

# **ЗАЩИТА ОТ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА**

## **Часть 1**

### **Общие принципы**

**(IEC 62305-1:2006)**

**Издание неофициальное, предназначенное только для ознакомления**

**[Ск0чать еще](#)**

## Содержание

Введение	
1 Область применения	1
2 Нормативные ссылки	1
3 Термины, определения и сокращения	1
4 Параметры тока молнии	4
5 Повреждения в результате воздействия молнии	4
5.1 Повреждение зданий	4
5.2 Повреждение систем энергоснабжения	6
5.3 Типы ущерба	8
6 Необходимость применения и экономическое преимущество молниезащиты	9
6.1 Необходимость применения молниезащиты	9
6.2 Экономическое преимущество использования молниезащиты	10
7 Меры молниезащиты	10
7.1 Меры молниезащиты с целью снижения угрозы для жизни из-за контактного и шагового напряжения	10
7.2 Меры молниезащиты с целью снижения физического повреждения	10
7.3 Меры молниезащиты с целью снижения сбоев в работе электрических и электронных систем	11
7.4 Выбор мер молниезащиты	11
8 Основные критерии молниезащиты зданий и систем энергоснабжения	11
8.1 Уровни молниезащиты	11
8.2 Зоны молниезащиты	14
8.3 Защита зданий	15
8.4 Защита систем энергоснабжения	16
Приложение А (справочное) Параметры тока молнии	17
Приложение В (справочное) Функции времени тока молнии для целей анализа	24
Приложение С (справочное) Моделирование тока молнии для целей испытания	27
Приложение D (справочное) Контролируемые параметры, моделирующие воздействия молнии на компоненты системы молниезащиты	30
Приложение E (справочное) Выбросы тока вследствие удара молнии в различные точки установки	42
Библиография	46

## Введение

В настоящее время не существует таких устройств и методов, способных изменить естественные погодные явления до такой степени, чтобы предотвратить удар молнии. Дуговые разряды молнии, ударяющие по зданиям, сооружениям (или по их системам энергоснабжения), представляют опасность для самих зданий, сооружений, находящихся внутри оборудования и установок, для жизни людей, а также для энергетических систем, поэтому применение мер молниезащиты является важным.

Необходимость защиты, экономические выгоды устанавливаемых мер защиты и соответствующий их выбор определяют с учетом управления риском. Управление риском рассматривается в IEC 62305-2.

Критерии проектирования, установки и обеспечения мер молниезащиты рассматриваются в трех отдельных группах:

- первая группа, касающаяся мер защиты с целью снижения физического повреждения и опасности для жизни людей в здании, рассматривается в IEC 62305-3;

- вторая группа, касающаяся мер защиты с целью снижения повреждения электрических и электронных систем в здании, рассматривается в IEC 62305-4;

- третья группа, касающаяся мер защиты с целью снижения физического повреждения и поломки систем энергоснабжения в здании (в основном, линии электропередачи и линии связи), рассматривается в IEC 62305-5.

## 1 Область применения

Настоящий предварительный государственный стандарт (далее – предстандарт) устанавливает общие принципы, которым необходимо следовать для защиты от удара молнии:

- зданий, включая находящиеся внутри установки и оборудование, а также людей;
- систем энергоснабжения зданий.

Область применения настоящего предстандarta не охватывает:

- железнодорожную сеть;
- транспортные средства, морские суда, самолеты, прибрежные сооружения;
- подземные напорные трубопроводы высокого давления;
- магистральные линии связи, линии электропередачи и линии телесвязи, не связанные со зданиями и сооружениями.

Примечание – Обычно эти системы рассматривают в специальных регламентах, созданных другими организациями.

## 2 Нормативные ссылки

Для применения настоящего предстандarta необходимы следующие ссылочные стандарты. Для недатированных ссылок применяют последнее издание ссылочного стандарта (включая все его изменения).

IEC 62305-2:2006 Защита от атмосферного электричества. Часть 2. Управление риском

IEC 62305-3:2006 Защита от атмосферного электричества. Часть 3. Физические повреждения конструкций и опасность для жизни

IEC 62305-4:2006 Защита от атмосферного электричества. Часть 4. Электрические и электронные системы внутри конструкций

IEC 62305-5 Защита от атмосферного электричества. Часть 5. Системы энергоснабжения

## 3 Термины, определения и сокращения

**3.1 удар молнии в землю (lightning flash to earth):** Электрический разряд атмосферного происхождения между облаком и землей, состоящий из одного или нескольких импульсов тока.

**3.2 нисходящая молния (downward flash):** Удар молнии, инициированный лидером, направленным от облака к земле.

Примечание – Нисходящая молния состоит из первого короткого импульса тока, за которым может следовать несколько последующих коротких импульсов тока. Первый импульс тока и последующие короткие импульсы тока могут сопровождаться длительными импульсами тока.

**3.3 восходящая молния (upward flash):** Удар молнии, инициированный лидером, направленным от заземленного здания к облаку.

Примечание – Восходящая молния состоит из первого длительного импульса тока как с наложением, так и без наложения на него многократных коротких импульсов тока. Первый импульс тока и последующие короткие импульсы тока могут сопровождаться длительными импульсами тока.

**3.4 грозовой разряд (lightning stroke):** Единичный электрический разряд при ударе молнии в землю.

**3.5 короткий импульс тока (short stroke):** Составляющая тока молнии, которая представляет собой импульсный ток.

Примечание – Этот импульс тока характеризуется временем полуспада  $T_2$ , типичное значение которого менее 2 мс (см. рисунок А.1).

**3.6 длительный импульс тока (long stroke):** Составляющая тока молнии, которая представляет собой непрерывный ток.

Примечание – Продолжительность  $T_{\text{длит}}$  этого непрерывного тока (интервал времени, в течение которого мгновенное значение импульса превышает 10 % от его максимального пикового значения) имеет типичное значение от 2 мс до 1 с (см. рисунок А.2).

**3.7 многократные импульсы тока (multiple strokes):** Удар молнии, состоящей в среднем из трех-четырёх импульсов тока с типичным интервалом времени между ними, равным приблизительно 50 мс.

Примечание – Имеются сведения о случаях, когда имело место несколько десятков импульсов тока с интервалами между ними в пределах от 10 до 250 мс.

**3.8 точка поражения** (point of strike): Точка, в которой молния соприкасается с землей или возвышающимся объектом (например, зданием, ограничителем перенапряжения, системой энергоснабжения, деревом и т. д.).

Примечание – Удар молнии может иметь несколько точек поражения.

**3.9 ток молнии  $i$**  (lightning current  $i$ ): Ток, протекающий в точке поражения.

**3.10 пиковое значение  $I$**  (peak value  $I$ ): Максимальное значение тока молнии.

**3.11 средняя крутизна фронта короткого импульса тока** (average steepness of the front of short stroke current): Среднее отношение изменений тока в пределах временного интервала  $t_2 - t_1$ .

Примечание – Выражается как частное от деления разницы  $i(t_2) - i(t_1)$  значений тока в начале и в конце временного интервала  $t_2 - t_1$  на величину этого интервала (см. рисунок А.1).

**3.12 длительность фронта короткого импульса тока  $T_1$**  (front time of short stroke current  $T_1$ ): Виртуальный параметр, превышающий интервал времени в 1,25 раза, в течение которого мгновенное значение импульса нарастает от 10 % до 90 % его максимального пикового значения (см. рисунок А.1).

**3.13 виртуальная нулевая точка короткого импульса тока  $O_1$**  (virtual origin of short stroke current  $O_1$ ): Точка пересечения с осью времени прямой линии, проходящей через расположенные на фронте импульса тока исходные точки 10 % и 90 % (см. рисунок А.1); она предшествует моменту времени, при котором мгновенное значение тока достигает 10 % от своего пикового значения на  $0,1 \cdot T_1$ .

**3.14 время полуспада короткого импульса тока  $T_2$**  (time to half value of short stroke current  $T_2$ ): Виртуальный параметр, определенный как временной интервал между виртуальной нулевой точкой  $O_1$  и моментом времени, при котором мгновенное значение импульса спадает до 50 % максимального пикового значения (см. рисунок А.1).

**3.15 длительность молнии  $T$**  (flash duration  $T$ ): Время, в течение которого ток молнии достигает точки поражения.

**3.16 продолжительность длительного импульса тока  $T_{\text{длит}}$**  (duration of long stroke current  $T_{\text{длит}}$ ): Интервал времени, в течение которого мгновенное значение импульса превышает 10 % от максимального пикового значения непрерывного тока (см. рисунок А.2).

**3.17 заряд молнии  $Q_{\text{молн}}$**  (flash charge  $Q_{\text{flash}}$ ): Интеграл по времени тока молнии для полной продолжительности удара молнии.

**3.18 заряд короткого импульса тока  $Q_{\text{коротк}}$**  (short stroke charge  $Q_{\text{short}}$ ): Интеграл по времени тока молнии при коротком импульсе тока.

**3.19 заряд длительного импульса тока  $Q_{\text{длит}}$**  (long stroke charge  $Q_{\text{long}}$ ): Интеграл по времени тока молнии при длительном импульсе тока.

**3.20 удельная энергия  $W/R$**  (specific energy  $W/R$ ): Интеграл по времени площади тока молнии для полной продолжительности разряда молнии.

Примечание – Он представляет энергию, выделяемую током молнии, на единицу сопротивления.

**3.21 удельная энергия короткого импульса тока** (specific energy of short stroke current): Интеграл по времени площади тока молнии для полной продолжительности короткого импульса тока.

Примечание – Удельная энергия в длительном импульсе тока не учитывается.

**3.22 защищаемый объект** (object to be protected): Здание или система энергоснабжения, которые должны быть защищены от воздействий молнии.

**3.23 защищаемое здание** (structure to be protected): Здание, защита которого от воздействий молнии предусмотрена в соответствии с требованиями настоящего предстандарта.

Примечание – Защищаемое здание может быть частью более крупного сооружения.

**3.24 защищаемая система энергоснабжения** (service to be protected): Система энергоснабжения, соединенная со зданием, защита которого от воздействий молнии предусмотрена в соответствии с требованиями настоящего предстандарта.

**3.25 удар молнии в объект** (lightning flash to an object): Удар молнии в защищаемый объект.

**3.26 удар молнии вблизи объекта** (lightning flash near an object): Удар молнии на достаточно близком расстоянии от защищаемого объекта, являющийся причиной опасных перенапряжений.

**3.27 электрическая система** (electrical system): Система, содержащая компоненты низковольтного электропитания.

**3.28 электронная система** (electronic system): Система, содержащая чувствительные электронные компоненты, например аппаратуру связи, компьютер, устройства управления и контрольно-измерительные устройства, радиосистему, электронные силовые устройства.

**3.29 внутренние системы** (internal systems): Электрические и электронные системы, находящиеся внутри зданий.

**3.30 физическое повреждение** (physical damage): Повреждение зданий (или их внутренних систем) или системы энергоснабжения вследствие механических, тепловых, химических и взрывоопасных воздействий молнии.

**3.31 угроза для жизни** (injury of living beings): Поражение, в том числе гибель людей или животных, из-за контактного и шагового напряжения, вызываемого молнией.

**3.32 повреждение электрических и электронных систем** (failure of electrical and electronic systems): Необратимое повреждение электрических и электронных систем вследствие электромагнитных импульсов от грозовых разрядов.

**3.33 электромагнитный импульс от грозовых разрядов; ЭМИ** (lightning electromagnetic impulse (LEMP)): Электромагнитное воздействие тока молнии.

Примечание – Оно проявляется в виде импульсных перенапряжений, а также в виде излучаемых импульсов электромагнитного поля.

**3.34 импульсное перенапряжение** (surge): Набегающая волна, вызываемая электромагнитными импульсами от грозовых разрядов и представляющая собой бросок напряжения и/или свертка.

Примечание – Импульсные перенапряжения, вызываемые ЭМИ, могут обуславливаться током (его составляющими) молнии, индукционным эффектом в контурах оборудования и остаточным опасным напряжением в цепях с ограничителями перенапряжения (УЗП).

**3.35 зона молниезащиты; ЗМЗ** (lightning protection zone (LPZ)): Пространство, в котором определена электромагнитная среда.

Примечание – Границы между зонами молниезащиты не всегда являются физическими границами (например, стены, пол и потолок).

**3.36 риск R** (risk R): Значение вероятного среднего годового ущерба (люди и имущество) относительно защищаемого объекта (люди и имущество) вследствие воздействия молнии.

**3.37 допустимый риск  $R_T$**  (tolerable risk  $R_T$ ): Максимальное значение риска, которое может быть установлено в отношении защищаемого объекта.

**3.38 уровень надежности защиты от прямых ударов молнии; ПУМ** (lightning protection level (LPL)): Показатель совокупности значений параметров тока молнии, связанный с вероятностью того, что соответствующие максимальные и минимальные расчетные данные не будут превышены при ударе молнии, возникающей в естественной среде.

Примечание – Уровень надежности защиты от прямых ударов молнии используют для расчета мер защиты в соответствии с необходимой совокупностью значений параметров тока молнии.

**3.39 меры молниезащиты** (protection measures): Меры, которые с целью снижения риска должны приниматься в отношении защищаемого объекта.

**3.40 система молниезащиты; СМЗ** (lightning protection system (LPS)): Комплексная система, используемая для снижения материального ущерба при ударе молнии в здание.

Примечание – Она состоит из внешней и внутренней систем молниезащиты.

**3.41 внешняя система молниезащиты** (external lightning protection system): Часть системы молниезащиты, состоящая из молниеприемников, токоотводов и заземлителей.

**3.42 внутренняя система молниезащиты** (internal lightning protection system): Часть системы молниезащиты, состоящая из системы уравнивания грозовых потенциалов и/или устройств защиты от импульсного перенапряжения.

**3.43 молниеприемник** (air-termination system): Часть внешней системы молниезащиты, которая содержит металлические элементы, например стержни, сетки или натянутые тросы, предназначенные для улавливания разрядов молнии.

**3.44 токоотвод** (down-conductor system): Часть внешней системы молниезащиты, предназначенная для отвода тока молнии от молниеприемника к заземлителю.

**3.45 заземлитель** (earth-termination system): Часть внешней системы молниезащиты, которая предназначена для отвода тока молнии в землю и его растекания в земле.

**3.46 внешние проводящие части** (external conductive parts): Выступающие металлические элементы, входящие или выходящие из защищаемого здания, например сеть трубопроводов, металлические элементы кабелей, металлические трубы и т. д., по которым может протекать часть тока молнии.

**3.47 уравнивание грозовых потенциалов** (lightning equipotential bonding): Заземление наикратчайшим путем отдельных металлических частей посредством токопроводящих проводников или с помощью устройств защиты от импульсных перенапряжений с целью снижения разности грозовых потенциалов между этими частями и контуром заземления, вызываемых током молнии.

**3.48 экранированный провод** (shielding wire): Металлический провод, используемый для уменьшения физического повреждения вследствие удара молнии в систему энергоснабжения.

**3.49 система мер защиты от электромагнитных импульсов от грозовых разрядов** (LEMP protection measures system (LPMS): Полная система мер защиты внутренних систем от электромагнитных импульсов, возникающих от грозовых разрядов.

**3.50 магнитный экран** (magnetic shield): Закрытый металлический экран сетчатого или сплошного типа, окружающий защищаемый объект или его часть, используемый для защиты от возможных повреждений электрических или электронных систем.

**3.51 ограничитель перенапряжения; устройство защиты от импульсных перенапряжений; УЗИП** (surge protective device (SPD): Устройство, предназначенное для ограничения динамических перегрузок по напряжению и отвода сверхтоков. Оно содержит по крайней мере один нелинейный элемент.

**3.52 скоординированная защита от выброса тока** (coordinated SPD protection): Совокупность тщательно выбранных устройств защиты от импульсных перенапряжений, скоординированных и установленных для защиты от возможных повреждений электрических и электронных систем.

**3.53 номинальное импульсное выдерживаемое напряжение  $U_w$**  (rated impulse withstand voltage  $U_w$ ): Импульсное выдерживаемое напряжение, установленное изготовителем для оборудования или его части, характеризующее указанную способность его изоляции выдерживать перенапряжения.

Примечание – В настоящем стандарте рассматриваются только выдерживаемое напряжение между токоведущими проводниками и землей [1].

**3.54 условный импеданс заземления** (conventional earthing impedance): Отношение максимального пикового напряжения заземления к его максимальному пиковому току, которые, как правило, не совпадают по времени.

## 4 Параметры тока молнии

Параметры тока молнии, используемые в серии стандартов IEC 62305, приводятся в приложении А. Функция времени тока молнии, используемая для анализа, указана в приложении В.

Информация о моделировании тока молнии в целях испытания приведена в приложении С.

Основные параметры, используемые в лаборатории для моделирования воздействий молнии на компоненты СМЗ, приведены в приложении D.

Информация о выбросах тока в результате удара молнии в различные точки установки приведена в приложении E.

## 5 Повреждения в результате воздействия молнии

### 5.1 Повреждение зданий

Молния, воздействующая на здание, может являться причиной повреждения самого здания, находящегося внутри него оборудования, включая повреждение внутренних систем, угрозы для жизни. Разрушения и повреждения могут распространяться на прилегающие к зданию объекты и даже окружающую местность. Величина площади распространения зависит как от характеристик здания, так и от характеристик ударов молнии.

#### 5.1.1 Воздействия молнии на здания

Основные характеристики зданий, определяющие степень воздействия молнии, включают:

- конструкцию здания (например, каркас здания, изготовленный из дерева, кирпича, бетона, железобетона и стали);
- функциональное назначение здания (жилое здание, офис, ферма, театр, гостиница, школа, больница, музей, церковь, тюрьма, универмаг, банк, фабрика, промышленное предприятие, спортивное сооружение);

– содержимое здания (люди, животные, наличие воспламеняемых или невоспламеняемых материалов, взрывчатых или невзрывчатых материалов, электрических или электронных систем с низким или высоким выдерживаемым напряжением);

– коммуникационные системы здания (линии электроснабжения, телекоммуникационные линии, трубопроводы);

– существующие или обеспечиваемые меры защиты (например, защитные меры по снижению физического повреждения и опасности для жизни человека, защитные меры по снижению повреждения внутренних систем);

– масштаб распространения опасности (здание, в котором эвакуация затруднена, или сооружение, в котором может возникнуть паника, а также сооружения, опасные для окружающей среды и экологии).

В таблице 1 определены виды повреждений различных типов зданий в результате воздействия молнии.

**Таблица 1 – Воздействия молнии на обычные здания**

Тип объекта в соответствии с его функциональным назначением и/или содержимым	Виды повреждений в результате воздействия молнии
Жилой дом	Отказ электроустановок, повреждение имущества, пожар. Обычно небольшое повреждение предметов, расположенных в месте удара молнии или задетых ее каналом. Повреждение установленного электрического или электронного оборудования и систем (например, телевизоров, компьютеров, модемов, телефонов и т. д.)
Ферма	Пожар и опасные перепады напряжения, а также повреждение имущества. Потеря электропитания с риском гибели животных из-за отказа электронной системы управления вентиляцией и подачи корма и т. д.
Театр, гостиница, школа, универсам, спортивное сооружение	Потеря электроснабжения (например, освещения), вероятность возникновения паники. Отказ системы пожарной сигнализации, вызывающий задержку противопожарных мероприятий
Банк, страховая компания, коммерческий офис и т. д.	Потеря электроснабжения (например, освещения), вероятность возникновения паники, а также отказ системы пожарной сигнализации, вызывающий задержку противопожарных мероприятий. Потеря средств связи, сбои компьютеров с потерей данных
Больница, дом для престарелых людей, тюрьма	Потеря электроснабжения (например, освещения), вероятность возникновения паники, а также отказ системы пожарной сигнализации, вызывающий задержку противопожарных мероприятий. Потеря средств связи, сбои компьютеров с потерей данных, возникновение проблем в оказании помощи тяжелобольным и неподвижным людям
Промышленные предприятия	Дополнительные последствия, зависящие от условий производства: от незначительных повреждений до больших ущербов из-за потерь продукции
Музеи, археологические памятники, церкви	Невосполнимая потеря культурных ценностей
Средства связи, электростанции	Нарушение коммунального обслуживания
Пожароопасные производства	Последствия от пожара и взрыва для предприятия и окружающей среды

### 5.1.2 Источники и типы повреждения зданий

Ток молнии является источником разрушения. В зависимости от точки поражения здания принимают во внимание следующие ситуации:

– S1 – удары молнии в здание;

- S2 – удар молнии вблизи здания;
- S3 – удар молнии в системы энергоснабжения здания;
- S4 – удары молнии вблизи систем энергоснабжения здания.

Удар молнии в здание может привести к следующим последствиям:

- мгновенному механическому повреждению, пожару и/или взрыву вследствие воздействия горячей плазменной дуги самой молнии, вследствие воздействия тока, появляющегося в результате омического нагрева проводов или вследствие электрического заряда, возникающего в результате эрозии в основании дуги (расплавленный металл);

- пожару и/или взрыву, инициированным искрами, вызванными перенапряжениями в результате резистивной и индуктивной связи и протекания части токов молнии;

- угрозе для жизни из-за контактного и шагового напряжения вследствие резистивной и индуктивной связи;

- повреждению или выходу из строя внутренних систем в результате воздействия электромагнитных импульсов грозовых разрядов.

Удар молнии вблизи здания может привести к:

- повреждению или выходу из строя внутренних систем в результате воздействия электромагнитных импульсов грозовых разрядов.

Удар молнии в систему энергоснабжения здания может привести к следующим последствиям:

- пожару и/или взрыву, вызванных искрами, вследствие перенапряжений и воздействия токов молнии, проходящих через системы энергоснабжения;

- угрозе для жизни из-за контактного и шагового напряжений внутри здания, вызванных токами молнии, передаваемых через подсоединенные системы энергоснабжения;

- повреждению или выходу из строя внутренних систем вследствие перенапряжений, возникающих на подсоединенных линиях электропередачи и передаваемых на здание.

Удар молнии вблизи систем энергоснабжения здания может привести к:

- повреждению или выходу из строя внутренних систем вследствие перенапряжений, индуцированных на подсоединенных линиях и передаваемых на здание.

Примечание 1 – Выход из строя внутренних систем не подпадает под действие серии стандартов IEC 62305.

Примечание 2 – Только те искры, которые несут ток молнии (весь или частичный), могут стать причиной пожара.

Примечание 3 – Молнии, ударяющие непосредственно в трубопровод здания или вблизи него, не вызывают повреждений здания при условии, что трубопровод соединен с шиной выравнивания потенциалов (см. IEC 62305-3).

Удар молнии может стать причиной трех основных типов повреждения:

- D1 – угроза для жизни из-за контактного и шагового напряжения;
- D2 – физическое повреждение (пожар, взрыв, механическое разрушение, выбросы химических веществ) вследствие воздействия тока молнии, включая искрение;

- D3 – повреждение внутренних систем в результате воздействия электромагнитных импульсов грозовых разрядов.

## 5.2 Повреждение систем энергоснабжения

Удар молнии в систему энергоснабжения может являться причиной разрушения самих физических средств (линий или труб), используемых для обеспечения работы системы, а также подсоединенного электрического или электронного оборудования.

Примечание – Необходимо рассмотреть физическое соединение между:

- зданием энергоснабжения и энергопотребляющим зданием, или двумя зданиями энергоснабжения, или двумя энергопотребляющими зданиями в отношении телекоммуникационных линий;

- зданием энергоснабжения, энергопотребляющим зданием и точкой разветвления или двумя точками разветвления в отношении телекоммуникационных линий;

- подстанцией высокого напряжения и энергопотребляющим зданием относительно линии электроснабжения;

- основной распределительной станцией и энергопотребляющим зданием относительно трубопровода.

Масштаб этого распространения зависит от характеристик систем энергоснабжения, типа и распространения электрических и электронных систем и от характеристик ударов молнии.

### 5.2.1 Воздействия молнии на системы энергоснабжения

Основные характеристики систем энергоснабжения, определяющие степень воздействия молнии, включают:

- конструкцию (линия – воздушная, подземная, экранированная, неэкранированная, оптоволоконная; трубопровод – наземный, заглубленный, металлический, пластмассовый);
- функциональное назначение (телекоммуникационная линия, линия электроснабжения, трубопровод);
- содержимое конструкции (здание, находящееся внутри него оборудование, размеры, расположение);
- существующие или обеспечиваемые меры защиты (например, экранированная проводка, ограничитель перенапряжения, дублирование маршрута, системы хранения жидкости, генераторные установки, источники бесперебойного питания).

В таблице 2 определены виды повреждений различных типов систем энергоснабжения в результате воздействия молнии.

**Таблица 2 – Воздействия молнии на обычные системы энергоснабжения**

Тип системы электроснабжения	Виды повреждений в результате воздействия молнии
Телекоммуникационная линия	Механическое повреждение линии, плавление экранов и проводов, разрушение изоляции кабеля и оборудования, приводящее к первичному повреждению с мгновенной потерей передачи энергоснабжения. Вторичные повреждения оптических оптоволоконных кабелей с разрушением кабеля, но без потери передачи энергоснабжения
Линия энергоснабжения	Повреждения изоляторов наземной низковольтной линии, пробой изоляции кабельной линии, пробой изоляции линейной аппаратуры и трансформаторов с последующим прекращением энергоснабжения
Водопроводные трубы	Повреждения электрической и электронной аппаратуры управления, которые могут способствовать прекращению энергоснабжения
Газопровод; топливопровод	Пробой неметаллических фланцевых уплотнений, который может вызвать пожар и/или взрыв. Разрушение электрической и электронной аппаратуры управления, которое может способствовать прекращению энергоснабжения

### 5.2.2 Источник и типы повреждения системы энергоснабжения

Ток молнии является источником повреждения. В зависимости от расположения точки поражения относительно рассматриваемой системы энергоснабжения необходимо учитывать следующие ситуации:

- S1 – удары молнии в здание;
- S2 – удары молнии в систему энергоснабжения здания;
- S3 – удары молнии вблизи систем энергоснабжения здания.

Удар молнии в систему энергоснабжения здания может привести к следующим последствиям:

- плавлению металлических проводов и экранов кабелей вследствие попадания тока молнии в систему энергоснабжения (в результате резистивного нагрева);
- разрушению изоляции линий и подсоединенного к ним оборудования (вследствие резистивной связи);

– пробую неметаллических прокладок во фланцах труб, а также прокладок в изолирующих муфтах.

Примечание 1 – Волоконно-оптический кабель без металлического провода не повреждается при ударе молнии в здание.

Удар молнии в систему энергоснабжения здания может привести к следующим последствиям:

- мгновенному механическому повреждению металлических проводов или трубопровода вследствие электродинамического воздействия или нагрева, вызванного током молнии (разрушение и/или плавление металлических проводов, экранов или труб), и вследствие теплового воздействия плазменной дуги самой молнии (пробой пластиковой защитной оболочки);
- мгновенному электрическому повреждению линий (разрушение изоляции) и подсоединенного к ним оборудования;
- пробую тонких наземных металлических труб и неметаллических прокладок во фланцах, что может привести к пожару и взрыву в зависимости от характера передаваемых жидкостей.

Удар молнии вблизи систем энергоснабжения здания может привести к:

- повреждению изоляции линий и подсоединенного к ним оборудования вследствие индуктивной связи.

Примечание 2 – Волоконно-оптический кабель без металлического провода не повреждается при ударе молнии в землю.

Удар молнии может стать причиной трех основных типов повреждения:

- D2 – физическое разрушение (пожар, взрыв, механическое разрушение, выбросы химических веществ) вследствие тепловых воздействий токов молнии;
- D3 – повреждение электрических и электронных систем вследствие перенапряжения.

### 5.3 Типы ущерба

Каждый тип повреждения как по отдельности, так и в комбинации с другими типами может приводить к различным косвенным типам ущерба защищаемого объекта. Тип возникающего ущерба зависит от характеристик самого объекта.

В настоящем стандарте рассматриваются следующие типы ущерба:

- L1 – угроза для жизни;
- L2 – нарушение коммунального обслуживания;
- L3 – невосполнимая потеря культурных ценностей;
- L4 – экономический ущерб (зданий, сооружений и находящегося внутри них оборудования, систем энергоснабжения и деятельности).

Типы ущерба L1, L2 и L3 можно рассматривать как потерю общественных ценностей, тогда как тип ущерба L4 – как чистый экономический ущерб.

К ущербам, которые могут возникать в здании, относятся:

- L1 – угроза для жизни;
- L2 – нарушение коммунального обслуживания;
- L3 – невосполнимая потеря культурных ценностей;
- L4 – экономический ущерб (зданий, сооружений и находящегося внутри них оборудования).

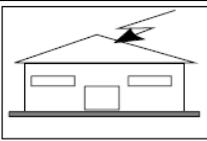
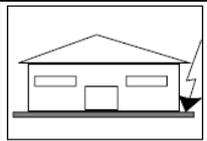
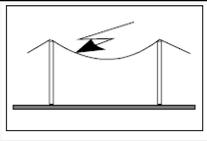
К ущербам, которые могут возникать в системе энергоснабжения, относятся:

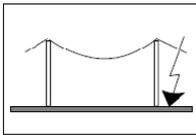
- L2 – нарушение коммунального обслуживания;
- L4 – экономический ущерб (системы энергоснабжения и деятельности).

Примечание – В настоящем предстандарте не рассматривается угроза для жизни, связанная с системой энергоснабжения.

Связь между источником разрушения, типом разрушения и ущербом для зданий показана в таблице 3, а для системы энергоснабжения – в таблице 4.

**Таблица 3 – Типы повреждений и ущербов, причиняемых зданию, в соответствии с точкой удара молнии**

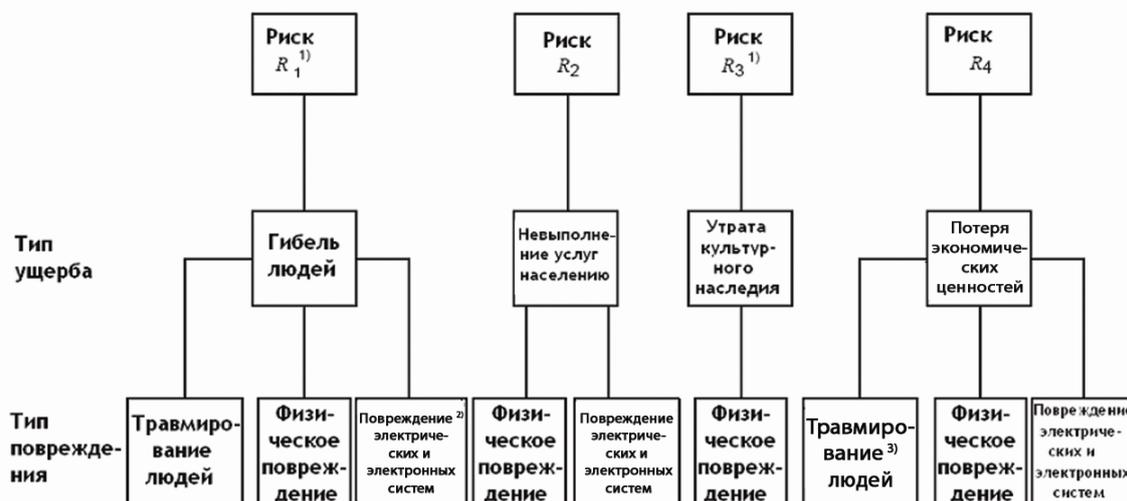
Точка удара	Источник повреждения	Тип повреждения	Тип ущерба	
Здание		S1	D1 D2 D3	L1, L4 ** L1, L2, L3, L4 L1 *, L2, L4
Вблизи здания		S2	D3	L1 *, L2, L4
Система энергоснабжения здания		S3	D1 D2 D3	L1, L4 * L1, L2, L3, L4 L1 *, L2, L4

Вблизи системы энергоснабжения здания		S4	D3	L1 *, L2, L4
<p>* Только для зданий, в которых имеется опасность взрыва, и для больниц или других строений, в которых повреждение внутренних систем сразу же создает угрозу для безопасности людей.  ** Только для строений, в которых могут погибнуть животные.</p>				

**Таблица 4 – Повреждения и ущерб в системе энергоснабжения в зависимости от различных точек удара молнии**

Точка удара	Источник повреждения	Тип повреждения	Тип ущерба
Система энергоснабжения	S3	D2 D3	L2, L4
Вблизи системы энергоснабжения	S4	D3	
Здание, в которое подается энергия	S1	D2, D3	

На рисунке 1 представлены типы ущерба, возникающего в зависимости от различных типов повреждения, и соответствующие риски.



<sup>1)</sup> Только для зданий.

<sup>2)</sup> Только для больниц или других сооружений, повреждение внутренних систем которых мгновенно создает угрозу для безопасности людей.

<sup>3)</sup> Только для строений, в которых могут погибнуть животные.

**Рисунок 1 – Типы ущерба и соответствующие риски, возникающие в результате различных типов разрушения**

## 6 Необходимость применения и экономическое преимущество молниезащиты

### 6.1 Необходимость применения молниезащиты

Следует рассмотреть необходимость применения молниезащиты объекта с целью уменьшения ущерба, наносимого общественным ценностям L1, L2 и L3.

Для оценки целесообразности обеспечения молниезащиты объекта необходимо провести оценку риска в соответствии с процедурами, указанными в IEC 62305-2. Принимают во внимание следующие риски, соответствующие типам ущерба, указанным в 5.3:

- $R_1$  – угроза для жизни;
- $R_2$  – нарушение коммунального обслуживания;

–  $R_3$  – невозполнимая потеря культурных ценностей.

Молниезащита необходима в том случае, если риск  $R$  ( $R_1 - R_3$ ) превышает допустимый уровень  $R_T$ :

$$R > R_T.$$

В этом случае защитные меры используют для того, чтобы снизить риск  $R$  ( $R_1 - R_3$ ) до приемлемого уровня  $R_T$ :

$$R \leq R_T.$$

Если в защищаемом объекте может возникнуть ущерб нескольких типов, то для каждого типа ущерба L1, L2 и L3 должно удовлетворяться условие  $R \leq R_T$ .

Величину допустимого риска  $R_T$ , когда молния может привести к потере культурных ценностей, должен определять компетентный национальный орган.

Примечание 1 – Правовой орган может определять необходимость молниезащиты для конкретных применений без проведения оценки риска. В этих случаях данный орган должен указывать требуемый уровень молниезащиты. В некоторых случаях оценка риска может использоваться как метод обоснования отказа от этих требований.

Примечание 2 – Подробная информация об оценке риска и о процедуре выбора мер представлена в IEC 62305-2.

## 6.2 Экономическое преимущество использования молниезащиты

Кроме необходимости молниезащиты объекта, также может быть полезным оценивание экономических преимуществ обеспечения мер защиты с целью снижения экономического ущерба типа L4.

В этом случае необходимо оценивать риск  $R_4$  экономического ущерба. При оценке риска  $R_4$  рассматривают оценку стоимости экономического ущерба с принятыми мерами защиты или без них.

Молниезащита является рентабельной лишь в том случае, если сумма стоимости  $C_{RL}$  остаточного убытка при наличии мер защиты и стоимости  $C_{PM}$  мер молниезащиты ниже стоимости  $C_L$  общего ущерба без мер молниезащиты:

$$C_{RL} + C_{PM} < C_L.$$

Примечание – Подробная информация об оценке экономического преимущества молниезащиты указана в IEC 62305-2.

## 7 Меры молниезащиты

Меры молниезащиты предпринимаются с целью снижения риска в зависимости от типа разрушения.

### 7.1 Меры молниезащиты с целью снижения угрозы для жизни из-за контактного и шагового напряжения

К возможным мерам молниезащиты относят:

- соответствующую изоляцию открытых токопроводящих частей;
- уравнивание грозовых потенциалов посредством сложно замкнутой системы заземления;
- физические ограничения и предупреждения.

Примечание 1 – Уравнивание грозовых потенциалов не является эффективным в отношении контактного напряжения.

Примечание 2 – Увеличение поверхностного удельного сопротивления поверхностей внутри здания и снаружи может уменьшить опасность для жизни (см. IEC 62305-3, раздел 8).

### 7.2 Меры молниезащиты с целью снижения физического повреждения

К возможным мерам молниезащиты относят:

а) для зданий:

- систему молниезащиты.

Примечание 1 – Если установлена система молниезащиты, то уравнивание грозовых потенциалов является важной мерой по снижению пожаро- и взрывоопасности и опасности для жизни людей. Более подробную информацию см. в IEC 62305-3.

Примечание 2 – Условия, ограничивающие развитие и распространение пожара, например огнетушители, гидранты, пожарная сигнализация и противопожарные установки, могут снизить физическое разрушение.

Примечание 3 – Защищенные пути эвакуации обеспечивают защиту персонала.

б) для систем энергоснабжения:

- экранированную проводку.

Примечание 4 – Для подземного кабеля эффективной молниезащитой является металлический кондуит.

### 7.3 Меры молниезащиты с целью снижения сбоев в работе электрических и электронных систем

К возможным мерам молниезащиты относят:

а) для зданий:

– СМЗ электромагнитного импульса от грозовых разрядов, включающую следующие меры, используемые как по отдельности, так и в совокупности с другими мерами:

- заземления и соединения;
- магнитное экранирование;
- трассу линии электропередачи;
- «скоординированную защиту ограничителей перенапряжения»;

б) для системы энергоснабжения:

- ограничители перенапряжения в различных местах расположения вдоль и в конце линии;
- магнитные экраны кабелей.

Примечание 1 – Обеспечение сплошного металлического экрана соответствующей толщины для подземных кабелей является высокоэффективной мерой молниезащиты.

Примечание 2 – Резервная разводка, аппаратура резервирования, автономные силовые генераторные установки, бесперебойные энергоустановки, системы хранения жидкости и автоматические системы обнаружения повреждения также являются эффективными мерами молниезащиты для снижения ущерба, наносимого функционированию системы энергоснабжения.

Примечание 3 – Повышенное выдерживаемое напряжение изоляции оборудования и кабелей является эффективной мерой молниезащиты против повреждения из-за перенапряжения.

### 7.4 Выбор мер молниезащиты

Проектировщик и владелец здания осуществляют выбор наиболее подходящих мер молниезащиты в соответствии с типом и объемом повреждения каждого вида, а также техническими и экономическими аспектами, касающимися различных мер молниезащиты.

Критерии оценки риска и выбор наиболее подходящих мер молниезащиты установлены в IEC 62305-2.

Меры молниезащиты являются эффективными при условии, что они отвечают требованиям соответствующих стандартов и могут противостоять нагрузке в месте их применения.

## 8 Основные критерии молниезащиты зданий и систем энергоснабжения

Идеальной молниезащитой зданий и систем энергоснабжения является огораживание защищаемого объекта заземленным, сплошным и полностью проводящим экраном соответствующей толщины и обеспечение соединения в точке входа в экран системы энергоснабжения, подсоединенной к зданию. Это предотвращает прохождение тока молнии и связанного с ним электромагнитного поля в защищаемый объект, а также тепловое и электродинамическое воздействие тока, попадание опасных искровых разрядов в защищаемый объект и перенапряжений внутренних систем.

На практике обеспечение оптимальной молниезащиты по всей протяженности объекта зачастую является невозможным и неэффективным. Отсутствие целостности экрана и/или несоответствующая его толщина позволяют току молнии проникать в объект, вызывая при этом:

- физическое повреждение и угрозу для жизни;
- повреждение внутренних систем;
- повреждение системы энергоснабжения и связанных с ней систем.

Меры молниезащиты, принятые для снижения вероятности таких повреждений и последующего ущерба, следует проектировать с учетом определенной совокупности параметров тока молнии, в отношении которых требуется молниезащита (уровень молниезащиты).

### 8.1 Уровни молниезащиты

В настоящем стандарте установлены четыре уровня надежной защиты от ПУМ (I – IV). Для этих уровней определены максимальные и минимальные параметры тока молнии.

Примечание 1 – Молниезащита, параметры максимального и минимального тока молнии которой превышают параметры уровня I, в настоящем стандарте не рассматривается.

Примечание 2 – Вероятность возникновения молнии с минимальными или максимальными параметрами, выходящими за пределы диапазона значений, определенных для уровня молниезащиты I, составляет менее 2 %.

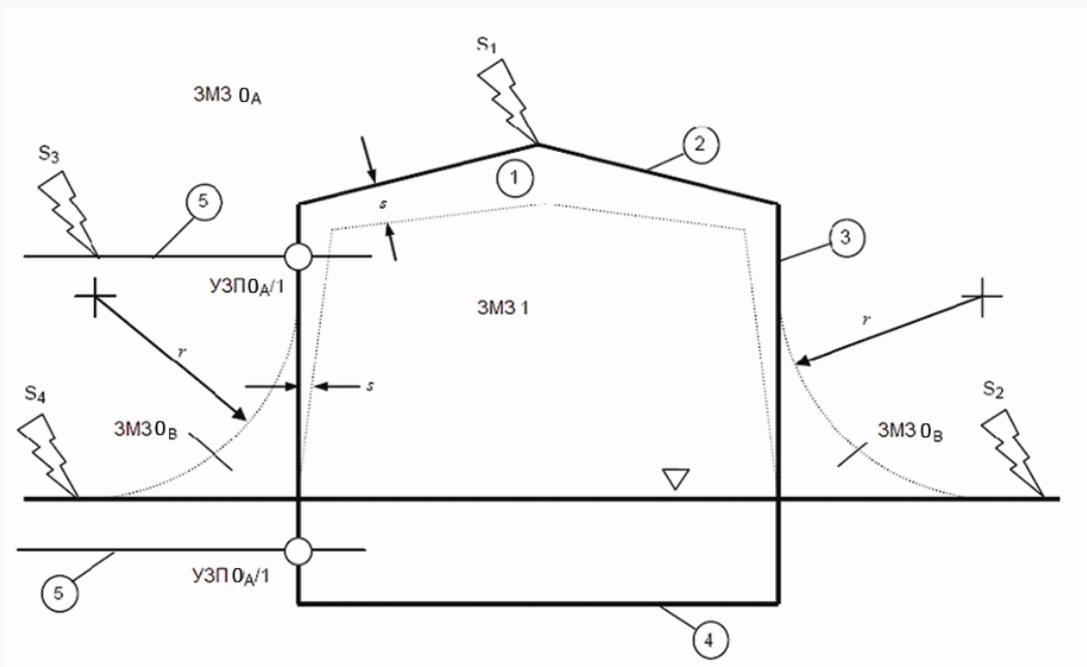
Вероятность того, что максимальные значения параметров тока молнии, соответствующие уровню молниезащиты I, не будут увеличиваться, составляет 99 %. Согласно принятому соотношению полярности (см. А.2) значения, взятые из положительных разрядов, должны быть ниже 10 %, тогда как значения, взятые из отрицательных разрядов, должны быть менее 1 % (см. А.3).

По отношению к уровню молниезащиты I максимальные значения параметров амплитуды тока молнии уровня молниезащиты II снижены до 75 %, а уровней молниезащиты III и IV до 50 % (параметры линейны для  $I$ ,  $Q$  и  $di/dt$ , но квадратичны для  $W/R$ ). Параметры времени являются неизменными. Максимальные значения параметров амплитуды тока молнии для различных уровней молниезащиты указаны в таблице 5 и используются для проектирования компонентов молниезащиты (например, сечение проводов, толщина металлических листов, мощность тока ограничителей перенапряжения, электроразрядники), а также для определения контролируемых параметров, имитирующих воздействия молнии на такие компоненты (см. приложение D).

Минимальные значения параметров амплитуды тока молнии для различных уровней молниезащиты используют для получения радиуса катящейся сферы (см. А.4) с целью определения ЗМЗ  $O_B$ , достичь которой прямой разряд не может (см. 8.2 и рисунки 2, 3). Минимальные значения параметров тока молнии вместе с радиусом катящейся сферы указаны в таблице 6. Они используются для определения местоположения и зоны  $O_B$  ЗМЗ (см. 8.2).

**Таблица 5 – Максимальные значения параметров молнии в соответствии с уровнем молниезащиты**

Первый короткий импульс тока			Уровень молниезащиты			
Параметры тока	Символ	Единица измерения	I	II	III	IV
Пиковое значение тока	$I$	кА	200	150	100	
Электрический заряд короткого импульса тока	$Q_{\text{коротк}}$	Кл	100	75	50	
Удельная энергия	$W/R$	МДж/Ом	10	5,6	2,5	
Параметры времени	$T_1/T_2$	мкс/мкс	10 / 350			
Последующий импульс тока			Уровень молниезащиты			
Пиковое значение тока	$I$	кА	50	37,5	25	
Средняя крутизна	$di/dt$	кА/мкс	200	150	100	
Параметры времени	$T_1/T_2$	мкс/мкс	0,25 / 100			
Длительный удар			Уровень молниезащиты			
Электрический заряд длительного импульса тока	$Q_{\text{длит}}$	Кл	200	150	100	
Параметры времени	$T_{\text{длит}}$	с	0,5			
Удар			Уровень молниезащиты			
Электрический заряд молнии	$Q_{\text{молн}}$	Кл	300	225	150	



1 – здание; 2 – система молниезащиты; 3 – токоотвод; 4 – заземлитель; 5 – входящая система энергоснабжения; S1 – удар молнии в здание; S2 – удар молнии вблизи здания; S3 – удар молнии в систему энергоснабжения здания; S4 – удар молнии вблизи системы энергоснабжения здания;  $r$  – радиус катящейся сферы;  $s$  – зазор, обеспечивающий защиту от опасного искрения;

▽ – уровень земли; о – уравнивание грозовых потенциалов с помощью УЗП.

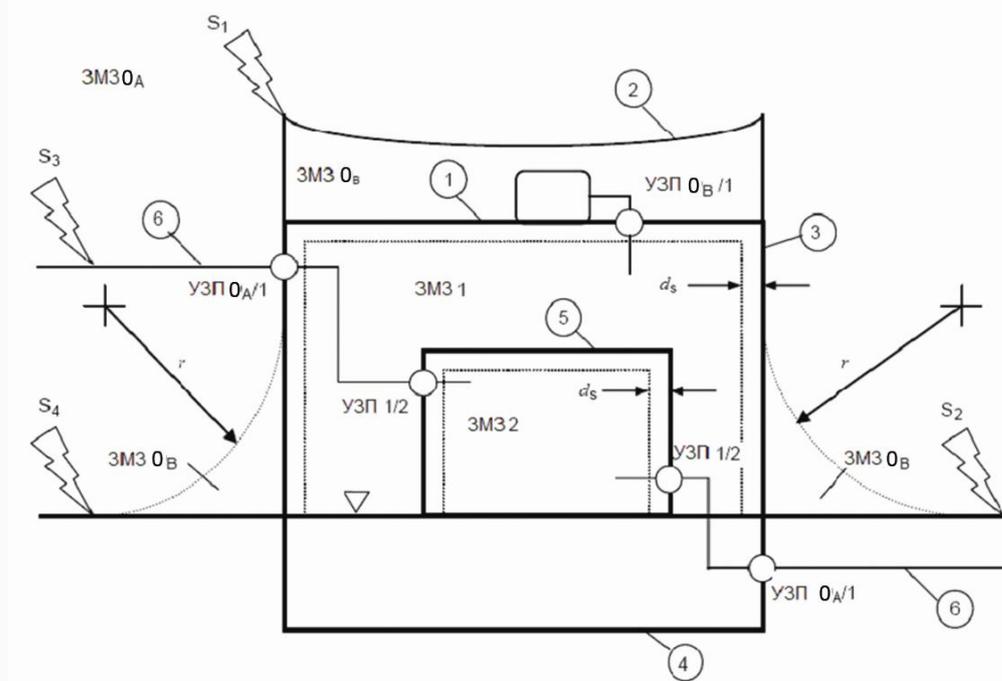
Прямой удар молнии, полный ток молнии:

ЗМЗ 0А – прямой разряд молнии, полный ток молнии;

ЗМЗ 0В – не прямой разряд молнии, частичная молния или индуцированный ток;

ЗМЗ 1 – не прямой разряд молнии, ограниченная молния или индуцированный ток

**Рисунок 2 – Зона молниезащиты, определяемая системой молниезащиты IEC 62305-3**



1 – здание (экран зоны молниеотвода 1); 2 – система молниезащиты; 3 – токоотвод; 4 – заземлитель; 5 – помещение (экран зоны молниеотвода 2); 6 – системы энергоснабжения здания;

S1 – удар молнии в здание; S2 – удар молнии вблизи здания; S3 – удар молнии в систему энергоснабжения здания; S4 – удар молнии вблизи системы энергоснабжения здания;  $r$  – радиус катящейся сферы;  $d_s$  – зазор, защищающий от опасного искрения;

$\nabla$  – уровень земли;  $\circ$  – уравнивание грозовых потенциалов с помощью УЗП.

Прямой удар молнии, полный ток молнии:

ЗМЗ 0<sub>А</sub> – прямой удар молнии, полный ток молнии, полное магнитное поле;

ЗМЗ 0<sub>В</sub> – не прямой удар молнии, частичная молния или индуцированный ток, полное магнитное поле;

ЗМЗ 1 – не прямой удар молнии, ограниченная молния или индуцированный ток, затухающее магнитное поле;

ЗМЗ 2 – не прямой удар молнии, индуцированные токи, затухающие в дальнейшем магнитное поле.

Для защищенных пространств внутри зон молниезащиты 1 и 2 должно соблюдаться безопасное расстояние  $d_s$ .

**Рисунок 3 – Зона молниезащиты, определяемая защитными мерами в соответствии с параметрами электромагнитных импульсов грозовых разрядов (IEC 62305-4)**

**Таблица 6 – Минимальные значения параметров молнии и связанный с ними радиус катящейся сферы в зависимости от уровней молниезащиты**

Первый короткий импульс тока			Уровень молниезащиты			
Параметры тока	Обозначение	Единица измерения	I	II	III	IV
Минимальный пиковый ток	$I$	кА	3	5	10	16
Радиус катящейся сферы	$r$	м	20	30	45	60

На основании статистических распределений, показанных на рисунке А.5, можно определить взвешенную вероятность того, что параметры тока молнии являются меньше максимальных значений и, соответственно, превышают минимальные значения, определенные для каждого уровня защиты (см. таблицу 7).

**Таблица 7 – Вероятности для ограничений параметров тока молнии**

Вероятность того, что параметры тока молнии	Уровень молниезащиты			
	I	II	III	IV
меньше максимальных значений, указанных в таблице 5	0,99	0,98	0,97	0,97
больше минимальных значений, указанных в таблице 6	0,99	0,97	0,91	0,84

Защитные меры, установленные в IEC 62305-3, IEC 62305-4 и IEC 62305-5, являются эффективными в отношении воздействия молнии, параметры тока которой находятся в пределах, определенных уровнями молниезащиты, которая предусмотрена проектом. Поэтому эффективность мер защиты принимается равной вероятности, с которой параметры тока молнии находятся в пределах этого диапазона.

## 8.2 Зоны молниезащиты

ЗМЗ определяются мерами молниезащиты, например ЗМЗ, экранированными проводниками, магнитными экранами и ограничителями перенапряжения. Последующие ЗМЗ в отличие от предшествующих при применении защитной меры характеризуются значительным сокращением электромагнитных импульсов от грозовых разрядов.

В зависимости от опасности молнии определяют следующие ЗМЗ (см. рисунки 2, 3):

– ЗМЗ 0<sub>А</sub> – зона, не защищенная от ПУМ и электромагнитного поля грозовых разрядов. Внутренние системы могут подвергаться полному или частичному грозовому перенапряжению;

– ЗМЗ 0<sub>В</sub> – зона, защищенная от ПУМ, но не защищенная от электромагнитного поля грозовых разрядов. Внутренние системы могут подвергаться частичным грозовым перенапряжениям;

– ЗМЗ 1 – зона, в которой сверхток ограничивается за счет перераспределения тока и ограничителей перенапряжения на границе зоны. Безопасные изолирующие промежутки могут ослаблять электромагнитное поле грозовых разрядов;

– ЗМЗ 2, ...,  $n$  – зона, в которой сверхток может в дальнейшем ограничиваться перераспределением тока и дополнительными ограничителями перенапряжения на границе зоны. Дополнительные изолирующие промежутки могут ослаблять электромагнитное поле грозовых разрядов.

Примечание 1 – Чем выше номер отдельной зоны, тем меньше параметры электромагнитной среды.

Согласно общему правилу защиты объект должен быть в такой ЗМЗ, электромагнитные характеристики которой совместимы со способностью объекта противостоять напряжению, вызванному повреждением, которое необходимо уменьшить (физическое разрушение, повреждение электрических и электронных систем вследствие перенапряжений).

Примечание 2 – Информацию об уровне выдерживания большинства электрических и электронных систем и аппаратуры должен предоставлять производитель.

### 8.3 Защита зданий

#### 8.3.1 Защита с целью уменьшения физического разрушения и опасности для жизни

Защищаемое здание должно быть в пределах ЗМЗ  $0_B$  или более высокой ЗМЗ. Это достигается с помощью СМЗ.

СМЗ состоит как из внутренних, так и из внешних СМЗ (см. рисунок 2).

Функциями внутренней СМЗ являются:

- перехват разряда молнии (при ударе молнии в здание с использованием СМЗ);
- проведение тока молнии в землю (с использованием системы токоотвода);
- рассеивание тока молнии в земле (с использованием заземлителя).

Функцией внутренней СМЗ является предотвращение опасного искрения внутри здания при использовании уравнивания грозовых потенциалов либо разделительного расстояния  $s$  (и, следовательно, электрической изоляции) между компонентами СМЗ и другими электропроводными элементами внутри здания.

В комплексе строительных правил определены четыре класса СМЗ (I, II, III, IV), основанные на соответствующем уровне молниезащиты. Каждый комплекс включает строительные правила, как зависящие от уровня (например, радиус катящейся сферы, ширина ячейки сетки и т. д.), так и не зависящие от уровня (например, поперечное сечение, материалы и т. д.). Если поверхностное удельное сопротивление грунта снаружи и поля внутри здания недостаточно высокое, то угроза для жизни из-за контактного и шагового напряжения снижается:

– за пределами здания посредством изоляции выступающих токопроводящих частей, уравнивания потенциалов грунта с помощью сложнозамкнутой системы заземления, предупредительной надписи и физических ограничений;

– внутри здания посредством уравнивания грозовых потенциалов систем энергоснабжения на входной точке здания.

СМЗ должны соответствовать требованиям IEC 62305-3.

#### 8.3.2 Защита с целью уменьшения повреждения внутренних систем

Обеспечение защиты от электромагнитных импульсов грозовых разрядов с целью снижения риска разрушения внутренних систем должно ограничивать следующее:

– перенапряжения вследствие удара молнии в здание в результате резистивной и индуктивной связи;

– перенапряжения вследствие ударов молнии вблизи здания в результате индуктивной связи;

– перенапряжения, передаваемые линиями электропередачи, подсоединенными к зданию, вследствие удара молнии в линию электропередачи или вблизи нее;

– магнитное поле, воздействующее на внутренние системы.

Примечание – Повреждение аппаратуры вследствие воздействия электромагнитных полей, воздействующих на оборудование, представляется незначительным при условии, что аппаратура работает при радиочастотных помехах, эмиссии и помехоустойчива при проведении испытаний на ЭМС (см. IEC 62305-2 и IEC 62305-4).

Защищаемая система должна размещаться внутри ЗМЗ 1 или более высокой зоны. Это достигается за счет применения магнитных экранов, ослабляющих индуцирующее магнитное поле, и/или соответствующей прокладки проводки, ослабляющей петлю индуктивности. На границах раздела отдельных ЗМЗ необходимо обеспечить защитное последовательное соединение всех металлических частей и систем, пересекающих границы раздела. Такое соединение можно выполнить с помощью соединительных проводников заземления или при необходимости ограничителей перенапряжения.

Защитные меры для ЗМЗ должны соответствовать требованиям IEC 62305-4.

Эффективную защиту от перенапряжений, вызывающих повреждения внутренних систем, также обеспечивает «скоординированная защита УЗП», ограничивающая перенапряжения ниже максимально допустимого импульсного напряжения защищаемой системы. УЗП выбирают и устанавливают в соответствии с требованиями IEC 62305-4.

### 8.4 Защита систем энергоснабжения

Система, которой требуется защита, должна размещаться:

- внутри ЗМЗ 0<sub>B</sub> или более высокой зоны, чтобы уменьшить физическое повреждение. Это достигается за счет применения подземной прокладки вместо воздушной или точным расположением экранирующей проводки в соответствии с характеристиками линии, а в отношении труб – за счет увеличения толщины трубы до необходимого значения и обеспечения металлической целостности труб;
- внутри ЗМЗ 1 или более высокой зоны, чтобы защитит от перенапряжений, вызывающих повреждение системы энергоснабжения. Это достигается за счет снижения уровня перенапряжений, вызываемых молнией, с помощью соответствующей магнитной защиты кабелей, которая обеспечивает отвод сверхтока и ограничивает перенапряжение с использованием ограничителей перенапряжения.

## Приложение А (справочное)

### Параметры тока молнии

#### А.1 Удары молнии в землю

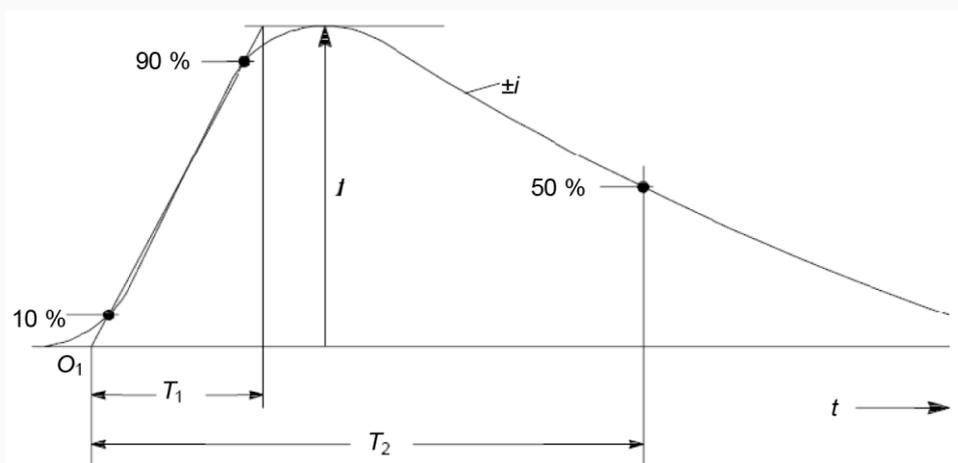
Существуют два основных типа молнии:

- нисходящая молния, инициированная нисходящим лидером грозового разряда из облака на землю;
- восходящая молния, инициированная восходящим лидером грозового разряда от заземленных зданий, сооружений до облака.

В большинстве случаев нисходящие молнии возникают на равнинной местности и поражают более низкие сооружения, тогда как на выступающие и/или более высокие сооружения преимущественно воздействуют восходящие молнии. При обеспечении эффективной высоты вероятность ПУМ в сооружение повышается (см. IEC 62305-2, приложение А) и физические условия изменяются.

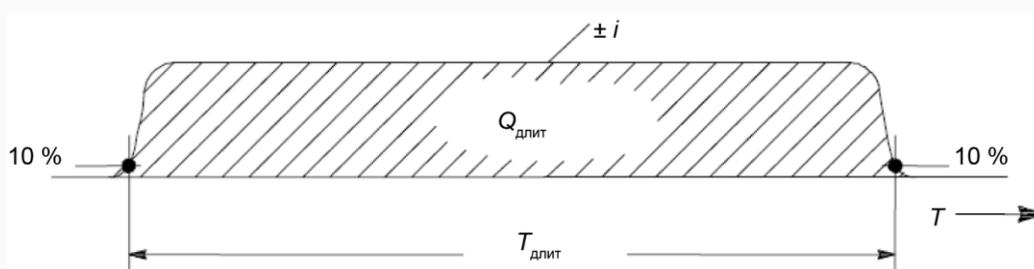
Ток молнии состоит из одного (или более) различного удара:

- короткие удары продолжительностью менее 2 мс (рисунок А.1);
- длительные удары продолжительностью более 2 мс (рисунок А.2).



$O_1$  – виртуальный источник;  
 $i$  – пиковый ток;  
 $T_1$  – время нарастания импульса;  
 $T_2$  – время до половины значения

Рисунок А.1 – Обозначения параметров короткого удара (обычно  $T_2 < 2$  мс)



$T_{\text{длит}}$  – длительность;  
 $Q_{\text{длит}}$  – заряд длительного удара

Рисунок А.2 – Обозначения параметров длительного удара (обычно  $2 \text{ мс} < T_{\text{длит}} < 1 \text{ с}$ )

Более подробная дифференциация ударов исходит из их полярности (положительной или отрицательной) и их положения во время удара молнии (первой, последующей, наложенной). На рисунке А.3 показаны возможные составляющие нисходящих молний и на рисунке А.4 – восходящих молний.

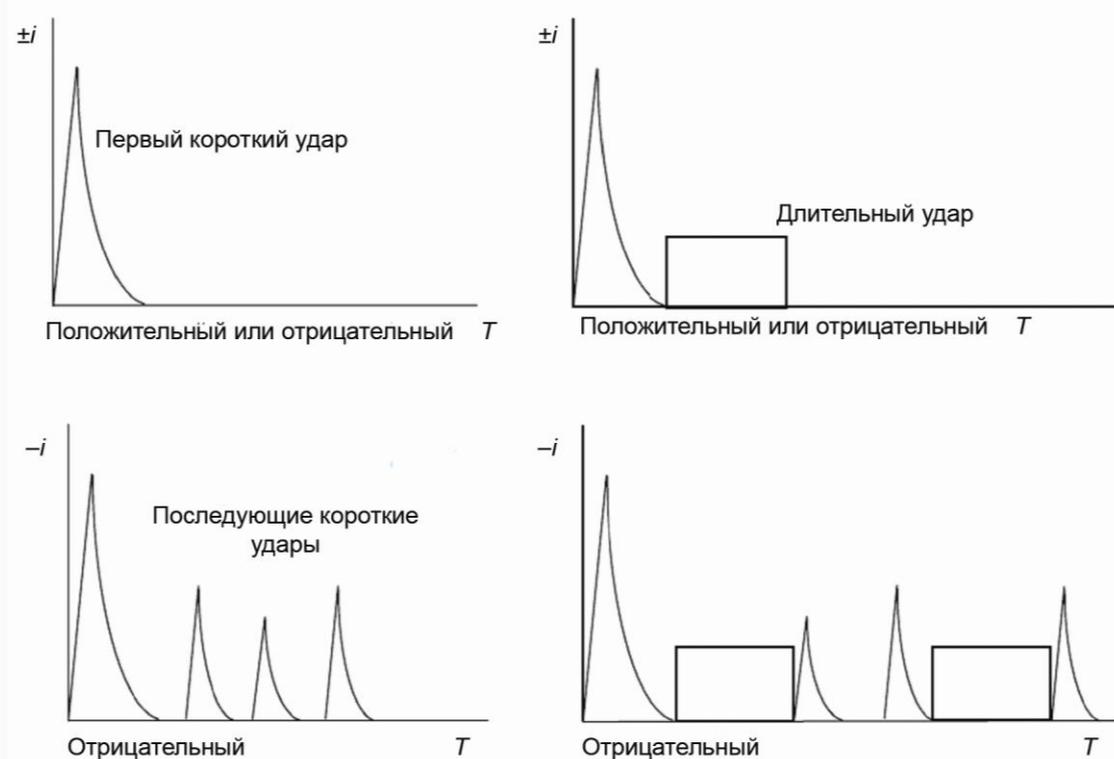
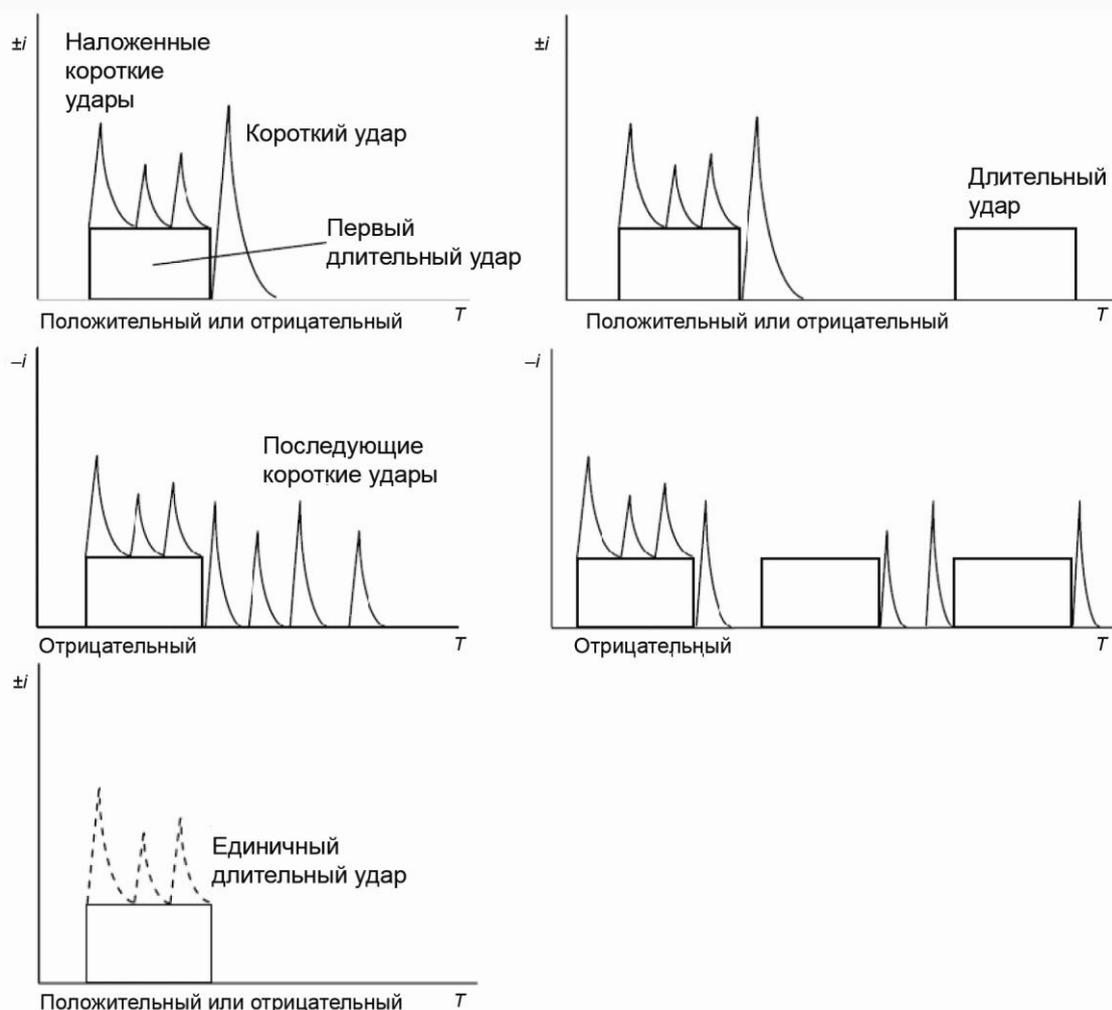


Рисунок А.3 – Возможные составляющие нисходящих молний (типичных на равнинной местности и для невысоких зданий)



**Рисунок А.4 – Возможные составляющие восходящих молний (обычно на здания, сооружения, находящиеся на равнинной местности и/или имеющие в своем составе высоко расположенные элементы строительной конструкции)**

Дополнительным компонентом в восходящих молниях является первый длительный импульс, имеющий примерно до десяти наложенных коротких импульсов или без них. Но все параметры короткого удара восходящих молний меньше параметров короткого удара нисходящих молний. Более высокий электрический заряд длительного импульса восходящих молний еще не подтвержден. Поэтому параметры тока восходящих молний рассматривают как значения, входящие в пределы максимальных значений, установленных для нисходящих молний. Более точная оценка параметров тока молнии и их зависимость от высоты с учетом нисходящих и восходящих молний находится в стадии рассмотрения.

## A.2 Параметры тока молнии

Параметры тока молнии в настоящем предстандарте основываются на результатах Международной конференции по большим энергетическим системам (CIGRE), данные которой приведены в таблице А.1. Статистическое распределение вероятностей может быть принято как нормальное логарифмическое распределение. Соответствующие среднее значение  $\mu$  и дисперсия  $\sigma_{\log}$  приведены в таблице А.2, а функция распределения показана на рисунке А.5. На основании этого можно определить вероятность появления любого значения каждого параметра.

Соотношение полярности разрядов молнии зависит от географического положения местности. В отсутствие местных данных принимают соотношение, равное 10 % для разрядов с положительными токами и 90 % для разрядов с отрицательным токами.

Таблица А.1 – Табличные значения параметров тока молнии, взятые из CIGRE (Electra № 41 или № 69) [3],[4]

Параметр	Фиксированные значения для уровня молниезащиты I	Значения			Тип импульса	Линия на рисунке А.5
		95 %	50 %	5 %		
$I$ , кА	50	4 (98 %)	20 (80 %)	90	Первый отрицательный короткий	1А+1В
		4,9	11,8	28,6	Последующий отрицательный короткий	2
		200	4,6	35	250	Первый положительный короткий (один)
$Q_{\text{имп}}$ , Кл	300	1,3	7,5	40	Отрицательный дуговой разряд	4
		20	80	350	Положительный дуговой разряд	5
$Q_{\text{коротк}}$ , Кл	100	1,1	4,5	20	Первый отрицательный короткий	6
		0,22	0,95	4	Последующий отрицательный короткий	7
		2	16	150	Первый положительный короткий (один)	8
$W/R$ , кДж/Ом	10 000	6	55	550	Первый отрицательный короткий	9
		0,55	6	52	Последующий отрицательный короткий	10
		25	650	15 000	Первый положительный короткий	11
$di/dt_{\text{max}}$ , кА/мкс	20	9,1	24,3	65	Последующий отрицательный короткий	12
		9,9	39,9	161,5	Последующий отрицательный короткий	13
		0,2	2,4	32	Первый положительный короткий	14
$di/dt_{30/90\%}$ , кА/мкс	200	4,1	20,1	98,5	Последующий отрицательный короткий	15
$Q_{\text{коротк}}$ , Кл	200				Длительный	
$t_{\text{длит}}$ , с	0,5				Длительный	
Длительность фронта, мкс		1,8	5,5	18	Последующий отрицательный короткий	
		0,22	1,1	4,5	Последующий отрицательный короткий	
		3,5	22	200	Первый положительный короткий (один)	
Длительность удара, мкс		30	75	200	Первый отрицательный короткий	
		6,5	32	140	Последующий отрицательный короткий	
		25	230	2 000	Первый положительный короткий (один)	
Интервал времени, мс		7	33	150	Множественные отрицательные удары	

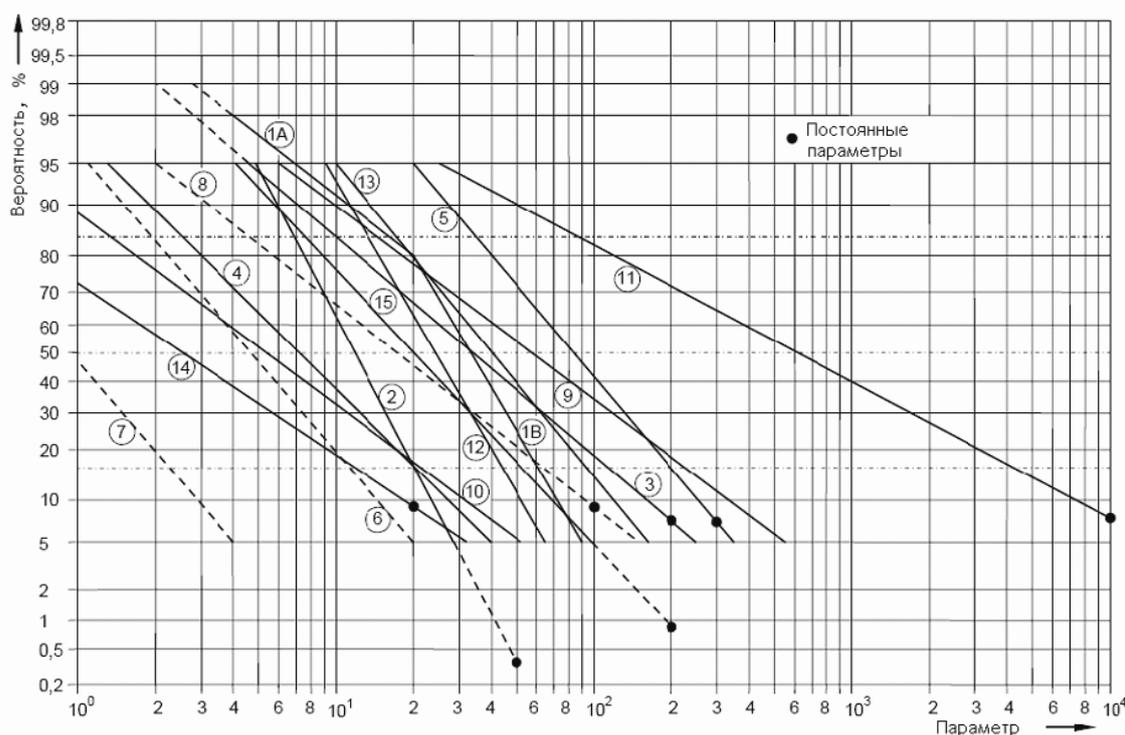
Окончание таблицы А.1

Параметр	Фиксированные значения для уровня молниезащиты I	Значения			Тип импульса	Линия на рисунке А.5
		95 %	50 %	5 %		
Общая длительность удара, мс		0,15	13	1 100	Отрицательный дуговой разряд (все)	
		31	180	900	Отрицательный дуговой разряд (без отдельных)	
		14	85	500	Положительный дуговой разряд	

Примечание – Значения  $I = 4$  кА и  $I = 20$  кА соответствуют вероятности 98 % и 80 % соответственно.

Таблица А.2 – Логарифмическое нормальное распределение параметров тока молнии – среднее значение  $\mu$  и разброс значений  $\sigma_{\log}$ , рассчитанные из значений 95 % и 5 %, взятые из CIGRE (Electra № 41 или № 69) [3], [4]

Параметр	Среднее значение $\mu$	Дисперсия $\sigma_{\log}$	Тип удара	Линия на рисунке А.5
$I$ , кА	(61,1)	0,576	Первый отрицательный короткий (80 %)	1А
	33,3	0,263	Первый отрицательный короткий (80 %)	1В
	11,8	0,233	Последующий отрицательный короткий	2
	33,9	0,527	Первый положительный короткий (один)	3
$Q_{\text{имп}}$ , Кл	7,21	0,452	Отрицательный дуговой разряд	4
	83,7	0,378	Положительный дуговой разряд	5
$Q_{\text{коротк}}$ , Кл	4,69	0,383	Первый отрицательный короткий	6
	0,938	0,383	Последующий отрицательный короткий	7
	17,3	0,570	Первый положительный короткий (один)	8
$W/R$ , кДж/Ом	57,4	0,596	Первый отрицательный короткий	9
	5,35	0,600	Последующий отрицательный короткий	10
	612	0,844	Первый положительный короткий	11
$di/dt_{\text{мах}}$ , кА/мкс	24,3	0,260	Первый отрицательный короткий	12
	40,0	0,369	Последующий отрицательный короткий	13
	2,53	0,670	Первый положительный короткий	14
$di/dt_{30/90\%}$ , кА/мкс	20,1	0,420	Последующий отрицательный короткий	15
$Q_{\text{коротк}}$ , Кл	200		Длительный	
$t_{\text{длит}}$ , с	0,5		Длительный	
Длительность фронта, мкс	5,69	0,304	Первый отрицательный короткий	
	0,995	0,398	Последующий отрицательный короткий	
	26,5	0,534	Первый положительный короткий (один)	
Длительность удара, мкс	77,5	0,250	Первый отрицательный короткий	
	30,2	0,405	Последующий отрицательный короткий	
	22,4	0,578	Первый положительный короткий (один)	
Интервал времени, мс	32,4	0,405	Множественные отрицательные удары	
Общая длительность удара, мс	12,8	1,175	Отрицательный удар (все)	
	167	0,445	Отрицательный удар (без отдельных)	
	83,7	0,472	Положительный удар	



Примечание – Нумерацию кривых см. в таблицах А.1, А.2.

**Рисунок А.5 – Кумулятивное частотное распределение параметров тока молнии (прямые, проходящие через точки значений 95 % и 5 %)**

Все значения, установленные для уровня молниезащиты и приведенные в настоящем предстандарте, относятся как к восходящим, так и к нисходящим молниям.

Примечание – Значение параметров молнии обычно берут из результатов измерений, проводимых на высоких объектах. Статистическое распределение определенных пиковых значений тока молнии, которое не рассматривает влияния высоких объектов, можно взять из местных систем грозовых разрядов.

### **А.3 Установление максимальных параметров тока молнии для уровня I надежности защиты от прямых ударов молнии**

Механические воздействия молнии связаны с пиковым значением тока  $I$  и удельной переданной энергией  $W/R$ . Тепловые воздействия связаны с удельной переданной энергией  $W/R$  при наличии резистивной связи и разрядом  $Q$  при образовании на установке электрических дуг. Перенапряжение и опасное искрение, вызываемые индуктивным искрением, относятся к средней скорости нарастания  $di/dt$  фронта импульса тока молнии. Каждый из параметров ( $I$ ,  $Q$ ,  $W/R$ ,  $di/dt$ ) управляет отдельным механизмом отказа. Это следует принимать во внимание при определении процедур испытания.

#### **А.3.1 Первый короткий импульс тока и длительный импульс тока**

Значения  $I$ ,  $Q$  и  $W/R$ , относящиеся к механическим и тепловым воздействиям, определяют из положительных разрядов тока молнии (так как 10 % значений положительных разрядов тока молнии намного больше 10 % значений отрицательных разрядов тока молнии). Значения с вероятностью ниже 10 % можно получить из графика, представленного на рисунке А.5 (линии 3, 5, 8, 11 и 14):

- $I = 200$  кА;
- $Q_{\text{дуг. разряд}} = 300$  Кл;
- $Q_{\text{коротк}} = 100$  Кл;
- $W/R = 10$  МДж/Ом;
- $di/dt = 20$  кА/мкс.

Что касается первого удара молнии (согласно рисунку А.1), эти значения дают первое приближение для времени нарастания импульса:

$$T_1 = I / (di/dt) = 10 \text{ мкс} \quad (T_1 \text{ не представляет большого интереса}).$$

Что касается экспоненциально затухающего удара, для приближенных значений разряда и энергии  $T_1 \ll T_2$  используют следующую формулу:

$$Q_{\text{коротк}} = (1/0,7) \cdot I \cdot T_2;$$

$$W/R = (1/2) \cdot (1/0,7) \cdot I^2 \cdot T_2.$$

Эти формулы вместе с вышеуказанными значениями приводят к первому приближению для времени полуспада:

$$T_2 = 350 \text{ мкс}.$$

Заряд длительного удара молнии можно приближенно рассчитать по формуле

$$Q_{\text{длит}} = Q_{\text{дуг.разряд}} - Q_{\text{коротк}} = 200 \text{ Кл},$$

а его продолжительность (согласно рисунку А.2) можно определить из продолжительности удара как:

$$T_{\text{длит}} = 0,5 \text{ с}.$$

### А.3.2 Последующий короткий импульс тока

Максимальное значение средней крутизны фронта  $di/dt$ , связанного с опасным искрением, вызываемым индукционной связью, определяют из последующих коротких ударов отрицательных дуговых разрядов (так как 1 % значений отрицательных разрядов намного выше 1 % значений отрицательных разрядов, полученных из первого отрицательного удара, или 10 % значений положительных разрядов, полученных из первого положительного удара). Значения с вероятностью ниже 1 % можно получить из графика, представленного на рисунке А.5 (линии 2 и 15).

$$I = 50 \text{ кА};$$

$$di/dt = 200 \text{ кА/мкс}.$$

Что касается последующего короткого удара (согласно рисунку А.1), эти значения дают первое приближение для времени нарастания его импульса:

$$T_1 = I / (di/dt) = 0,25 \text{ мкс}.$$

Его время до достижения среднего значения можно определить на основании длительности удара последующих отрицательных коротких разрядов:

$$T_2 = 100 \text{ мкс} \quad (T_2 \text{ не представляет большого интереса}).$$

### А.4 Установление минимальных параметров тока молнии

Эффективность улавливания СМЗ зависит от минимальных параметров тока молнии и от связанного с ними радиуса катящейся сферы. Геометрическую границу между зонами, которые защищены от ПУМ, можно определять методом катящейся сферы.

Согласно электрической геометрической модели радиус катящейся сферы  $r$  (конечное расстояние перекрывающего разряда) соотносится с пиковым значением тока первого короткого удара. В отчете рабочей группы IEEE [5] приводится следующее отношение:

$$r = 10 \cdot I^{0,65}, \quad (\text{А.1})$$

где  $r$  – радиус катящейся сферы, м;

$I$  – пиковый ток, кА.

Для данного радиуса катящейся сферы  $r$  можно допустить, что все удары молнии с пиковыми значениями, превышающими соответствующее минимальное пиковое значение  $I$ , будут улавливаться естественными или специально предназначенными СМЗ. Следовательно, вероятность пиковых значений отрицательных и положительных ударов (согласно рисунку А.5) (линии 1А и 3) принимают за вероятность перехвата молнии. Принимая во внимание соотношение полярности 10 % положительных и 90 % отрицательных ударов, можно вычислить вероятность общего перехвата молнии (см. таблицу 7).

## Приложение В (справочное)

### Функции времени тока молнии для целей анализа

Форма волны тока первого короткого удара 10/350 мкс, последующих коротких ударов 0,25/100 мкс можно определить как:

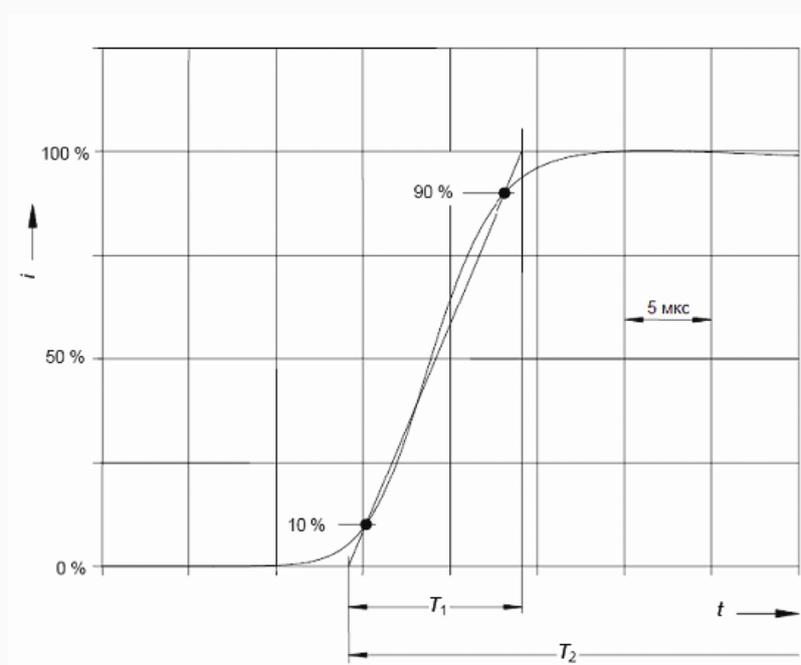
$$i = \frac{I}{k} \cdot \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1 + (\tau_1)^{10}} \cdot \exp(-t/\tau_2), \quad (\text{В.1})$$

- где  $I$  – пиковый ток;  
 $k$  – поправочный коэффициент для пикового тока;  
 $t$  – время;  
 $\tau_1$  – постоянная времени нарастания импульса;  
 $\tau_2$  – постоянная времени среза импульса.

Для формы импульса тока молнии первого короткого импульса и последующих коротких импульсов для различных уровней молниезащиты используют параметры, приведенные в таблице В.1. На рисунках В.1 – В.4 показаны аналитические кривые.

**Таблица В.1 – Параметры для уравнения В.1**

Параметры	Первый короткий импульс			Последующий короткий импульс		
	Уровень надежности защиты от ПУМ			Уровень надежности защиты от ПУМ		
	I	II	III – IV	I	II	III – IV
$I$ , кА	200	150	100	50	37,5	25
$K$	0,93	0,93	0,93	0,993	0,993	0,993
$r_1$ , мкс	19	19	19	0,454	0,454	0,454
$r_2$ , мкс	485	485	485	143	143	143



**Рисунок В.1 – Форма волны нарастания тока первого короткого удара**

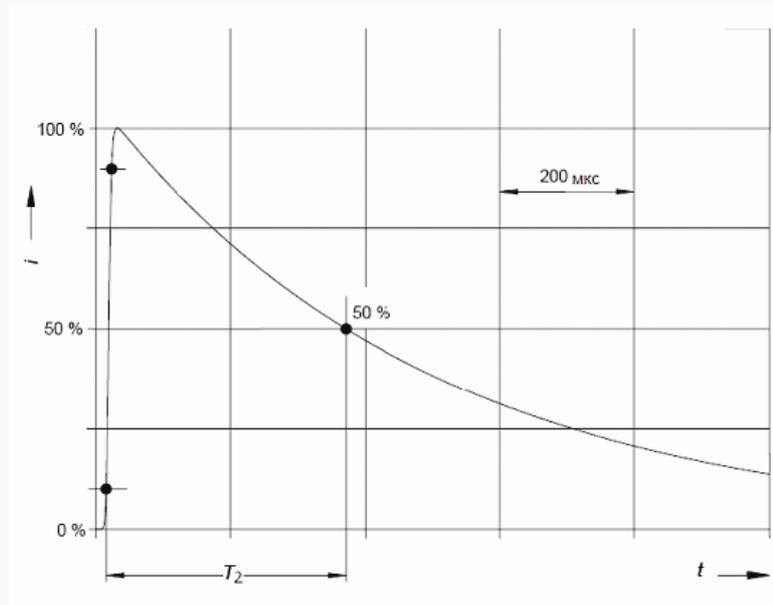


Рисунок В.2 – Форма волны среза тока первого короткого удара

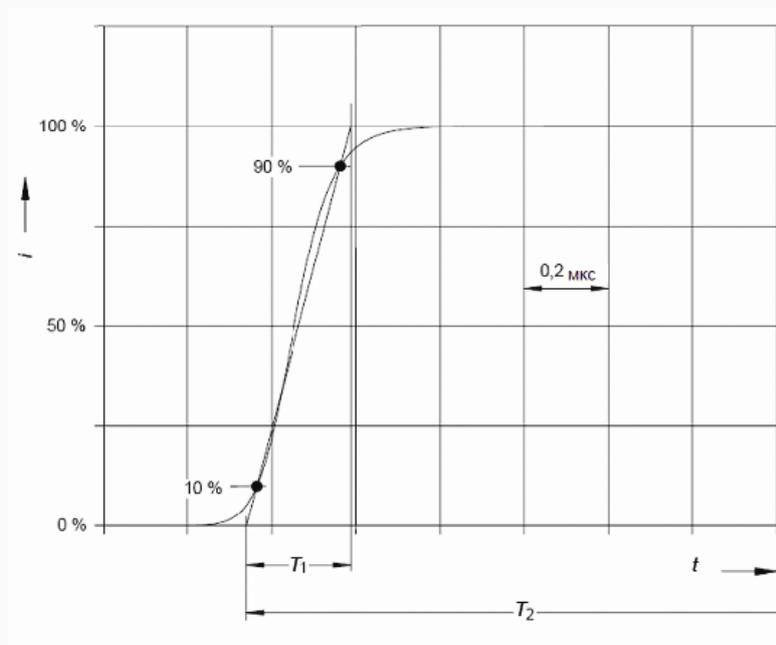


Рисунок В.3 – Форма волны нарастания тока последующих коротких ударов

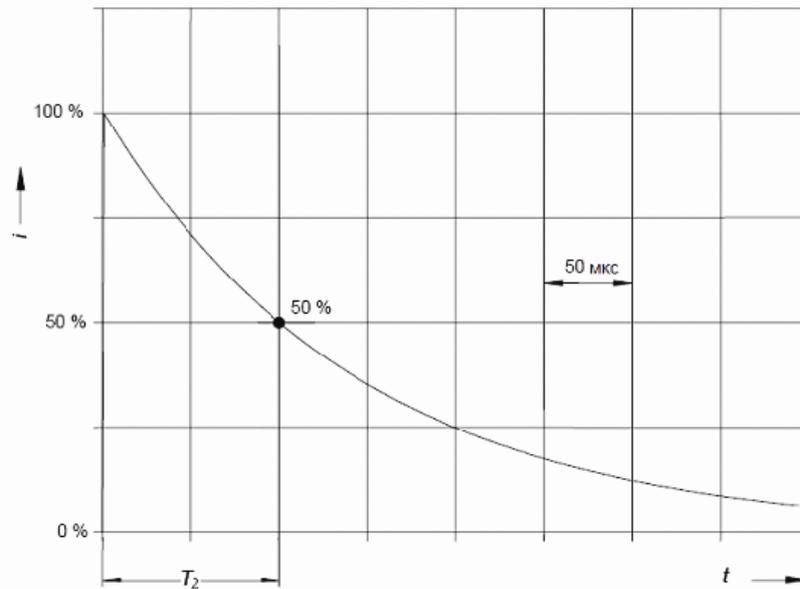
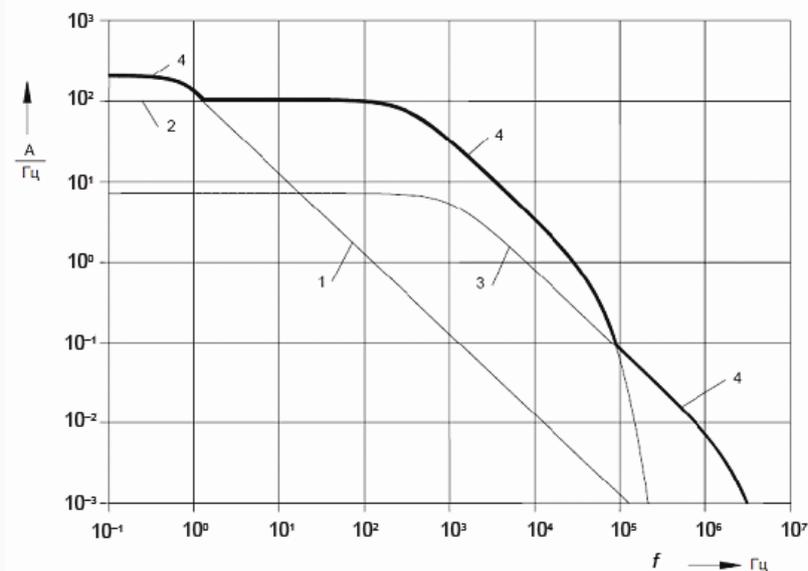


Рисунок В.4 – Форма волны среза тока последующих коротких ударов

Длительный импульс может быть прямоугольным со средним током  $I$  и длительностью  $T_{\text{длит}}$ , соответствующими данным таблицы 5.

Плотность амплитуды тока молнии можно вывести из аналитических кривых.



1	Длительный импульс	400 А	0,5 с
2	Первый короткий импульс	200 кА	10/350 мкс
3	Последующий короткий импульс	50 кА	0,25/100 мкс
4	Огибающая кривая		

Рисунок В.5 – Плотность амплитуды тока молнии в соответствии с уровнем I надежности защиты от прямых ударов молнии (ПУМ I)

## Приложение С (справочное)

### Моделирование тока молнии для целей испытания

#### С.1 Общие положения

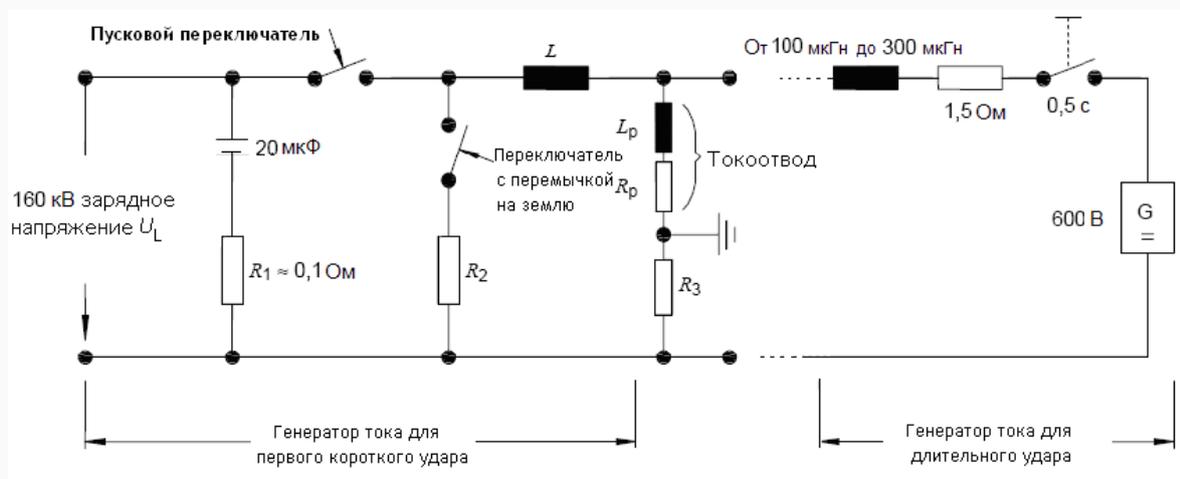
При ударе молнии в объект ток молнии распределяется внутри объекта. Это необходимо учитывать при проведении испытания отдельных компонентов мер защиты и для каждого компонента необходимо выбирать соответствующие контролируемые параметры, после чего требуется провести анализ системы.

#### С.2 Моделирование удельной энергии первого короткого удара и разряда длительного удара

В таблицах С.1, С.2 указаны контролируемые параметры, а на рисунке С.1 показан пример генератора тестового сигнала. Генератор можно использовать для моделирования удельной энергии первого короткого разряда вместе с разрядом длительного удара. Испытания можно также проводить для оценки механической целостности и отсутствия неблагоприятных эффектов нагревания и плавления.

Контролируемые параметры, связанные с моделированием первого короткого разряда (пиковый ток  $I$ , удельная энергия  $W/R$  и разряда  $Q_s$ ), приведены в таблице С.1. Эти параметры можно взять из того же самого импульса, используя примерный экспоненциальный затухающий ток длительности  $T_2$  в диапазоне 350 мкс. Контролируемые параметры, касающиеся моделирования длительного удара (разряд  $Q_1$  и длительность  $T$ ), указаны в таблице С.2.

В зависимости от испытательного объекта и механизмов предполагаемого разрушения испытания первого короткого разряда или длительного разряда можно проводить по отдельности или как комбинированное испытание, если длительный удар следует сразу же за первым коротким ударом. Испытания дугового плавления необходимо проводить с учетом обеих полярностей.



Примечание – Значения применяются к первому уровню надежности защиты от ПУМ.

Рисунок С.1 – Пример генератора тестового сигнала для моделирования удельной переданной энергии первого короткого удара и разряда длительного удара

Таблица С.1 – Контролируемые параметры первого короткого удара

Контролируемые параметры	Уровень надежности защиты от ПУМ			Допустимое значение, %
	I	II	III – IV	
Пиковый ток $I$ , кА	200	150	100	$\pm 10$
Разряд $Q_s$ , Кл	100	75	50	$\pm 20$
Удельная энергия $W/R$ , МДж/Ом	10	5,6	2,5	$\pm 35$

Таблица С.2 – Контролируемые параметры длительного удара

Контролируемые параметры	Уровень надежности защиты от ПУМ			Допустимое значение, %
	I	II	III – IV	
Разряд $Q_{\text{длит}}$ , Кл	200	150	100	$\pm 20$
Длительность $T$ , с	0,5	0,5	0,5	$\pm 10$

### С.3 Моделирование скорости нарастания фронта импульса тока коротких ударов

Скорость нарастания тока определяет магнитно-индуцированные напряжения в контурах, установленных вблизи проводников, проводящих токи молнии. Скорость нарастания тока короткого импульса определяют как возрастание тока  $\Delta i$  во время нарастания  $\Delta t$  (рисунок С.2). Контролируемые параметры, относящиеся к моделированию данного времени нарастания тока, указаны в таблице С.3. Пример генераторов тестового сигнала показан на рисунках С.3, С.4 (которые можно использовать для моделирования скорости нарастания фронтального импульса тока молнии, связанного с ПУМ). Первый короткий и последующий короткий импульсы тока можно смоделировать.

Примечание – Данное моделирование охватывает скорость нарастания фронтального импульса тока коротких ударов. Срез тока не влияет на данный вид моделирования.

Моделирование, описанное в С.3, можно использовать отдельно или в комбинации с моделированием, о котором говорится в С.2.

Более подробную информацию о контролируемых параметрах, моделирующих воздействия молнии на компоненты СМЗ, см. в приложении D.

Таблица С.3 – Контролируемые параметры коротких ударов

Контролируемые параметры	Уровень надежности защиты от ПУМ			Допустимое значение, %
	I	II	III – IV	
Первый короткий импульс				
$\Delta i$ , кА	200	150	100	$\pm 10$
$\Delta t$ , мкс	10	10	10	$\pm 20$
Последующие короткие разряды				
$\Delta i$ , кА	50	37,5	25	$\pm 10$
$\Delta t$ , мкс	0,25	0,25	0,25	$\pm 20$

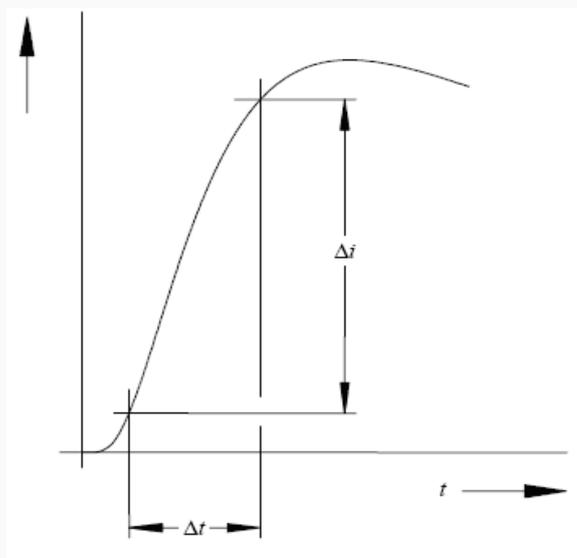
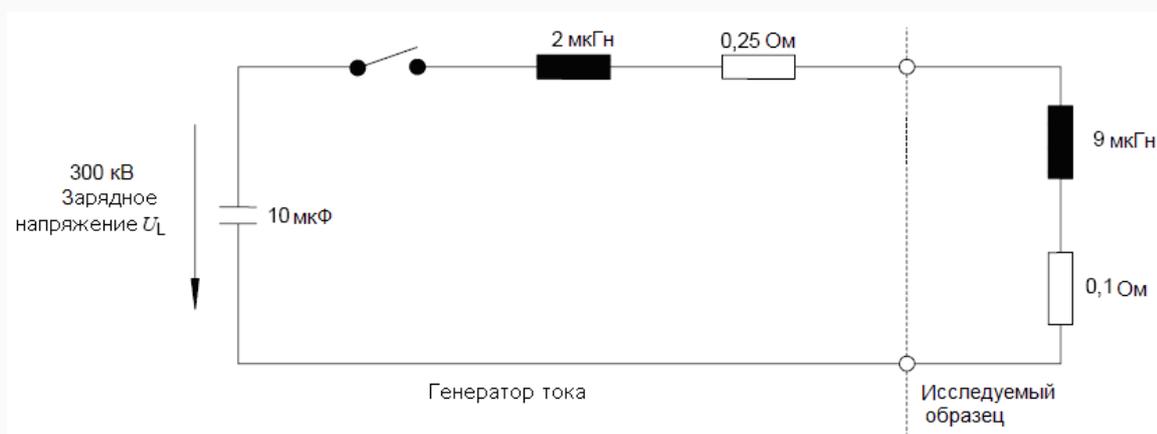
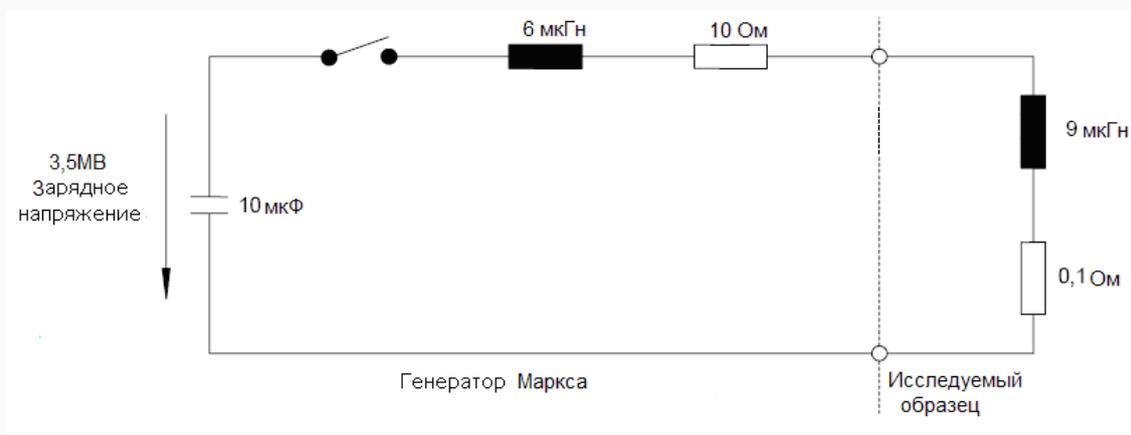


Рисунок С.2 – Определение скорости нарастания тока в соответствии с таблицей С.3



Примечание – Данные значения применяются к первому уровню надежности защиты от ПУМ.

Рисунок С.3 – Генератор тестового сигнала для моделирования нарастания фронта импульса первого короткого разряда для крупных объектов



Примечание – Данные значения применяются к первому уровню надежности защиты от ПУМ.

Рисунок С.4 – Генератор тестового сигнала для моделирования нарастания фронта импульса последующих разрядов для крупных объектов

## Приложение D (справочное)

### Контролируемые параметры, моделирующие воздействия молнии на компоненты системы молниезащиты

#### D.1 Общие положения

В настоящем приложении представлены основные параметры, используемые в лаборатории для моделирования воздействий молнии. Данное приложение распространяется на все компоненты СМЗ, подвергаемой воздействию всего тока молнии или основной ее части. Приложение D следует использовать вместе со стандартами, устанавливающими требования и испытания для каждого конкретного компонента.

Примечание – Параметры, относящиеся к аспектам системы (например, параметры координации ограничителей перенапряжения), в настоящем приложении не рассматриваются.

#### D.2 Параметры тока, относящиеся к точке поражения

Параметры тока молнии, составляющие физическую целостность СМЗ, включают в основном пиковый ток  $I$ , разряд  $Q$ , удельную энергию  $W/R$ , длительность  $T$  и среднюю скорость нарастания тока  $di/dt$ . Каждый параметр имеет тенденцию преобладания различного механизма повреждения (это будет подробно проанализировано ниже). Параметры тока, рассматриваемые для испытаний, представляют собой комбинации этих значений, отобранных для представления в лаборатории фактического механизма повреждения части испытываемой СМЗ. Критерии выбора отклоняющихся значений установлены в D.5.

В таблице D.1 даны максимальные значения  $I$ ,  $Q$ ,  $W/R$ ,  $T$  и  $di/dt$ , которые следует рассматривать для проведения испытаний как функцию требуемого уровня защиты.

**Таблица D.1 – Совокупность параметров неблагоприятного воздействия молнии, необходимая для рассмотрения при расчете экспериментальных значений для различных компонентов системы молниезащиты и для различных уровней надежности защиты от прямых ударов молнии**

Компонент	Основная проблема	Параметры неблагоприятного воздействия молнии					Примечания
Молние-защитная система	Эрозия в точке контакта (например, тонкие металлические листы)	ПУМ	$Q_{\text{длит}}$ Кл	$T$			
		I	200	< 1 с (применяют $Q_{\text{длит}}$ в отдельном выбросе)			
		II	150				
III – IV	100						
Молние-защитная система и токоотвод	Нагрев электрическим током	ПУМ	$W/R$ , кДж/Ом	$T$			При определении размеров в соответствии с IEC 62305-3 проводить испытания не требуется
		I	10 000	Применяют $W/R$ в адиабатической форме			
		II	5 600				
	III – IV	2 500					
	Механические воздействия	ПУМ	$I$ , кА	$W/R$ , кДж/Ом			
I		200	10 000				
		II	150	5 600			
		III – IV	100	2 500			

Окончание таблицы D.1

Компонент	Основная проблема	Параметры неблагоприятного воздействия молнии					Примечания
		ПУМ	$I$ , кА	$W/R$ , кДж/Ом	$T$		
Соединительные компоненты	Комбинированные воздействия (тепловые, механические и дуговые разряды)	ПУМ					
		I	200	10 000	< 2 мс (применяют $I$ и $W/R$ в отдельном импульсе)		
		II	150	5 600			
III – IV	100	2 500					
Заземлители	Эрозия в точке контакта	ПУМ	$Q_{\text{длит}}$ , Кл	$T$ , с			Обычно размеры определяют при рассмотрении механических/химических аспектов (например, коррозии)
		I	200	< 1 (применяют $Q_{\text{длит}}$ в отдельном выбросе)			
		II	150				
III – IV	100						
Ограничители перенапряжения, имеющие электро-разрядники	Комбинированные воздействия (тепловые, механические и дуговые разряды)	ПУМ	$I$ , кА	$Q_{\text{коротк}}$ , Кл	$W/R$ , кДж/Ом	$di/dt$ , кА/мкс	Применяют $I$ , $Q_{\text{коротк}}$ и $W/R$ в отдельном импульсе (длительность $T < 2$ мс); применяют $\Delta i/\Delta t$ в отдельном импульсе
		I	200	100	10 000	200	
		II	150	75	5 600	150	
III – IV	100	50	2 500	100			
Ограничители перенапряжения, содержащие металлосидные резисторные блоки	Энергетические воздействия (перегрузка)	ПУМ	$Q_{\text{коротк}}$ , Кл				Следует проверить оба аспекта
		I	100				
	II	75					
Диэлектрический эффект (искрение/образование трещин)	Диэлектрический эффект (искрение/образование трещин)	ПУМ	$I$ , кА	$T$ , мс			Можно рассматривать отдельные испытания
		I	200	< 2 (применяют $I$ в отдельном импульсе)			
II	150						
III – IV	100						

### D.3 Перераспределение тока

Параметры, приведенные в таблице D.3, относятся к току молнии в точке поражения. Фактически ток протекает на землю по нескольким путям, так как во внешней СМЗ обычно присутствуют несколько токоотводов и несколько проводников. Кроме того, в защищаемое здание (трубы водо- и газопроводов, линии электропередачи, линии связи и т. д.) включены различные системы энергоснабжения. При определении параметров фактического протекания тока в конкретных компонентах СМЗ во внимание принимают перераспределение тока. Как правило, определяют амплитуду тока и форму волны через компонент в конкретном местоположении СМЗ. Там, где проведение отдельной оценки не представляется возможным, параметры тока можно оценивать посредством следующих процедур.

Для оценки перераспределения энергии внутри СМЗ можно принять геометрический фактор  $k_c$  (см. IEC 62305-2, приложение С). Данный коэффициент обеспечивает оценку распределения потока тока молнии в токоотводах внешней СМЗ в наихудших условиях.

Для оценки перераспределения энергии при наличии внешних токоведущих частей и линий электропередачи, подсоединенных к защищенному зданию, можно использовать приближенные значения  $k_e$  и  $k'_e$ , рассматриваемые в приложении E.

Вышеописанный подход применяют к оценке пикового значения тока, текущего на землю, по одному отдельному пути. Расчет других параметров тока производят следующим образом:

$$I_p = kI \quad (D.1)$$

$$Q_p = kQ \quad (D.2)$$

$$(W/R)_p = k^2 (W/R) \quad (D.3)$$

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_p = k\left(\frac{di}{dt}\right), \quad (D.4)$$

- где  $x_p$  – значение рассматриваемого количества (пикового тока  $I_p$ , разряда  $Q_p$ , удельной энергии  $(W/R)_p$ , скорости нарастания тока  $(di/dt)_p$ ), касающееся конкретного пути протекания тока на землю «р»;
- $x$  – значение рассматриваемого количества (пикового тока  $I_p$ , разряда  $Q$ , удельной энергии  $(W/R)$ , скорости нарастания тока  $(di/dt)_p$ ), касающееся общего тока молнии;
- $k$  – коэффициент перераспределения тока;
- $k_c$  – коэффициент перераспределения тока для внешней СМЗ (см. IEC 62305-3, приложение C);
- $k_e, k'_e$  – коэффициенты перераспределения тока при наличии внешних токоведущих частей и линий электропередачи и линий связи, включенных в защищаемое здание (см. приложение E).

## D.4 Воздействия тока молнии, вызывающие возможное разрушение

### D.4.1 Тепловые воздействия

Тепловые воздействия, связанные с током молнии, относятся к резистивному нагреву, вызываемому циркуляцией электрического тока, который протекает через активное сопротивление проводника или в СМЗ. Тепловые воздействия также относятся к теплу, образуемому в основании электрических дуг в точке контакта и во всех изолированных частях СМЗ, вовлеченной в образование электрической дуги (например, электроразрядники).

#### D.4.1.1 Резистивный нагрев

Резистивный нагрев возникает в любом компоненте СМЗ, несущей значительную часть тока молнии. Минимальная площадь поперечного сечения проводов должна быть достаточной для предотвращения перегрева проводов до пожароопасного уровня. Для частей, подвергаемых воздействию атмосферных условий и/или коррозии, следует рассматривать критерии стойкости к механическим воздействиям и прочности. В случае возникновения проблем также необходима оценка нагрева проводов вследствие потока тока молнии, так как это представляет опасность для жизни персонала, а также риск повреждения объекта в результате пожара или взрыва. Ниже приводится руководство по оценке возрастания температуры проводов, подвергаемых потоку тока молнии.

Представлен следующий аналитический подход.

Мгновенная пиковая мощность, распространяющаяся как тепло в проводе, вследствие электрического тока выражается как:

$$P(t) = i^2 R. \quad (D.5)$$

Тепловая энергия, образуемая полным импульсом молнии, является активным сопротивлением пути разряда молнии через рассматриваемый компонент СМЗ, умноженным на удельную энергию импульса. Эта энергия выражается в джоулях или ватт-секундах.

$$W = R \cdot \int i^2 \cdot dt. \quad (D.6)$$

В грозном разряде фазы высокой удельной энергии удара молнии слишком короткие по своей длительности для распространения теплоты в строительной конструкции в значительном объеме. Следовательно, явления следует рассматривать как адиабатические.

Температуру проводов СМЗ можно определить по следующей формуле:

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} \left[ \exp \frac{W}{q^2} \cdot \frac{\alpha \cdot \rho_0}{\gamma \cdot C_w} - 1 \right], \quad (D.7)$$

- где  $\theta - \theta_0$  – возрастание температуры проводов, К;  
 $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, 1/К;  
 $W/R$  – удельная энергия импульса тока, Дж/Ом;  
 $\rho$  – удельное активное сопротивление провода при температуре окружающей среды, Ом·м;  
 $q$  – площадь поперечного сечения провода, м<sup>2</sup>;  
 $\gamma$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  
 $C_w$  – теплоемкость, Дж/кг·К;  
 $\theta_s$  – температура плавления, °С.

Собственные значения физических параметров, используемых в формуле (D.7), для различных материалов, применяемых в СМЗ, представлены в таблице D.2. В таблице D.3 в качестве примера применения данной формулы представлено возрастание температуры проводников, изготовленных из различных материалов, в виде зависимости  $W/R$  и площади поперечного сечения проводника.

Типичный разряд молнии характеризуется коротким по длительности ударом (время полуспада, составляющее 100 мкс) и высоким пиковым значением тока. При таких обстоятельствах также принимают во внимание скин-эффект. Однако в большинстве практических случаев, связанных с компонентами СМЗ, характеристики материала (динамическая магнитная проницаемость проводника) и геометрические конфигурации (площадь поперечного сечения проводника СМЗ) уменьшают влияние скин-эффекта на возрастание температуры проводника до незначительных уровней. Компонент удара молнии, в наибольшей степени относящийся к этому механизму нагрева, является первым возвратным ударом молнии.

**Таблица D.2 – Физические характеристики типичных материалов, используемых в компонентах системы молниезащиты**

Количество	Материалы			
	Алюминий	Низкоуглеродистая сталь	Медь	Нержавеющая сталь *
$\rho_0$ , Ом·м	$29 \cdot 10^{-9}$	$120 \cdot 10^{-9}$	$17,8 \cdot 10^{-9}$	$0,7 \cdot 10^{-9}$
$\alpha$ , 1/К	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$3,92 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$
$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	2 700	7 700	8 920	810 <sup>3</sup>
$\theta_s$ , °С	658	1 530	1 080	1 500
$C_s$ , Дж/кг	$397 \cdot 10^3$	$272 \cdot 10^3$	$209 \cdot 10^3$	–
$C_w$ , Дж/кг·К	908	469	385	500

\* Аустенитная (немагнитная).

**Таблица D.3 – Возрастание температуры проводников различных сечений как функция  $W/R$**

Поперечное сечение	Материал											
	Алюминий			Низкоуглеродистая сталь			Медь			Нержавеющая сталь *		
	МДж/Ом			МДж/Ом			МДж/Ом			МДж/Ом		
	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10
4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
10	564	–	–	–	–	–	169	542	–	–	–	–
16	146	454	–	1120	–	–	56	142	309	–	–	–
25	52	132	283	211	913	–	22	51	98	940	–	–

Окончание таблицы D.3

Поперечное сечение	Материал											
	Алюминий			Низкоуглеродистая сталь			Медь			Нержавеющая сталь *		
	МДж/Ом			МДж/Ом			МДж/Ом			МДж/Ом		
	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10
50	12	28	52	37	96	211	5	12	22	190	460	940
100	3	7	12	9	20	37	1	3	5	45	100	190

\* Аустенитная (немагнитная).

#### D.4.1.2 Тепловое повреждение точки крепления

Тепловое повреждение точки крепления можно наблюдать на всех компонентах СМЗ, на которой происходит образование дуги, т. е. в системе подачи воздуха, электроразрядниках и т. д. Плавление и эрозия материала может происходить в точке контакта. Фактически в зоне основания дугового разряда возникает эффективная тепловая мощность от самого основания дуги, а также от концентрации резистивного нагрева вследствие высоких плотностей тока. Большое количество тепловой энергии образуется на поверхности металла или в непосредственной близости к нему. Тепло, образуемое в основании электрической дуги, превышает то тепло, которое может поглощаться металлом за счет электропроводимости. Критичность процесса связана с амплитудой и длительностью тока.

##### D.4.1.2.1 Общие положения

Для расчета тепловых воздействий на поверхность металла в точке контакта канала разряда молнии были разработаны несколько теоретических моделей. Настоящий предстандарт описывает только модель падения анодного или катодного напряжения. Применение данной модели особенно эффективно для тонкой металлической обшивки. В отдельных случаях она дает заниженные результаты, поскольку данная модель предполагает, что вся энергия, поступающая в точку контакта молнии, расходуется на расплавление или испарение материала проводника, не учитывая растекание тепла в металле. Другие модели показывают зависимость повреждения точки контакта молнии от длительности импульса тока.

##### D.4.1.2.2 Модель падения анодного и катодного напряжения

Входную электроэнергию  $W$  в основании электрической дуги получают в результате умножения падения анодного/катодного напряжения  $u_{a,c}$  на заряд  $Q$  тока молнии:

$$W = \int u_{a,c} idt = u_{a,c} \int idt = u_{a,c} \cdot Q. \quad (D.8)$$

Так как  $u_{a,c}$  можно принять постоянным в рассматриваемом диапазоне токов, то заряд тока молнии  $Q$  отвечает за преобразование энергии в основании электрической дуги.

Значение падения анодного или катодного напряжения  $u_{a,c}$  составляет несколько десятых вольта.

При упрощенном подходе допускается, что вся энергия, образуемая в основании электрического разряда, используется только для расплавления. В формуле (D.9) используют допущение, которое приводит к завышенному значению объема расплавления.

$$V = \frac{u_{a,c} Q}{\gamma} \cdot \frac{1}{C_w (\theta_s - \theta_u) + c_s}, \quad (D.9)$$

где  $V$  – объем расплавленного металла, м<sup>3</sup>;

$u_{a,c}$  – падение анодного или катодного напряжения (принятого как постоянное), В;

$Q$  – заряд тока молнии, Кл;

$\gamma$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$C_w$  – теплоемкость, Дж/кгК;

$\theta_s$  – температура плавления, °С;

$\theta_u$  – температура окружающей среды, °С;

$c_s$  – скрытая теплота плавления, Дж/кг.

Собственные значения физических параметров, используемых в настоящей формуле, для различных материалов, используемых в СМЗ, указаны в таблице D.2. Рассматриваемый заряд является суммой заряда возвратного удара и длительного тока молнии. Лабораторный эксперимент показал, что воздействие заряда возвратного удара является незначительным в сравнении с воздействиями длительного тока.

#### D.4.2 Механические воздействия

Механические воздействия, вызываемые током молнии, зависят от амплитуды и длительности тока, а также от характеристики упругости поврежденной механической конструкции. Механические воздействия также зависят от сил трения, действующих между частями СМЗ при контакте друг с другом, где это происходит.

##### D.4.2.1 Магнитное взаимодействие

Магнитные силы возникают между двумя токонесущими проводниками или образуют угол или петлю, если имеется один токонесущий проводник. Если ток протекает через цепь, то амплитуда электродинамических сил, возникающих в различных положениях цепи, зависит как от амплитуды тока молнии, так и от геометрической конфигурации цепи. Механическое воздействие этих сил тем не менее зависит не только от их амплитуды, но также и от общей формы импульса тока, длительности, а также от геометрической конфигурации установки.

##### D.4.2.1.1 Электромагнитные силы

Электромагнитные силы, создаваемые током  $i$ , направляются в проводник, имеющий длинные параллельные отрезки  $l$  и расстояние  $d$  (длинная и малая петля), как показано на рисунок D.1, можно приблизительно рассчитать, используя следующую формулу:

$$F(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} i^2(t) \frac{l}{d} = 2 \cdot 10^{-7} i^2(t) \frac{l}{d}, \quad (\text{D.10})$$

где  $F(t)$  – электромагнитная сила, Н;

$i$  – ток, А;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость свободного пространства (вакуума) ( $4\pi \cdot 10^{-7}$ ), Гн/м;

$l$  – длина проводников, м;

$d$  – расстояние между прямыми параллельными отрезками проводника, м.

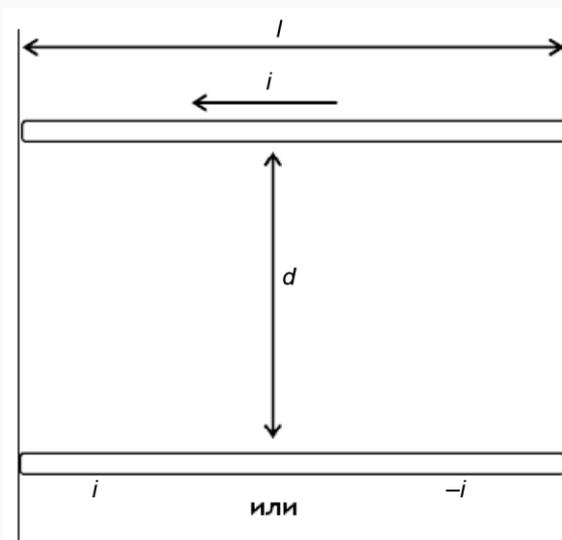


Рисунок D.1 – Обычное размещение двух проводников для расчета электродинамической силы

В СМЗ в качестве типичного примера показано симметричное угловое расположение проводников, образующее угол  $90^\circ$ , с зажимом, расположенным рядом с углом, как показано на рисунке D.2. Схема ударов для данного расположения показана на рисунке D.3. Осевая сила на горизонтальном проводнике может вытащить проводник из зажима. На рисунке D.4 показано цифровое значение силы вдоль горизонтального проводника с учетом значения пикового тока, равное 100 кА, и длины вертикального проводника, равной 0,5 м.

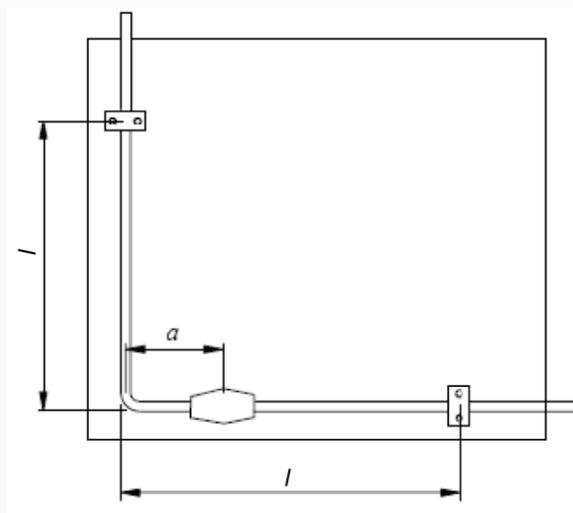


Рисунок D.2 – Типичное расположение проводника в системе молниезащиты

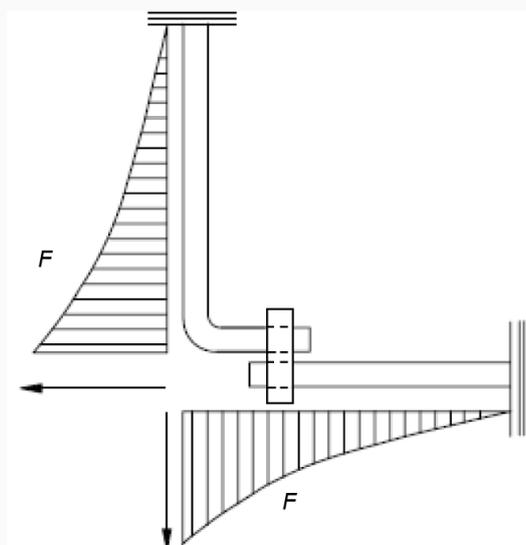
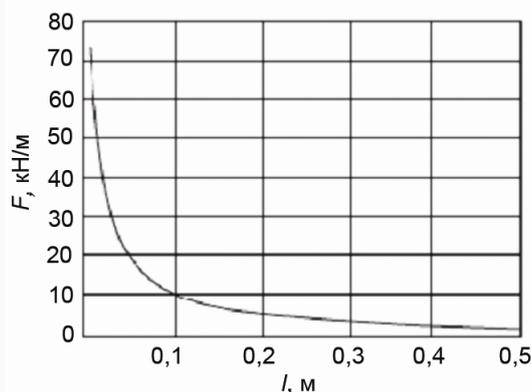


Рисунок D.3 – Схема ударов для конфигурации, представленной на рисунке D.2



Примечание – Значение пикового тока – 100 кА, длина вертикального проводника – 0,5 м.

**Рисунок D.4 – Сила на единицу длины вдоль горизонтального проводника, изображенного на рисунке D.2**

#### D.4.2.1.2 Воздействия электродинамических сил

Для амплитуды и приложенной силы мгновенное значение электродинамической силы  $F(t)$  пропорционально площади мгновенного тока  $I(t)^2$ . В отношении создания напряжения в пределах механической конструкции СМЗ, выраженного упругой деформацией  $\delta(t)$  и постоянной упругости  $k$  конструкции СМЗ, рассматривают два воздействия. Механическая частота (связанная с упругими свойствами конструкции СМЗ) и постоянная деформация конструкции (связанная с пластическим деформированием) являются наиболее важными параметрами. Кроме того, воздействие сил трения в конструкции также имеют большое значение.

Амплитуду вибраций упругой конструкции СМЗ, вызываемых электродинамической силой, которую создает ток молнии, можно определить с помощью дифференциальных уравнений второго порядка; основным фактором является соотношение длительности импульса тока и периода естественного механического колебания конструкции СМЗ. Стандартным условием, необходимым для применения СМЗ, являются естественные периоды колебания конструкции, намного превосходящие те, которые возникают в результате приложенной силы (длительность импульса тока молнии). В этом случае максимальное механическое напряжение возникает после остановки импульса тока и имеет максимальное значение, которое остается ниже значения приложенной силы. В большинстве случаев максимальное механическое напряжение может быть незначительным.

Пластичная деформация возникает тогда, когда напряжение растяжения превышает предел упругости материала. Если конструкция СМЗ изготовлена из мягкого материала, например алюминия или отожженной меди, то электродинамические силы могут деформировать проводники в углах и петлях. Поэтому элементы СМЗ следует проектировать так, чтобы они выдерживали эти силы, а главным образом обладали упругостью.

Общее механическое напряжение, прилагаемое к конструкции СМЗ от интеграла во времени приложенной силы и, следовательно, от удельной энергии, связанной с импульсом тока. Оно также зависит от формы импульса тока и его длительности (по сравнению с периодом свободного колебания конструкции). Поэтому все эти параметры следует принимать во внимание во время проведения испытания.

#### D.4.2.2 Повреждение вследствие волны акустического удара

При протекании тока молнии в электрической дуге образуется ударная волна. Сила этой ударной волны зависит от величины пикового тока и скорости его возрастания. В общем повреждение вследствие воздействия акустической ударной волны на металлические части СМЗ является незначительным, но она может повредить окружающие объекты.

#### D.4.2.3 Комбинированные воздействия

Тепловые и механические воздействия возникают одновременно. Если нагрев материала компонентов (штыри, зажимы и т. д.) достаточен для размягчения материалов, то может произойти гораздо большее повреждение, чем в других случаях. В исключительных случаях расплавленный проводник может способствовать взрыву, что приведет к значительному повреждению здания, сооружения. Если размер поперечного сечения металла достаточен для безопасного осуществления всего действия, то нужно проверять только механическую целостность.

### D.4.3 Искрение

Искрение опасно только в воспламеняемой среде. В большинстве случаев искрение не учитывают для элементов СМЗ. Возникающее искрение может быть двух типов: термическое искрение и искрение напряжения. Термическое искрение возникает при прохождении тока с большими номинальными значениями и пересекает соединение между двумя токопроводящими материалами. В большинстве случаев термическое искрение возникает внутри соединения, если давление на стыке слишком низкое, по причине высокой плотности тока и несоответствующего давления на стыке. Интенсивность термического искрения связана с удельной энергией, следовательно, первый возвратный импульс является наиболее критическим компонентом молнии. Искрение напряжения возникает там, где ток направлен на преодоление нелинейных путей, например внутри соединения, если напряжение индуцировано в такой петле и превышает пробивное напряжение между металлическими путями. Индуцированное напряжение пропорционально произведению самоиндуктивности и скорости нарастания тока молнии. Поэтому наиболее критическим компонентом молнии для искрения напряжения является последующий отрицательный импульс.

## D.5 Компоненты системы молниезащиты, соответствующие проблемы и контролируемые параметры

СМЗ состоят из нескольких различных компонентов, каждый из которых выполняет специальную функцию в системе. Характер компонентов и конкретные нагрузки, которым они подвергаются, требуют специального рассмотрения при подготовке лабораторных испытаний с целью проверки их технических характеристик.

### D.5.1 Молниеприемники

Воздействия на молниеприемники возникают в результате механических и тепловых действий (как указано ниже в D.5.2, но следует обратить внимание на то, что большая часть тока молнии будет протекать в проводнике молниезащиты, в который ударила молния), а также в результате образования электродуговой эрозии, в частности в естественных компонентах СМЗ, например в обшивке крыши тонким металлом (где может произойти пробой или повышение температуры задней поверхности) и подвесных проводниках.

В отношении воздействий электродуговой эрозии рассматривают два основных контролируемых параметра, т. е. заряд длительного тока и его длительность. Заряд определяет вход энергии в основание дуги. В частности, возникающие длительные разряды являются наиболее сильными для данного воздействия, тогда как короткие разряды могут быть незначительными. Длительность импульса тока играет важную роль в таком явлении, как передача тепла материалу. Длительность тока, прикладываемого во время испытаний, сравнивают с длительностью тока длительных разрядов 0,5 – 1 с.

### D.5.2 Токоотводы

Воздействия молнии на токоотводы можно разделить на две основные категории:

- тепловые воздействия вследствие резистивного нагрева;
- механические воздействия, связанные с магнитным взаимодействием, когда ток молнии распределяется молниеотводами, расположенными близко друг к другу, или где ток изменяет направление (изгибы или соединения между молниеотводами, расположенными под заданным углом относительно друг друга).

В большинстве случаев эти два воздействия возникают независимо друг от друга и для проверки каждого из них можно проводить отдельные лабораторные испытания. Данный подход можно применить во всех случаях, когда тепло, создаваемое потоком тока молнии, не изменяет в значительной мере механические характеристики.

#### D.5.2.1 Резистивный нагрев

Расчеты и измерения, связанные с нагревом молниеотводов с различными поперечными сечениями, изготовленными из различных материалов, вследствие тока молнии, текущего вдоль молниеотвода, были уже опубликованы несколькими авторами. Основные результаты, касающиеся схем и формул, представлены в D.4.1.1. Как правило, для проверки поведения молниеотвода относительно повышения температуры лабораторные испытания не проводят. Во всех случаях, когда требуется проведение лабораторного испытания, принимают во внимание следующее. Основными контролируемыми параметрами, рассматриваемыми в настоящем случае, являются удельная энергия и дли-

тельность импульса тока. Удельная энергия определяет повышение температуры вследствие омического нагрева, вызываемого потоком тока молнии. Рассматривают цифровые значения, касающиеся первого разряда молнии. Стабильные данные получают при рассмотрении положительных разрядов. Длительность импульсного тока имеет решающее влияние на процесс теплообмена в отношении условий, окружающих молниеотвод. В большинстве случаев длительность импульсного тока является настолько короткой, что процесс нагрева можно рассматривать как адиабатический.

#### **D.5.2.2 Механические воздействия**

Как приводилось в D.4.2.1, между молниеотводами, несущими ток молнии, создаются механические взаимодействия. Сила пропорциональна созданию токов, протекающих в молниеотводах (или площади тока, если рассматривают отдельный изогнутый молниеотвод), и связана с инверсией расстояния между молниеотводами.

Обычной ситуацией, в которой может происходить видимое воздействие, является та, когда молниеотвод образует петлю или изогнут. Если такой проводник несет ток молнии, он будет подвергаться воздействию механической силы, которая способствует увеличению петли, выпрямлению угла и, как следствие, деформации петли. Величина этой силы пропорциональна площади амплитуды тока. Однако необходимо сделать четкое различие между электродинамической силой, которая пропорциональна площади амплитуды тока, и соответствующим напряжением, зависящим от характеристик упругости механической конструкции СМЗ. Для конструкций СМЗ со сравнительно низкими резонансными частотами напряжение, развивающееся в конструкции СМЗ, будет значительно ниже электродинамической силы. В этом случае нет необходимости проводить какое-либо лабораторное испытание для проверки механического поведения молниеотвода, изогнутого под прямым углом, поскольку соблюдаются требования настоящего предстандарта к площади поперечного сечения.

Во всех случаях, которые требуют проведения лабораторного испытания (особенно для мягких материалов), принимают во внимание и рассматривают следующие три параметра: длительность, удельную энергию импульсного тока и амплитуду тока. Длительность импульсного тока, сравниваемая с периодом механического резонансного колебания конструкции СМЗ, определяет тип механического реагирования системы на смещение:

- если длительность импульса намного короче, чем период механического резонансного колебания конструкции СМЗ (обычный случай для конструкций СМЗ, в которые попадают грозовые импульсы), то масса и упругость системы препятствуют в достаточной мере ее смещению, а соответствующая механическая нагрузка связана в основном с удельной энергией импульса тока. Максимальное значение импульсного тока имеет ограниченное воздействие;

- если продолжительность импульса сравнима с периодом механического резонансного колебания конструкции (или превышает его), то смещение системы является более чувствительной для формы импульса прикладываемой нагрузки. В этом случае во время проведения испытания необходимо воспроизводить пиковую величину импульса тока и его удельную энергию.

Удельная энергия импульсного тока определяет напряжение, вызываемое упругой и пластической деформацией конструкции СМЗ. Рассматривают цифровые значения, касающиеся первого разряда молнии. Максимальные значения импульсного тока определяют максимальную длину смещения конструкции СМЗ относительно жестких систем высокочастотных естественных колебаний. Рассматривают цифровые значения, касающиеся первого разряда молнии.

#### **D.5.3 Соединительные компоненты**

Соединительные компоненты между соседними молниеотводами СМЗ являются вероятными точками механической и тепловой уязвимости при возникновении высоких напряжений.

Если соединитель установлен таким образом, что молниеотвод изогнут под прямым углом, то основные воздействия напряжений связаны с механическими силами, которые стремятся выпрямить установленный молниеотвод, и силами трения между соединительным компонентом и молниеотводами, оттягивающими соединение. Возможно возникновение электрических дуг в точках контакта с различными частями. Более того, значительным является тепловой эффект, вызываемый концентрацией тока над контактными поверхностями малой площади. Лабораторные испытания показали, что трудно рассматривать каждое воздействие отдельно. На механическую прочность влияет локальное плавление зоны контакта. Соответствующие смещения между частями соединительных компонентов способствуют развитию электрических дуг и последующему интенсивному образованию тепла. При отсутствии действующей модели лабораторные испытания проводят таким образом, чтобы как можно точнее представить соответствующие параметры тока молнии в наиболее критической ситуации, т. е. применять соответствующие параметры тока молнии с помощью отдельного электрического испыта-

ния. В этом случае необходимо рассмотреть три параметра: пиковое значение, удельную энергию и длительность импульсного тока. Максимальные значения импульсного тока определяют максимальную силу или в случае превышения электродинамической силы над силой трения – длину максимального смещения конструкции СМЗ. Рассматривают цифровые значения, касающиеся первого разряда молнии. Стабильные данные получают посредством рассмотрения положительных разрядов. Удельная энергия импульса тока определяет нагрев на контактных поверхностях, где ток концентрируется над небольшими зонами. Рассматривают цифровые значения, касающиеся первого разряда молнии. Стабильные данные получают посредством рассмотрения положительных разрядов. Длительность импульсного тока определяет максимальное смещение конструкции после превышения сил трения и играет важное значение в явлении переноса тепла в материал.

#### **D.5.4 Заземлители молниезащитной системы**

Реальные проблемы с электродами СМЗ связаны с химической коррозией и механическими повреждениями, вызванными неэлектродинамическими силами. В отдельных случаях эрозия заземляющего электрода в основании электрической дуги является незначительной. Однако следует заметить, что в отличие от молниеприемника типичная СМЗ имеет несколько заземлителей. Ток молнии будет перераспределяться между отдельными заземляющими электродами, что в результате уменьшит воздействие на основание электрической дуги. В этом случае необходимо рассмотреть два основных контролируемых параметра: заряд и длительность импульсного тока с большой продолжительностью. Заряд определяет вход энергии в основание электрической дуги. В частности, влияние первого удара может быть ничтожно малым, поскольку появляются более длительные удары, серьезно влияющие на этот компонент. Длительность импульса тока играет важную роль в явлении передачи тепла материалу. Длительность импульсов тока, прикладываемых во время испытаний, должна быть сопоставимой длительности более длинных ударов 0,5 – 1 с.

#### **D.6 Ограничитель перенапряжения**

Влияние напряжения на УЗП, вызываемого молнией, зависит от типа рассматриваемого УЗП с примечанием о наличии или отсутствии разрядника.

##### **D.6.1 Ограничитель перенапряжения, имеющий электроразрядники**

Воздействия на электроразрядники, вызываемые молнией, можно разделить на две основные категории:

- эрозия электрода разрядника вследствие нагрева, плавления и испарения материала;
- механическое напряжение, вызванное ударной волной разряда.

Трудно исследовать вышеуказанные воздействия по отдельности, потому что оба они связаны с основными параметрами тока молнии посредством сложных взаимосвязей. Лабораторные испытания электроразрядников проводят таким образом, чтобы как можно более точно представить соответствующие параметры тока молнии в наиболее критических условиях, т. е. все соответствующие параметры тока молнии должны применяться через отдельное электростатическое напряжение. В этом случае рассматривают пять параметров: пиковое значение, заряд, длительность, удельную энергию и скорость возрастания импульсного тока.

Пиковое значение тока определяет критичность ударной волны. Рассматривают числовые значения, касающиеся первого удара молнии. Числовые значения получают посредством рассмотрения положительных ударов. Заряд определяет вход энергии в основание электрической дуги. Энергия в электрической дуге нагревает, расплавляет и возможно испаряет часть материала электрода в точке контакта электрической дуги. Следует рассматривать числовые значения, касающиеся всей молнии. Однако заряд длительного тока во многих случаях можно не учитывать в зависимости от конфигурации системы электропередачи (TN, TT или IT). Длительность импульсного тока определяет явление передачи тепла в массу электрода и в результате этого распространение фронта плавления.

Удельная энергия импульса тока определяет собственное магнитное сжатие дуги и физику плазменных струй электрода, образуемых на стыке поверхности электрода и дуги (которые могут загасить значительное количество расплавленного материала). Рассматривают цифровые значения, касающиеся первого разряда молнии. Числовые значения получают путем рассмотрения положительных ударов.

Примечание – Амплитуда сопровождающего тока промышленной частоты является важным фактором для электроразрядников, используемых в системах электроснабжения. Поэтому его следует принимать во внимание.

### **D.6.2 Ограничитель перенапряжения, содержащий металлоксидные варисторы**

Напряжение металлоксидных варисторов, вызываемое молнией, можно подразделить на две основные категории: превышение нагрузки и поверхностный пробой. Каждая категория определяется характером отказа, возникающего в результате различных явлений, и различными параметрами. Повреждение металлоксидного УЗП связано с его слабыми характеристиками и поэтому маловероятно, что может возникнуть взаимодействие между различными опасными напряжениями. Однако оно должно быть приемлемым для проведения отдельных испытаний с целью проверки поведения при каждом условии характера отказа.

### **D.7 Совокупность контролируемых параметров, принимаемых в испытании компонентов системы молниезащиты**

В таблице D.1 представлены наиболее важные критические аспекты каждого компонента СМЗ во время осуществления их функции и указаны параметры тока молнии, которые должны быть воспроизведены в лабораторных испытаниях. Числовые значения, представленные в таблице D.1, относятся к параметрам молнии, имеющим значение, в точке поражения. Испытательные значения величин должны рассчитываться с учетом перераспределения тока, который может выражаться с помощью коэффициента перераспределения тока, как это указано в подразделе D.3. Следовательно, числовые значения параметров, используемых во время испытаний, можно получить на основании данных, приведенных в таблице D.1, с применением коэффициентов уменьшения, связанных с перераспределением тока, в соответствии с формулами, указанными в подразделе D.3.

## Приложение Е (справочное)

### Выбросы тока вследствие удара молнии в различные точки установки

#### Общее представление

Для нахождения размеров проводников, ограничителей перенапряжения и аппаратуры определяют возникновение опасности вследствие выбросов тока на конкретную точку установки этих элементов. Выбросы тока могут возникать из (частичных) токов молнии и из индуктивных влияний в петлях установки. Степень опасности, возникающей вследствие этих выбросов тока, должна быть меньше уровней выдерживания используемых компонентов (определенных соответствующими испытаниями при необходимости).

#### Е.1 Выбросы тока вследствие ударов молнии в здание (источник опасности S1)

##### Е.1.1 Выбросы тока, протекающие через внешние токопроводящие части и линии, подсоединенные к зданию

При электропроводимости на землю ток молнии разделяется между СМЗ заземлителей, внешними токопроводящими частями и линиями непосредственно или через подсоединенные к ним ограничители перенапряжения.

Если  $I_f = k_e I$  (Е.1)

является составляющей тока молнии, относящейся к каждой внешней токопроводящей части или линии, то  $k_e$  зависит от:

- количества параллельных путей;
- условного полного сопротивления заземления путей, находящихся под землей, или сопротивления заземления воздушных путей, если они соединены с подземными;
- удельного полного сопротивления заземления СМЗ.

Для установки, находящейся под землей

$$k_e = \frac{Z}{Z_1 + Z(n_1 + n_2 \frac{Z_1}{Z_2})} \quad (E.2)$$

Для воздушной установки

$$k_e = \frac{Z}{Z_2 + Z(n_2 + n_1 \frac{Z_2}{Z_1})} \quad (E.3)$$

где  $Z$  – условное полное сопротивление заземления СМЗ;

$Z_1$  – условное полное сопротивление заземления внешних частей или линий (таблица Е.1), проходящих под землей;

$Z_2$  – сопротивление заземления заземляющей магистрали, соединенной с воздушной линией, на землю. Если заземляющее сопротивление точки заземления не известно, то можно использовать значение  $Z_1$ , указанное в таблице Е.1 (если удельное сопротивление относится к точке заземления).

Примечание – Принимается значение, установленное в вышеуказанной формуле, одинаковое для каждой точки заземления. Если это не так, то необходимо использовать более сложные формулы.

$n_1$  – общее количество внешних частей или линий, проходящих под землей;

$n_2$  – общее количество внешних частей или линий, проходящих над землей;

$I$  – ток молнии в зависимости от рассматриваемого класса СМЗ.

Если допустить, что часть тока молнии протекает в СМЗ и  $Z_2 = Z_1$ , то значение  $k_e$  для внешней токопроводящей части или линии можно определить по формуле

$$k_e = 0,5 / (n_1 + n_2). \quad (\text{E.4})$$

Если входящие линии (например, линии электропередачи или линии связи) не имеют защитного экранирования или не проложены в металлическом трубопроводе, каждый из проводников  $n'$  проводит равные части тока молнии

$$k'_e = k_e / n', \quad (\text{E.5})$$

где  $n'$  – общее количество проводников.

Для экранированных линий, соединенных на входе, значения тока  $k'_e$  для каждого из проводников  $n'$  экранированной системы энергоснабжения определяют по формуле

$$k_e = k_e \cdot R_s / (n' \cdot R_s + R_c), \quad (\text{E.6})$$

где  $R_s$  – активное сопротивление на единицу длины экрана;

$R_c$  – активное сопротивление на единицу длины внутреннего проводника.

Примечание – Формула может преуменьшать роль экранирования в отведении тока молнии вследствие взаимоиндуктивности между сердечником и экраном.

**Таблица Е.1 – Значения  $Z_1$  и  $Z_2$  условного полного сопротивления заземления в соответствии с удельным сопротивлением почвы**

$\rho$ , Ом·м	$Z_1$ , Ом	Условное полное сопротивление заземления в зависимости от класса СМЗ $Z$ , Ом		
		I	II	III – IV
$\leq 100$	8	4	4	4
200	11	6	6	6
500	16	10	10	10
1 000	22	10	15	20
2 000	28	10	15	40
3 000	35	10	15	60

Примечание – Значения, указанные в данной таблице, относятся к условному полному сопротивлению заземления провода, проложенного в земле, при условии импульса (10/350 мкс).

### Е.1.2 Факторы, влияющие на перераспределение тока молнии в линиях электропередачи

При подробных расчетах на амплитуду и форму волны таких выбросов тока могут влиять несколько факторов:

– длина кабеля может влиять на перераспределение тока и характеристики формы импульса вследствие соотношения разности сигналов ( $L / R$ );

– различное полное сопротивление нейтральных и фазовых проводников может влиять на перераспределение тока.

Примечание – Например, если нейтральный проводник N имеет многократное заземление, нижнее полное сопротивление N в сравнении с  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  может в результате привести к тому, что 50 % тока будет протекать через проводник N, а оставшиеся 50 % будут перераспределены среди других трех линий (по 17 % в каждой). Если N,  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  имеют одинаковое полное сопротивление, то каждый проводник будет проводить приблизительно 25 % тока;

– другие полные сопротивления трансформатора могут влиять на перераспределение тока (данное влияние незначительно, если трансформатор защищен ограничителем перенапряжения, шунтирующим их сопротивление);

– связь между условными сопротивлениями заземления и элементами на стороне нагрузки может влиять на перераспределение тока (чем ниже полное сопротивление трансформатора, тем выше выброс тока, протекающего в низковольтную систему);

– параллельные потребители способствуют уменьшению значения эффективного сопротивления низковольтной системы, которая может увеличивать ток молнии, протекающий в данную систему.

## Е.2 Выбросы, относящиеся к зданиям, подсоединенным к системам энергоснабжения

### Е.2.1 Выбросы тока вследствие ударов молнии в системы энергоснабжения (источник опасности S3)

Для ПУМ на подсоединенные системы энергоснабжения следует принимать во внимание распределение тока молнии на оба направления системы энергоснабжения и повреждение изоляции. Выбор значения  $I_{\text{имп}}$  может основываться на значениях, приведенных в таблице Е.2, в которой предпочтительные значения  $I_{\text{имп}}$  связаны с уровнем надежности защиты от ПУМ.

Таблица Е.2 – Предполагаемые импульсные перенапряжения вследствие удара молнии

Уровень молние-защиты	Низковольтные системы			Линии связи		
	Удар молнии в систему энерго-снабжения	Удар молнии вблизи системы энерго-снабжения	Вблизи или в здание, сооружение	Удар молнии в систему энерго-снабжения	Удар молнии вблизи системы энерго-снабжения	Вблизи или в здание, сооружение
	Источник повреждения S3 (прямой удар молнии). Форма волны: 10/350 мкс (кА)	Источник повреждения S4 (непрямой удар молнии). Форма волны: 8/20 мкс (кА)	Источник повреждения S1 или S2 (индуцированный ток только для S1). Форма волны: 8/20 мкс (кА)	Источник повреждения S3 (прямой удар молнии). Форма волны: 10/350 мкс (кА)	Источник повреждения S4 (непрямой удар молнии). Измерено: 5/300 мкс (определено: 8/20 мкс) (кА)	Источник повреждения S2 (индуцированный ток). Форма волны: 8/20 мкс (кА)
III – IV	5	2,5	0,1	1	0,01 (0,55)	0,05
I – II	10	5	0,2	2	0,02 (0,1)	0,1

Для экранированных линий значения сверхтоков, представленных в таблице Е.2, могут быть снижены на коэффициент 0,5.

Примечание – Допускается, что сопротивление экрана приблизительно равняется сопротивлению всех проводников системы энергоснабжения в параллели.

### Е.2.2 Выбросы тока вследствие ударов молнии вблизи систем энергоснабжения (источник опасности S4)

Выбросы тока дуговых разрядов обладают намного более низкой энергией, чем выбросы, связанные с ударами молнии в системы энергоснабжения (источник повреждения S3). Ожидаемые сверхтоки, связанные с конкретным уровнем надежности защиты от ПУМ, указаны в таблице Е.2. Для экранированных линий значения сверхтоков, указанные в таблице Е.2, могут быть снижены на коэффициент 0,5.

## Е.3 Выбросы тока вследствие индуктивного влияния (источник опасности S1 или S2)

Выбросы тока вследствие индуктивного влияния магнитных полей, создаваемые либо вблизи ударов молнии (источник S2), либо током молнии, который течет во внешнюю СМЗ или изолирующий промежуток ЗМЗ 1 (источник S1), имеют типичную форму волны тока 8/20 мкс. Такой выброс тока следует рассматривать внутри контакта устройства или вблизи него в пределах ЗМЗ 1, или на границе между ЗМЗ 1 и ЗМЗ 2.

### Е.3.1 Выбросы тока внутри неэкранированной зоны молниезащиты 1 (ЗМЗ 1)

Внутри неэкранированной ЗМЗ 1 (например, защищенной только внешней СМЗ согласно IEC 62305-3 с шириной ячейки более 5 м) следует ожидать сравнительно большие выбросы тока вследствие индуктивных влияний из незатухающего магнитного поля. Ожидаемые сверхтоки, связанные с конкретным уровнем надежности защиты от ПУМ, указаны в таблице Е.2.

### Е.3.2 Выбросы тока внутри экранированных зон молниезащиты 1

Внутри экранированной ЗМЗ 1 с эффективным безопасным изолирующим промежутком (с шириной ячейки менее 5 м в соответствии с IEC 62305-4, приложение А) вероятность выбросов тока вследствие индуктивных влияний магнитных полей намного меньше, чем вероятность выбросов в неэкранированной ЗМЗ 1 (см. Е.3.1). Внутри ЗМЗ 1 индуктивные влияния снижаются вследствие эффекта затухания ее изолирующего промежутка. Внутри ЗМЗ 2 выбросы снижаются вследствие каскадного эффекта обоих изолирующих промежутков ЗМЗ 1 и ЗМЗ 2.

### Е.4 Общая информация, касающаяся ограничителей перенапряжения

Использование ограничителей перенапряжения зависит от их способности противостоять, классифицированной в [6] для энергетических систем и в [7] – для систем связи. Ограничителями перенапряжения, которые должны использоваться в соответствии с их установочным положением, являются следующие:

а) на входе линии в здание, сооружение (на границе ЗМЗ 1, например на основном распределительном щите):

– ограничители перенапряжения, испытываемые с  $I_{имп}$  (типичная форма волны 10/350, например ограничитель перенапряжения, испытываемый в соответствии с классом I);

– ограничители перенапряжения, испытываемые с  $I_n$  (типичная форма волны 8/20, например ограничитель перенапряжения, испытываемый в соответствии с классом II);

б) вблизи защищаемой аппаратуры (на границе защитной зоны 2 (ЗМЗ 2) и выше, например на вторичном распределительном щите (SB) или на выходном гнезде SA):

– ограничители перенапряжения, испытываемые с  $I_n$  (типичная форма волны 8/20, например ограничитель перенапряжения, испытываемый в соответствии с классом II);

– ограничители перенапряжения, испытываемые с комбинированным сигналом (типичная форма волны 8/20, например ограничитель перенапряжения, испытываемый в соответствии с классом III).

### Библиография

- [1] IEC 60664-1:1992 Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 1. Principles, requirements and tests  
(Координация изоляции для оборудования низковольтных систем. Часть 1. Принципы, требования и испытания)
- [2] IEC 61000-4-5:2005 \* Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test  
(Электромагнитная совместимость. Часть 4-5. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии)
- [3] Berger K., Anderson R.B., Kroninger H., Parameters of lightning flashes. GIPRE Electra No. 41 (1975), pp. 23 – 37  
(Бергер К., Андерсон Р. В., Кренингер Х. Параметры ударов молнии. GIPRE Electra № 41 (1975), с. 23 – 37)
- [4] Anderson R.B., Eriksson A.J., Lightning parameters for engineering application, GIPRE Electra No. 69 (1980), pp. 65 – 102  
(Андерсон Р. В., Эрикссон А. Дж. Параметры молнии для технического применения)
- [5] IEEE working group report, Estimating lightning performance of transmission lines II, 1992  
(Отчет рабочей группы IEEE. Оценка грозовых перекрытий на длину линий электропередачи II, 1992)
- [6] IEC 61643-1:2005 Low-voltage surge protective devices – Part 1: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Requirements and tests  
(Устройства защиты от перенапряжений низковольтные. Часть 1. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к низковольтным энергораспределительным системам. Требования и испытания)
- [7] IEC 61643-21:2009 Low-voltage surge protective devices – Part 21: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Performance requirements and testing methods  
(Устройства защиты от перенапряжений низковольтные. Часть 21. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к телекоммуникационным и сигнализационным сетям. Требования к эксплуатационным характеристикам и методы испытаний)