов по горизонтали);

G_2 = 280 мм (для КЗ с перекрытием контактов по вертикали).

Вид РУ — ЗРУ.

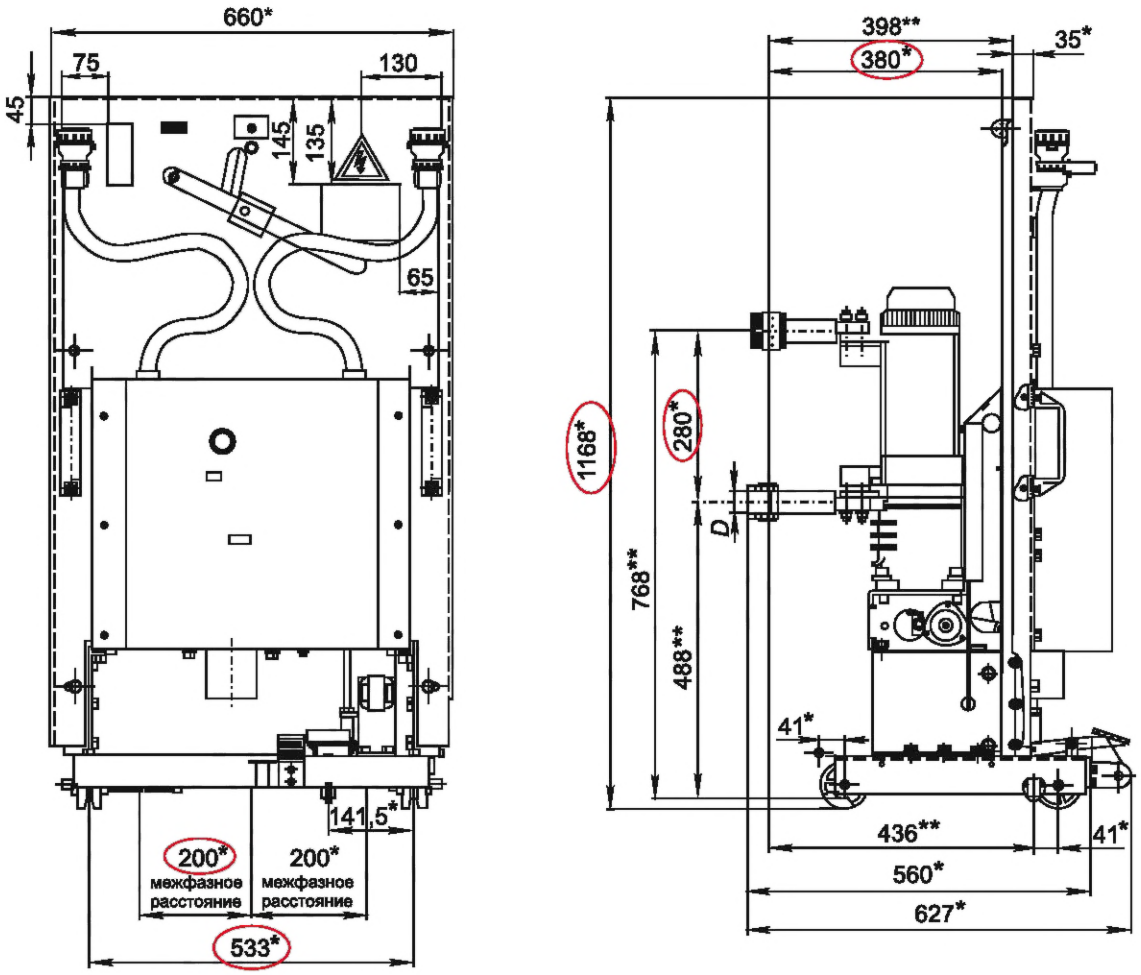

Рисунок А.4 — Определение внутренних размеров ячейки ЗРУ и величины зазора

А.3.2.2 Расчет вероятного значения падающей энергии электрической дуги для опасной точки № 2 (вариант X_1 — ГРЗ, $G1$):

Вычисляют средние квадратические значения токов дуги для промежуточных напряжений:

$$I_{\text{дуги}U_1} = 10^{(0{,}001011 + 1{,}003 \cdot \lg 19{,}34 - 0{,}0249 \cdot \lg 400)}(-4{,}859 \cdot 10^{-9} \cdot 19{,}34^4 - 1{,}814 \cdot 10^{-7} \cdot 19{,}34^3 - 9{,}128 \cdot 10^{-6} \cdot 19{,}34^2 - 0{,}0007 \cdot 19{,}34 + 0{,}9881) = 16{,}338 \text{ кА};$$

$$I_{\text{дуги}U_2} = 10^{(0{,}008693 + 0{,}999 \cdot \lg 19{,}34 - 0{,}02 \cdot \lg 400)}(-5{,}043 \cdot 10^{-11} \cdot 19{,}34^5 + 2{,}233 \cdot 10^{-8} \cdot 19{,}34^4 - 3{,}046 \cdot 19{,}34^3 + 0{,}000116 \cdot 19{,}34^2 - 0{,}001145 \cdot 19{,}34 + 0{,}9839) = 17{,}208 \text{ кА}.$$

Для расчета поправочного коэффициента внутреннего размера отсека ячейки сначала рассчитывают эквивалентную высоту и ширину ячейки ГРЗ с учетом размеров ячейки на рисунке А.4. Так как внутренние размеры ячейки (высота = 1168 мм, ширина = 533 мм, глубина = 398 мм) относятся к «типовому» отсеку ячейки, то рассчитывают эквивалентные значения высоты и ширины ячейки.

$W_{\text{экв}}$ = 533 × 0,03937 = 20,98 мм;

$$H_{экв} = (660,4 + \left(1168 - 660,4\right) \times \left(\frac{10 + 10}{22}\right)) \times 25,4^{-1} = \left(660,4 + \left(507,6\right) \times \left(0,909\right)\right) \times 0,03937 = \left(660,4 + 461\right) \times 0,03937 = 44,16 \text{ мм};$$

$$EES = \frac{H_{экв} + W_{экв}}{2} = \frac{44,16 + 20,98}{2} = 32,57.$$

Определяют поправочный коэффициент (*CF*) для «типового» отсека ячейки:

$$CF = b_1 \times EES^2 + b_2 \times EES + b_3 = -0,0001923 \times 32,57^2 + 0,01935 \times 32,57 + 0,6899 = 1,116.$$

Рассчитывают промежуточные вероятные значения падающей энергии электрической дуги для варианта X_1 — ГРЗ, *G*1:

$$E_{U_1} = \frac{12,552}{50} \cdot 760 \cdot 10^{\left(3,486391 + 0,177 \cdot \lg 400 + \frac{-0,193101 \cdot 16,338}{4,859 \cdot 10^{-10} \cdot 19,34^5 - 1,814 \cdot 10^{-7} \cdot 19,34^4 - 9,128 \cdot 10^{-6} \cdot 19,34^3 - 0,0007 \cdot 19,34^2 + 0,881 \cdot 19,34} + 0,027 \cdot \lg 19,34 - 1,723 \cdot \lg 600 + 1,055 \cdot \lg 16,338 + \lg \frac{1}{1,116}\right)} =$$

$$= 346,335 \text{ Дж/см}^2;$$

$$E_{U_2} = \frac{12,552}{50} \cdot 760 \cdot 10^{\left(3,044516 + 0,125 \cdot \lg 400 + \frac{0,245106 \cdot 17,208}{-5,043 \cdot 10^{-11} \cdot 19,34^6 + 2,233 \cdot 10^{-8} \cdot 19,34^5 - 3,046 \cdot 10^{-6} \cdot 19,34^4 + 0,000116 \cdot 19,34^3 - 0,001145 \cdot 19,34^2 + 0,9839 \cdot 19,34} - 1,655 \cdot \lg 600 + 1,084 \cdot \lg 17,208 + \lg \frac{1}{1,116}\right)} =$$

$$= 367,677 \text{ Дж/см}^2.$$

Расчет окончательного вероятного значения падающей энергии электрической дуги для варианта X_1 — ГРЗ, *G*1:

$$E_{(ГРЗ)} = \frac{367,677 - 346,335}{11,6}\left(10 - 14,3\right) + 367,677 = \ 359,765 \text{ Дж/см}^2 = 85,986 \text{ кал/см}^2.$$

А.3.2.3 Расчет вероятного значения падающей энергии электрической дуги для опасной точки № 2 (вариант X_2 — ВРЗ, *G*2)

Вычисляют средние квадратические значения токов дуги для промежуточных напряжений:

$$I_{дуги U_1} = 10^{(0,0065 + 1,001 \cdot \lg 19,34 - 0,024 \cdot \lg 280)}(-1,557 \cdot 10^{-12} \cdot 19,34^6 + 4,556 \cdot 10^{-10} \cdot 19,34^5 - 4,186 \cdot 10^{-8} \cdot 19,34^4 + 8,346 \cdot 10^{-7} \cdot 19,34^3 +$$
$$+ 5,4829 \cdot 10^{-5} \cdot 19,34^2 - 0,003191 \cdot 19,34 + 0,9729) = 16,047 \text{ кА};$$

$$I_{дуги U_2} = 10^{(0,005795 + 1,015 \cdot \lg 19,34 - 0,011 \cdot \lg 280)}(-1,557 \cdot 10^{-12} \cdot 19,34^6 + 4,556 \cdot 10^{-10} \cdot 19,34^5 - 4,186 \cdot 10^{-8} \cdot 19,34^4 + 8,346 \cdot 10^{-7} \cdot 19,34^3 +$$
$$+ 5,4829 \cdot 10^{-5} \cdot 19,34^2 - 0,003191 \cdot 19,34 + 0,9729) = 17,969 \text{ кА}.$$

Для расчета поправочного коэффициента внутреннего размера отсека ячейки сначала рассчитывают эквивалентную высоту и ширину ячейки ВРЗ с учетом размеров ячейки на рисунке А.4. Так как внутренние размеры ячейки (высота = 1168 мм, ширина = 533 мм, глубина = 398 мм) относятся к «типовому» отсеку ячейки, то рассчитывают эквивалентные значения высоты и ширины ячейки.

$W_{экв}$ = 533 × 0,03937 = 20,98 мм;

$H_{экв}$ = 1168 × 0,03937 = 45,98 мм;

$$EES = \frac{H_{экв} + W_{экв}}{2} = \frac{45,98 + 20,98}{2} = 33,48.$$

Определяют поправочный коэффициент (*CF*) для «типового» отсека ячейки:

$$CF = b_1 \times EES^2 + b_2 \times EES + b_3 = -0{,}000302 \times 33{,}48^2 + 0{,}03441 \times 33{,}48 + 0{,}4325 = 1{,}246.$$

Рассчитывают промежуточные вероятные значения падающей энергии электрической дуги для варианта X_2 — ВРЗ, *G*2:

$$E_{U_1} = \frac{12{,}552}{50} \cdot 760 \times$$

$$\times 10^{\left(2{,}40021+0{,}165\cdot \lg 280+\frac{0{,}354202\cdot 16{,}047}{-1{,}557\cdot 10^{-12}\cdot 19{,}34^7+4{,}556\cdot 10^{-10}\cdot 19{,}34^6-4{,}186\cdot 10^{-8}\cdot 19{,}34^5+8{,}346\cdot 10^{-7}\cdot 19{,}34^4+5{,}482\cdot 10^{-5}\cdot 19{,}34^3-0{,}003191\cdot 19{,}34^2+0{,}9729\cdot 19{,}34}-1{,}569\cdot \lg 600+0{,}9778\cdot \lg 16{,}047+\lg\frac{1}{1{,}246}\right)} =$$

$$= 132{,}959 \text{ Дж/см}^2;$$

$$E_{U_2} = \frac{12{,}552}{50} \cdot 760 \times$$

$$\times 10^{\left(2{,}825917+0{,}11\cdot \lg 280+\frac{-0{,}999797\cdot 17{,}969}{-1{,}557\cdot 10^{-12}\cdot 19{,}34^7+4{,}556\cdot 10^{-10}\cdot 19{,}34^6-4{,}186\cdot 10^{-8}\cdot 19{,}34^5+8{,}346\cdot 10^{-7}\cdot 19{,}34^4+5{,}482\cdot 10^{-5}\cdot 19{,}34^3-0{,}003191\cdot 19{,}34^2+0{,}9729\cdot 19{,}34}-1{,}568\cdot \lg 600+0{,}99\cdot \lg 16{,}047+\lg\frac{1}{1{,}246}\right)} =$$

$$=148{,}045 \text{ Дж/см}^2.$$

Рассчитывают окончательное вероятное значение падающей энергии электрической дуги для варианта X_2 — ВРЗ, *G*2:

$$E_{(\text{ВРЗ})} = \frac{148{,}045 - 132{,}959}{11{,}6}(10 - 14{,}3) + 148{,}045 = 142{,}467 \text{ Дж/см}^2 = 34{,}047 \text{ кал/см}^2.$$

А.3.2.4 Из двух вариантов расчета $E_{(\text{ГРЗ})}$ и $E_{(\text{ВРЗ})}$ выбирают наибольший расчетный результат $E_{(\text{ГРЗ})} = 85{,}986$ кал/см^2.

Приложение Б
(рекомендуемое)

Применение результатов расчета вероятного значения падающей энергии электрической дуги в ЭУ

Б.1 Полученные вероятные значения падающей энергии электрической дуги для каждой выявленной опасной точки рекомендуется фиксировать и учитывать при составлении и актуализации внутренних документов, используемых в рамках системы управления охраной труда, в частности при проведении мероприятий, связанных с выявлением (идентификацией) опасностей, оценкой и снижением профессиональных рисков в рамках функционирования системы управления охраной труда. Методика расчета вероятного значения падающей энергии электрической дуги в электроустановках и результаты расчетов по ней могут применяться в локальных нормативных актах предприятия, в том числе в инструкциях, регламентирующих правила техники безопасности и охраны труда, при обучении и инструктаже персонала и так далее, а также при проведении расследований обстоятельств несчастных случаев.

Б.2 Мероприятия, направленные на снижение вероятного уровня падающей энергии, могут содержать инженерно-технические решения, направленные на ограничение токов КЗ, уменьшение длительности протекания токов КЗ, дистанцирование персонала от источника потенциальной опасности и т. д.

Б.3 На основании полученного расчетного вероятного значения падающей энергии электрической дуги рекомендуется проводить мероприятия, направленные на обеспечение защиты персонала от термических рисков электрической дуги, включая подбор специальной одежды с необходимым уровнем защиты от термических рисков электрической дуги. При этом уровень защиты специальной одежды должен быть не ниже максимального полученного значения падающей энергии электрической дуги для каждой выявленной опасной точки. Если работник обслуживает несколько электроустановок с различными значениями расчетной падающей энергии электрической дуги, то специальную одежду выбирают по максимальному расчетному значению.

Библиография

[1] Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 15 декабря 2020 года № 903н «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок»

[2] Правила устройства электроустановок. — 7-е издание (утверждены приказом Минэнерго России от 8 июля 2002 г. № 204)

УДК 621.316:006.354 ОКС 13.100

Ключевые слова: электрическая дуга, электроустановка, падающая энергия электрической дуги, оценка риска термического поражения персонала

Редактор *Н.А. Аргунова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *Л.С. Лысенко*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 10.03.2025. Подписано в печать 18.03.2025. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,16.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru