ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 54418.24— 2023 (МЭК 61400-24:2019)

Ветроэнергетика

УСТАНОВКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ

Часть 24

Молниезащита

(IEC 61400-24:2019, Wind energy generation systems — Part 24: Lightning protection, MOD)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2024

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Фондом инфраструктурных и образовательных программ и обществом с ограниченной ответственностью «ВИЭСХ-ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ» (ООО «ВИЭСХ-ВИЭ») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 016 «Электроэнергетика»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 декабря 2023 г. № 1769-ст

4 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к международному стандарту МЭК 61400-24:2019 «Системы ветроэнергетические. Часть 24. Молниезащита» (IEC 61400-24:2019 «Wind energy generation systems — Part 24: Lightning protection», MOD) путем изменения отдельных фраз (слов, значений показателей, ссылок), которые выделены в тексте курсивом, а также путем изменения содержания отдельных структурных элементов.

Внесение указанных отклонений направлено на учет потребностей национальной экономики Российской Федерации и особенностей российской национальной стандартизации.

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5).

Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте, приведены в дополнительном приложении ДА.

Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного стандарта приведено в дополнительном приложении ДБ

5 ВЗАМЕН ГОСТ Р 54418.24—2013 (МЭК 61400-24:2010)

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

© IEC, 2019
© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2024

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

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 3
4 Обозначения 6
5 Сокращения 10
6 Воздействие молнии на ВЭУ 10
6.1 Общие положения 10
6.2 Параметры тока молнии и уровни молниезащиты 10
7 Оценка воздействия молнии 12
7.1 Общие положения 12
7.2 Оценка влияния числа ударов молнии на ВЭУ или группу ВЭУ 13
7.3 Оценка риска повреждения 18
8 Молниезащита отдельных компонентов ВЭУ 20
8.1 Общие положения 20
8.2 Лопасти 21
8.3 Гондола и другие элементы конструкции 25
8.4 Механический привод и система установки на ветер 27
8.5 Электрические низковольтные системы, электронные системы и их компоненты 29
8.6 Электрические системы высокого напряжения 38
9 Система заземления ВЭУ 40
9.1 Общие положения 40
9.2 Уравнивание потенциалов 41
9.3 Элементы конструкции ВЭУ 41
9.4 Размеры электродов 43
9.5 Исполнение и техническое обслуживание 44
10 Безопасность персонала 44
11 Документация системы молниезащиты 45
11.1 Общие положения 45
11.2 Документация, необходимая для анализа конструкции 45
11.3 Информация о площадке размещения ВЭУ 47
11.4 Информация для руководства по проверке СМЗ 47
11.5 Руководства 47
12 Проверки системы молниезащиты 47
12.1 Объем проверок 47
12.2 Порядок проведения проверок 48
12.3 Техническое обслуживание 49
Приложение *A* (справочное) Молниезащита малых ВЭУ 50
Приложение *B* (справочное) Воздействие молнии на ВЭУ 51
Приложение *C* (обязательное) Методы испытаний 60
Приложение *D* (справочное) Оценка воздействия молнии 81
Приложение *E* (справочное) Классификация повреждений молнией на основе менеджмента риска 93
Приложение *F* (справочное) Молниевая обстановка и зоны молниезащиты 101
Приложение *G* (справочное) Защита лопастей 108
Приложение *H* (справочное) Проверка сходства конструкции лопастей с конструкциями лопастей, испытанными ранее 117
Приложение *I* (справочное) Проверка адекватности методов численного анализа, используемых при создании зон молниезащиты 119
Приложение *J* (справочное) Испытание вращающихся элементов 121
Приложение *K* (справочное) Уменьшение влияния магнитных полей, возникающих при ударе молнии 125
Приложение *L* (справочное) Выбор и монтаж УЗИП 128
Приложение *M* (справочное) Методы испытаний на устойчивость на уровне системы 132
Приложение *N* (справочное) Системы заземления ВЭС 137

Приложение *О* (справочное) Система заземления ВЭУ 138
Приложение *Р* (справочное) Системы мониторинга 144
Приложение *Q* (справочное) Пример определения точек измерения при определении непрерывности 146
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте 148
Приложение ДБ (справочное) Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного стандарта 150
Библиография 153

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Ветроэнергетика

УСТАНОВКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ

Часть 24

Молниезащита

Wind power engineering. Wind turbines. Part 24. Lightning protection

Дата введения — 2024—02—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на ветроэнергетические установки (ВЭУ) и ветроэнергетические станции (ВЭС), кроме малых ВЭУ, и устанавливает требования по их защите от молний. Указания по молниезащите малых ВЭУ приведены в приложении А.

В настоящем стандарте установлены правила оценки влияния ударов молнии на ВЭУ и оценки рисков, связанных с такими ситуациями.

В стандарте установлены требования по организации молниезащиты ВЭУ, включая заземление, применению промышленных электрических стандартов и стандартов по электромагнитной совместимости (ЭМС). В стандарте установлены требования к защите лопастей и других компонентов ВЭУ, в том числе электрических систем и систем управления, от прямых и косвенных воздействий молний. Определены методы испытаний системы молниезащиты.

Стандарт устанавливает требования по обеспечению безопасности персонала при ударах молнии и требования по анализу статистики ущерба и отчетности.

В отношении всех технических средств, выполняющих функции измерения, должны выполняться все метрологические нормы и требования, предусмотренные [1]. Оборудование должно быть метрологически аттестовано в установленном порядке. Средства измерений должны быть поверены или откалиброваны в установленном порядке.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 1516.2—97 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции

ГОСТ 27474 (МЭК 587—84) Материалы электроизоляционные. Методы испытания на сопротивление образованию токопроводящих мостиков и эрозии в жестких условиях окружающей среды

ГОСТ 30804.6.2 (IEC 61000-6-2:2005) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в промышленных зонах. Требования и методы испытаний

ГОСТ IEC 61000-4-5 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-5. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к выбросу напряжения

ГОСТ IEC 61000-4-9 Электромагнитная совместимость. Часть 4-9. Методы испытаний и измерений. Испытания на устойчивость к импульсному магнитному полю

Издание официальное

ГОСТ IEC 61643-11—2013 Устройства защиты от перенапряжений низковольтные. Часть 11. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к низковольтным системам распределения электроэнергии. Требования и методы испытаний

ГОСТ IEC 61643-12 Устройства защиты от импульсных перенапряжений низковольтные. Часть 12. Устройства защиты от импульсных перенапряжений в низковольтных силовых распределительных системах. Принципы выбора и применения

ГОСТ IEC 61643-21 Устройства защиты от перенапряжений низковольтные. Часть 21. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к телекоммуникационным и сигнализационным сетям. Требования к эксплуатационным характеристикам и методы испытаний

ГОСТ IEC 61643-22—2022 Устройства защиты от импульсных перенапряжений низковольтные. Часть 22. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к телекоммуникационным и сигнальным сетям. Принципы выбора и применения

ГОСТ Р 50571.4.44 (МЭК 60364-4-44:2007) Электроустановки низковольтные. Часть 4.44. Защита для обеспечения безопасности. Защита от резких отклонений напряжения и электромагнитных возмущений

ГОСТ Р 50571.5.53—2013/МЭК 60364-5-53:2002 Электроустановки низковольтные. Часть 5-53. Выбор и монтаж электрооборудования. Отделение, коммутация и управление

ГОСТ Р 50571.5.54/МЭК 60364-5-54:2011 Электроустановки низковольтные. Часть 5-54. Заземляющие устройства, защитные проводники и защитные проводники уравнивания потенциалов

ГОСТ Р 50571.16/МЭК 60364-6:2016 Электроустановки низковольтные. Часть 6. Испытания

ГОСТ Р 53735.5 (МЭК 60099-5:2000) Разрядники вентильные и ограничители перенапряжений нелинейные для электроустановок переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Часть 5. Рекомендации по выбору и применению

ГОСТ Р 54418.1 (МЭК 61400-1:2019) Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 1. Технические требования

ГОСТ Р 54418.23 (МЭК 61400-23:2014) Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 23. Полномасштабные испытания лопастей ротора на прочность

ГОСТ Р 55630/IEC/TR 62066:2002 Перенапряжения импульсные и защита от перенапряжений в низковольтных системах переменного тока. Общие положения

ГОСТ Р 59789—2021 (МЭК 62305-3:2010) Молниезащита. Часть 3. Защита зданий и сооружений от повреждений и защита людей и животных от электротравматизма

ГОСТ Р МЭК 60204-1 Электрооборудование машин и механизмов. Часть 1. Общие требования

ГОСТ Р МЭК 60664.1 Координация изоляции для оборудования в низковольтных системах. Часть 1. Принципы, требования и испытания

ГОСТ Р МЭК 61587-3 Конструкции несущие базовые радиоэлектронных средств. Испытания для МЭК 60917 и МЭК 60297. Часть 3. Испытания шкафов, стоек и блочных каркасов на экранирование от электромагнитного излучения

ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010 Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1. Общие принципы

ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010 Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 2. Оценка риска

ГОСТ Р МЭК 62305-4—2016 Защита от молнии. Часть 4. Защита электрических и электронных систем внутри зданий и сооружений

ГОСТ Р МЭК 62561.1 Компоненты систем молниезащиты. Часть 1. Требования к соединительным компонентам

ГОСТ Р МЭК 62561.6 Компоненты системы молниезащиты. Часть 6. Требования к счетчикам ударов молнии

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

рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по *ГОСТ Р МЭК 62305-1, ГОСТ Р МЭК 62305-2, ГОСТ Р 59789, ГОСТ Р МЭК 62305-4, ГОСТ Р 54418.1,* а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **разряд молнии в землю** (lightning flash to earth): Электрический атмосферный разряд между небом и землей, состоящий из одного или нескольких ударов.

3.2 **нисходящий разряд** (downward flash): Электрический разряд (молнии) от грозовых облаков к земле, начинающийся нисходящим лидером.

Примечание — Нисходящий разряд состоит из первого импульса, который может сопровождаться последующими импульсами. Один или несколько импульсов могут сопровождаться длительным ударом молнии.

3.3 **восходящий разряд** (upward flash): Электрический разряд (молнии) от земли к грозовым облакам, начинающийся восходящим лидером.

Примечание — Восходящий разряд состоит из первого длительного удара, который может сопровождаться или не сопровождаться множественными последующими импульсами. Один или несколько импульсов могут сопровождаться длительным ударом.

3.4 **встречный лидер** (connecting leader): Лидер молнии, исходящий от конструкции вследствие реакции на внешнее электрическое поле, создаваемое либо находящимся сверху грозовым облаком, либо нисходящим лидером, приближающимся к конструкции.

3.5 **точка контакта лидеров** (leader connection point): Точка в воздушном зазоре между объектом испытаний и высоковольтным электродом, где встречаются положительный и отрицательный лидеры и образуется разряд.

3.6 **удар молнии** (lightning stroke): Единичный электрический разряд молнии между облаком и землей.

3.7 **короткий удар (молнии)** (short stroke): Часть молнии, представляющая собой краткий импульс тока.

Примечание — Короткий удар продолжается в течение времени T_2 (обычно менее 2 мс), при котором значение силы тока снижается до уровня вдвое меньше пикового значения (см. рисунок *В.1*).

3.8 **длительный удар (молнии)** (long stroke): Часть молнии, представляющая собой продолжительный импульс тока.

Примечание — Период времени T_{long}, в течение которого сила тока превышает 10 % пикового значения I, обычно составляющий от 2 мс до 1 с (см. рисунок *В.2*).

3.9 **многократный удар (молнии)** (multiple strokes): Молния, состоящая в среднем из трех-четырех ударов, обычно с интервалом времени между ними, приблизительно равным 50 мс.

Примечание — Часто многократный удар молнии представляет собой несколько десятков ударов с интервалами между ними от 10 до 250 мс.

3.10 **точка поражения (молнией)** (point of strike): Место на поверхности земли или выступающий объект (например, ВЭУ, система молниезащиты, линии коммуникаций, дерево и т. п.), в которые ударяет молния.

Примечание — Удар молнии может иметь несколько точек поражения.

3.11 **электромагнитный импульс молнии** (lightning electromagnetic impulse, LEMP): Электромагнитное воздействие тока молнии, вызывающее вследствие резистивных, индуктивных и емкостных связей скачок (нарастание) тока, напряжения и напряженности электрического, магнитного и электромагнитного полей.

3.12 **ток молнии *i*** (lightning current): Электрический ток в точке поражения молнией.

3.13 **пиковое значение тока молнии *I*** (current peak value): Максимальное значение силы тока молнии.

Примечание — См. рисунок *В.1*.

3.14 **длительность фронта импульса [тока молнии]** T_1 (front time of impulse current): Параметр, равный времени, в течение которого сила тока молнии возрастает от 10 % до 90 % пикового тока молнии, умноженного на 1,25.

Примечания

1 См. рисунок *B.1*.

2 Данный параметр также называют временем нарастания импульса.

3.15 **средняя крутизна** (average steepness): Пиковое значение тока импульса *I*, деленное на длительность фронта импульса тока T_1.

Примечание — См. рисунок *B.1*.

3.16 **заряд молнии** Q_{flash} (flash charge): Электрический заряд, равный интегралу от функции тока молнии по всей продолжительности удара молнии.

3.17 **удельная энергия** ***W/R*** (specific energy): Энергия, равная интегралу квадрата силы тока молнии по всей продолжительности удара молнии.

Примечание — Удельная энергия представляет собой энергию, выделяемую током молнии на единицу сопротивления.

3.18 **линия коммуникаций ВЭУ** (line): Линия электропередачи или телекоммуникационная линия, подведенная к ВЭУ.

3.19 **высокое напряжение** (high voltage): Напряжение выше 1,0 кВ переменного тока или 1,5 кВ постоянного тока.

3.20 **импульсное перенапряжение** (surge): Резкий подъем напряжения, вызванный электромагнитным импульсом удара молнии и проявляющийся в виде повышения электрического напряжения или тока до значений, представляющих опасность для изоляции или потребителя.

3.21 **система молниезащиты;** СМЗ (lightning protection system, LPS): Комплексная система защиты от молнии, предназначенная для уменьшения физических повреждений объекта при ударе в него молнии.

Примечания

1 СМЗ состоит из внешних и внутренних систем защиты от молнии.

2 В отечественной практике, когда речь идет о системах молниезащиты, также используют английское сокращение LPS.

3.22 **внешняя система молниезащиты** (external lightning protection system): Система молниезащиты, защищающая от прямых ударов молнии и состоящая из молниеприемников, токоотводов и заземлителей.

3.23 **внутренняя система молниезащиты** (internal lightning protection system): Система молниезащиты, предназначенная для ограничения электромагнитных воздействий тока молнии и предотвращения искрений внутри защищаемого объекта и состоящая из системы уравнивания потенциалов и средств электрической изоляции между защищаемым объектом и внешней системой молниезащиты, а также средств заземления, экранирования.

Примечание — Соблюдение разделительного расстояния и уменьшение электромагнитного воздействия тока молнии в конструкции, которую необходимо защитить, могут рассматриваться как части внутренней системы молниезащиты.

3.24 **система молниеприемников** (air termination system): Часть внешней системы молниезащиты, в которой используют металлические элементы, такие как пруты, арматурную сетку, токоотводы или вертикальные тросы, предназначенные для перехвата молний.

3.25 **система токоотводов** (down-conductor system): Часть внешней системы молниезащиты, которая предназначена для отведения тока молнии из молниеприемников в систему заземления.

3.26 **система заземления** (earth-termination system): Часть внешней системы молниезащиты, предназначенная для отведения тока молнии и рассеивания его в земле.

3.27 **уравнивание потенциалов (молниезащиты)** (lightning equipotential bonding, EB): Соединение с системой молниезащиты металлических элементов защищаемого объекта непосредственно или через устройства защиты от импульсных перенапряжений, предназначенное для снижения разности электрических потенциалов, возникающей под воздействием молнии.

3.28 **меры защиты от электромагнитных импульсных воздействий молнии;** меры защиты SPM (LEMP protection measures, SPM): Меры, предпринимаемые для защиты внутренних систем от воздействий электромагнитного импульса молнии.

Примечание — Меры защиты SPM являются частью общей системы молниезащиты.

3.29 **система защиты от импульсных перенапряжений** (coordinated SPD system): Набор устройств защиты от импульсных перенапряжений, выбранных, согласованных и установленных таким образом, что они образуют систему защиты, обеспечивающую уменьшение числа повреждений электрических и электронных систем.

3.30 **приемник** (receptor): Тип воздушного перехвата ударов молнии на лопастях ВЭУ, например разобщенные стойки из тонкостенных профилей, проходящие через поверхность лопасти, подсоединенную к системе вертикальных молниеотводов.

3.31 **естественный компонент системы молниезащиты** (natural component of LPS): Проводящий элемент, установленный не для целей молниезащиты, но который может быть использован в дополнение к системе молниезащиты или в определенных случаях может выполнять функцию одной или нескольких частей системы молниезащиты.

Примечание — К естественным компонентам СМЗ относятся:
- естественные молниеприемники;
- естественные токоотводы;
- естественные заземляющие электроды.

3.32 **заземляющий электрод** (earth electrode): Проводящая часть, которая может быть погружена в землю или в специальную проводящую среду, например бетон или уголь, и находящаяся в электрическом контакте с землей.

Примечание — Вместо «заземляющий электрод» также используют «заземлитель».

3.33 **фундаментный заземляющий электрод** (foundation earth electrode): Проводящая часть, как правило, в виде замкнутого контура, погруженная в грунт под фундаментом здания/сооружения или, предпочтительно, замоноличенная в бетон фундамента здания/сооружения.

3.34 **шина уравнивания потенциалов** (bonding bar): Металлическая шина, с помощью которой металлические конструкции, внешние проводящие части, линии связи, электрические и другие кабели могут быть соединены с системой молниезащиты.

3.35 **устройство защиты от импульсных перенапряжений;** УЗИП (surge protective device, SPD): Устройство, предназначенное для ограничения перенапряжения и скачков напряжения, содержащее по крайней мере один нелинейный компонент.

3.36 **металлические конструкции** (metal installations): Протяженные металлические части объекта, которые могут формировать путь протеканию тока молнии, такие как основание гондолы, трубы, лестницы, направляющие рельсы лифтов, платформы, взаимосвязанные части стальной арматуры, металлические элементы каркаса и пр.

3.37 **магнитный экран** (magnetic shield): Закрытый, металлический, подобный сетке или сплошной щит, укрывающий защищаемый объект или его часть, предназначенный для сокращения количества отказов электрических и электронных систем.

Примечание — Защитное действие магнитного защитного экрана обеспечивается благодаря ослаблению магнитного поля.

3.38 **уровень молниезащиты;** УМЗ (lightning protection level, LPL): Число, соответствующее набору максимальных значений параметров тока молнии, на которые рассчитана система молниезащиты, и значению вероятности того, что взаимосвязанные максимальные и минимальные значения параметров конструкции не будут превышены при воздействии молнии.

Примечание — В отечественной практике, когда речь идет об уровнях молниезащиты, также используют английское сокращение LPL.

3.39 **зона молниезащиты;** ЗМЗ (lightning protection zone, LPZ): Зона, для которой установлены параметры электромагнитной среды при ударе молнии.

Примечания

1 Границы зоны молниезащиты не обязательно являются физическими границами (например, стены, пол и потолок).

2 В отечественной практике, когда речь идет о зонах молниезащиты, также используют английское сокращение LPZ.

3.40 **разделительное расстояние** (separation distance): Расстояние между двумя проводящими элементами, при котором не может происходить опасное искрение.

3.41 **эффективная высота *H*** (height): Высшая точка ВЭУ, до которой доходят лопасти, т. е. это высота ступицы плюс радиус ветроколеса.

3.42 **уровень напряжения защиты U_P** (voltage protection level): Максимальное напряжение на зажимах устройства защиты от импульсного перенапряжения с определенной крутизной напряжения, а также импульсное напряжение с током разряда с указанной амплитудой и формой волны; параметр, характеризующий УЗИП в части ограничения напряжения на его выводах, величина которого выбрана из числа предпочтительных значений (значение должно быть выше наибольшего из измеренных ограниченных напряжений).

Примечание — Уровень напряжения защиты указывается изготовителем и не может превышать:

- измеренное предельное напряжение, которое определено для пробоя на переднем фронте импульса (если применимо) и измеренного предельного напряжения, которое определено на основе измерений остаточного напряжения при амплитудах до I_n;
- измеренное предельное напряжение, которое определено для комбинированных измерений волн вплоть до $U_{x.x}$ для класса испытаний III.

3.43 **эффективность молниезащиты** (efficiency of a LPS): Наблюдаемое статистическое количество правильно перехваченных ударов молнии (т. е. эффективность перехвата) и безопасно уведенных в сторону земли, деленное на общее наблюдаемое количество ударов в ВЭУ/лопасти (в полевых условиях).

3.44 **результативность молниезащиты** (effectiveness of a LPS): Наблюдаемое статистическое количество успешных лабораторных испытаний, деленное на общее количество лабораторных испытаний.

3.45 **эффективность перехвата** (interception efficiency): Вероятность, с которой молниеприемники системы молниезащиты перехватывают удар молнии.

3.46 **риск *R*** (risk): Отношение вероятных средних ежегодных потерь людей и продукции, возникающих из-за воздействия молнии, к общему количеству людей и продукции, находящихся в защищаемом объекте.

3.47 **приемлемый риск R_T** (tolerable risk): Максимальное допустимое значение риска для защищаемого объекта.

3.48 **личное безопасное расстояние** (personal safety distance): Расстояние разделения, определенное как минимальное, чтобы избежать неконтролируемых дуговых разрядов, для лиц в ВЭУ.

Примечание — Определение расстояния разделения — по *ГОСТ Р 59789*.

4 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

A_D	—	площадь области защиты от ударов молнии в здание/сооружение, для стандарта — в ВЭУ;
A_{Deff}	—	эффективная площадь области защиты от ударов молнии в отдельно стоящую ВЭУ с использованием эффективной высоты;
A_{DWF}	—	площадь области защиты от ударов молнии в ВЭС;
A_I	—	площадь области защиты при ударе молнии вблизи линии коммуникаций;
A_L	—	площадь области защиты при ударе молнии в линии коммуникаций;
A_M	—	площадь области защиты при ударе молнии вблизи здания/сооружения, для стандарта — вблизи ВЭУ;
C	—	средняя величина потерь;

C_D — коэффициент размещения;

C_{DWL} — коэффициент, учитывающий грозовую активность зимой;

C_{DC} — коэффициент, сложность рельефа местности;

C_{DH} — коэффициент, учитывающий высоту над уровнем моря;

C_E — коэффициент окружающей среды;

C_s — скрытая теплота плавления;

C_t — общая стоимость ВЭУ;

C_T — поправочный коэффициент для высоковольтного/низковольтного трансформатора, находящегося на линии коммуникаций;

C_w — теплоемкость;

D_{1D} — поражение электрическим током живых существ в результате прямого попадания в них молнии;

D_{1T} — поражение электрическим током живых существ в результате резистивной и емкостной связи;

D_2 — опасное искрение, вызывающее пожар или взрыв и/или приводящее к механическим или химическим воздействиям, которые также могут представлять опасность для окружающей среды;

D_3 — импульсные перенапряжения за счет всех источников повреждений;

$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ — средняя крутизна импульса тока молнии;

$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t_{30\ \%/90\ \%}$ — крутизна импульса тока молнии между точками, соответствующими 30 % и 90 % пикового значения тока молнии;

H — высота ВЭУ;

H_{eff} — высота ВЭУ с учетом изменений местного рельефа;

H_z — коэффициент увеличения потерь при наличии специальных опасностей;

i — ток молнии;

I — пиковый ток молнии;

I_n — номинальный испытательный ток, ток разряда;

I_t — ток в защитном экране кабеля;

I_{imp} — импульсный испытательный ток;

L_{AD} — ущерб, связанный с поражением электрическим током живых существ в результате прямого удара молнии (удары молнии в ВЭУ);

L_{AT} — ущерб, связанный с поражением электрическим током живых существ в результате резистивной и индуктивной связи (удары молнии в ВЭУ);

L_B — ущерб конструкции, связанный с физическим повреждением (удары молнии в ВЭУ);

L_C — ущерб, связанный с повреждением внутренних систем (удары молнии в ВЭУ);

L_D — стандартное среднее число людей, травмированных прямым ударом молнии, по отношению к общему числу людей, подвергавшихся опасности за счет нахождения в опасной зоне;

L_{F1} — стандартное среднее число людей, травмированных при пожаре или взрыве, по отношению к общему числу лиц в зоне в ходе одиночного опасного события;

L_{F2} — стандартное среднее отношение физического ущерба социальной значимости в результате пожара или взрыва по отношению к максимальному ущербу социальной значимости в зоне за счет одиночного опасного события;

L_f — ущерб из-за травм, связанных с напряжением прикосновения и шагового напряжения;

L_M — ущерб, связанный с повреждением внутренних систем (удары молнии вблизи ВЭУ);

L_O — стандартное среднее число людей, травмированных за счет повреждения внутренних систем, по отношению к общему числу лиц в зоне опасного явления в ходе одиночного события;

L_T — стандартное среднее число людей, травмированных из-за опасного уровня напряжения прикосновения и шагового напряжения, по отношению к общему числу лиц в зоне в ходе одиночного опасного явления;

L_{UT} — ущерб, связанный с травмированием живых существ в результате резистивной и индуктивной связи (удары молнии в линию коммуникаций);

L_V — ущерб, связанный с физическим повреждением конструкции (удары молнии в линию коммуникаций);

L_W — ущерб, связанный с повреждением внутренних систем (удары молнии в линию коммуникаций);

L_X — ущерб вследствие повреждений;

L_Z — ущерб, связанный с повреждением внутренних систем (удары молнии вблизи линии коммуникаций);

L_1 — травмирование живых существ;

L_2 — физические повреждения ВЭУ и ее внутренних элементов;

L_3 — повреждение электрических и электронных систем;

N_D — число опасных событий вследствие ударов молний в ВЭУ в год;

N_X — число опасных событий в год;

N_d — число опасных событий вследствие ударов молнии в ВЭУ;

N_M — число опасных событий вследствие ударов молнии вблизи ВЭУ;

N_L — число опасных событий в результате ударов молнии вблизи линии коммуникаций;

N_I — число опасных событий вследствие ударов молнии в линию коммуникаций;

$N_{d,x}$ — количество ударов молнии, попавших в ВЭУ в конце «x» линии, в год;

N_G — среднегодовая частота ударов молнии в землю;

$N_{G\ LLS}$ — частота ударов молнии, уходящих в землю, полученная от системы обнаружения молний;

$N_{G\ corrected}$ — скорректированная частота ударов молнии в землю, полученная от системы обнаружения молний;

N_{SG} — годовая плотность точек удара молнии в землю;

N_t — общая (в землю CG + в облако IC) плотность оптических ударов молнии в год;

P_{AT} — вероятность того, что удар молнии в ВЭУ вызовет опасное напряжение прикосновения и опасное шаговое напряжение;

P_{AD} — вероятность того, что удар молнии в ВЭУ вызовет поражение людей электрическим током;

P_B — вероятность физического повреждения ВЭУ при ударе молнии в ВЭУ;

P_C — вероятность повреждения внутренних систем при ударе молнии в ВЭУ;

P_{LD} — вероятность того, что удар молнии в линию коммуникаций, соединенную с ВЭУ, вызовет повреждение внутренних систем;

P_{LI} — вероятность того, что удар молнии вблизи линии коммуникаций вызовет повреждение внутренних систем;

P_M — вероятность повреждения внутренних систем при ударе молнии вблизи ВЭУ;

P_{SPD} — вероятность повреждения ВЭУ, несмотря на наличие системы защиты от импульсных перенапряжений;

P_U — вероятность поражения электрическим током живых существ при ударе молнии в линию коммуникаций, соединенную с ВЭУ;

P_V — вероятность физического повреждения ВЭУ и повреждения внутренних систем при ударе молнии в линию коммуникаций, соединенную с ВЭУ;

P_W — вероятность повреждения внутренних систем при ударе молнии в линию коммуникаций, соединенную с ВЭУ;

P_X — вероятность повреждения;

P_Z — вероятность повреждения внутренних систем (при ударе молнии вблизи линии коммуникаций);

r_t — коэффициент снижения ущерба вследствие типа поверхностного грунта;

r_f — коэффициент снижения ущерба вследствие физического повреждения в зависимости от риска возникновения пожара;

r_p — коэффициент снижения ущерба вследствие физического повреждения в зависимости от принимаемых мер предосторожности;

R — риск;

r — радиус катящейся сферы;

R_S — сопротивление защитного экрана кабеля на единицу длины;

R_T — приемлемый риск;

R_X — компонент риска для ВЭУ;

S — расстояние между заземляющими электродами;

T_p — время в часах за год, в течение которого люди находятся в опасном месте;

t или T — время;

Δt — временной интервал;

T_X — временной параметр;

t_{long} — продолжительность длительного удара молнии;

u_a, u_c — падение напряжения на аноде или катоде;

U_C — напряжение между защитным экраном кабеля и проводниками;

U_W — номинальное выдерживаемое импульсное напряжение (защищаемого оборудования);

U_P — уровень напряжения защиты;

Q — заряд тока молнии;

Q_{flash} — заряд тока молнии;

Q_{short} — заряд тока короткого удара молнии;

Q_{long} — заряд тока длительного удара молнии;

V_{ave} — среднегодовое значение скорости ветра на высоте оси ветроколеса, м/с;

W/R — удельная энергия;

Z_T — полное переходное сопротивление;

α — температурный коэффициент сопротивления (1/K);

γ — плотность материала;

μ_0 — воздухопроницаемость (вакуум);

Φ — магнитный поток;

ρ — сопротивление;

ρ_0 — удельное омическое сопротивление при температуре окружающей среды;

Θ — температура;

Θ_0 — начальная температура;

Θ_s — температура плавления;

Θ_u — температура окружающей среды.

5 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

CFRP — пластик, армированный углеродным волокном (углепластик);

CG — молния между облаком и землей;

DE — эффективность обнаружения;

GFRP — пластик, армированный стекловолокном (стеклопластик);

IC — внутриоблачная молния;

LLS — система обнаружения молний;

НАСА — Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства. Федеральное ведомство правительства США;

SEMP — коммутационный электромагнитный импульс;

SCADA — тип пакетов прикладных программ, предназначенных для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления (Supervisory Control And Data Acquisition — диспетчерское управление и сбор данных).

6 Воздействие молнии на ВЭУ

6.1 Общие положения

Воздействие молнии на ВЭУ в зависимости от значений параметров тока молнии определяют в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 62305-1*.

Описание такого явления, как молния, по отношению к ВЭУ приведено в приложении В.

6.2 Параметры тока молнии и уровни молниезащиты

Для расчета, анализа и испытаний СМЗ ВЭУ используют параметры тока молнии, установленные в *ГОСТ Р МЭК 62305-1*.

В соответствии с *ГОСТ Р МЭК 62305-1* установлено четыре уровня молниезащиты (УМЗ) ВЭУ. Для каждого уровня УМЗ установлен набор минимальных и максимальных значений параметров тока молнии.

Максимальные значения параметров молнии при уровне молниезащиты УМЗ I не будут превышены с вероятностью 99 %. Максимальные значения параметров молнии для уровня УМЗ II снижены на 25 % относительно значений, соответствующих УМЗ I, и на 50 % для уровней УМЗ III и IV (линейное соотношение для *I, Q* и d*i*/d*t* и квадратичное для *W/R*). Временные параметры одинаковы для всех уровней защиты.

Максимальные значения параметров молнии, выдерживаемые ВЭУ при различных уровнях молниезащиты, приведены в таблице 1. Эти параметры используют для проектирования элементов молниезащиты (например, выбора поперечного сечения молниеотводов, толщины металлических пластин, допустимой токовой нагрузки УЗИП, промежутков для предотвращения опасного искрения), а также для определения параметров испытаний, моделирующих воздействие молнии на такие элементы (см. приложение *С* и *ГОСТ Р МЭК 62305-1*).

Для ВЭУ, установленных в районах с большим количеством восходящих молний, в частности в зимний период, может быть необходимо повышение прочности воздушных систем перехвата молнии (например, приемников) относительно электрического заряда при разряде до уровня молниезащиты выше уровня I, Q_{flash} = 300 Кл. Данный параметр определяет износ (плавление) материалов и, следовательно, влияет на необходимость проведения техобслуживания воздушных систем перехвата молнии,

искровых зазоров и т. п. (т. е. компонентов, подверженных эрозии из-за образования дуги). В местностях, подверженных образованию молний в зимний период, уровни электрического заряда могут достигать Q_{flash} = 600 Кл за счет восходящих молний в зимний период. Кроме того, следует учитывать воздействие и количество нештатных ситуаций перед тем, как потребуется проводить техобслуживание (см. дополнительную информацию в разделе 7 и приложении *D*. В таблице *C*.2 приведены параметры испытаний для молний в зимний период).

Параметры тока молнии, указанные в таблице 1, относятся как к ВЭУ, размещаемым на суше, так и к ВЭУ, размещаемым в море.

Таблица 1 — Максимальные значения параметров тока молнии для различных уровней молниезащиты (*ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010, таблица 3*)

Параметры	Обозначение	Единица измерения	Уровень молниезащиты (УМЗ)			
			I	II	III	IV
Первый положительный короткий удар молнии						
Пиковый ток	I	кА	200	150	100	
Электрический заряд	Q_{short}	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			
Первый отрицательный короткий удар молнии[1)]						
Пиковый ток	I	кА	100	75	50	
Средняя скорость нарастания тока	di/dt	кА/мкс	100	75	50	
Параметры времени	T_1/T_2	мкс/мкс	1/200			
Последующий короткий удар молнии						
Пиковый ток	I	кА	50	37,5	25	
Средняя скорость нарастания тока	di/dt	кА/мкс	200	150	100	
Параметры времени	T_1/T_2	мкс/мкс	0,25/100			
Длительный удар молнии						
Электрический заряд	Q_{long}	Кл	200	150	100	
Параметры времени	T_{long}	с	0,5			
Разряд						
Электрический заряд	Q_{flash}	Кл	300	225	150	
[1)] Эти данные предназначены только для расчетов и не могут быть применены при испытаниях.						

Примечания

1 Защита от молний, у которых максимальные и минимальные значения параметров превышают значения для УМЗ I, требует применения более эффективных мер, которые можно выбрать по отдельности, но всегда согласно настоящему стандарту (в соответствии с указаниями по проектированию и испытаниям).

2 Информация по восходящим разрядам молнии приведена в *[2].*

3 Статистическая основа для Q_{flash} = 600 Кл, представляющей 99 процентиль электрического заряда в восходящей зимней молнии, приведена в *[3].*

Используя минимальные значения амплитуды тока молнии для разных уровней УМЗ, вычисляют радиус катящейся сферы для определения зоны молниезащиты ЗМЗ 0_B, которая не подвергается касанию молнии. Минимальные значения параметров тока молнии вместе с соответствующим радиусом катящейся сферы приведены в таблице 2. Их используют для размещения воздушной системы перехвата ударов молнии, а также для определения ЗМЗ 0_B.

Таблица 2 — Минимальные значения параметров молнии и радиуса катящейся сферы в зависимости от уровня молниезащиты (*ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010, таблица 4*)

Критерии перехвата			Уровень молниезащиты (УМЗ)			
Параметр	Обозначение	Единица измерения	I	II	III	IV
Пиковый ток	*I*	кА	3	5	10	16
Радиус катящейся сферы	*r*	м	20	30	45	60

7 Оценка воздействия молнии

7.1 Общие положения

Оценка воздействия молнии используется для определения:

1) уровня молниезащиты, необходимого для конкретного воздействия, определяющего максимальные расчетные требования и уровни испытаний при проведении проверочных испытаний, указанных в приложении *C*;

2) годовой частоты молний, используемой для определения срока службы изнашивающихся компонентов и подсистем. Предполагаемое воздействие (частота и жесткость) должно быть согласовано с интервалами проверок, техобслуживания и замен.

Если по умолчанию для расчетов выбран уровень УМЗ I, оценка риска воздействия молнии не должна включать эту часть раздела 7. В этом случае следует проводить и документировать только оценку годового воздействия для ВЭУ и площадки, а также риск травмирования живых существ. Указания по классификации ущерба от молний на основе менеджмента риска приведены в приложении *E*.

Для ВЭУ необходимо использовать молниезащиту как меру защиты от экономических убытков вследствие повреждения, от опасности для живых существ (главным образом обслуживающего персонала) и как средство уменьшения объема необходимого техобслуживания.

При проектировании СМЗ следует учитывать опасность ударов молнии и повреждения конструкции, для которой разрабатывается молниезащита. Повреждение молнией незащищенной ВЭУ может затронуть лопасти, механические детали, а также электросистемы и системы управления. Кроме того, люди, находящиеся на ВЭУ или рядом с ней, подвергаются опасности от шагового напряжения/напряжения прикосновения или взрывов и пожаров вследствие удара молнии.

Задача СМЗ — уменьшить опасность до приемлемого уровня R_T. Приемлемый уровень основывается на допустимом риске, если учитывается безопасность человека. Если риск ниже уровня, допустимого для человека, тогда необходимость в дальнейшей защите может исходить только из экономического анализа, который проводят путем оценки стоимости СМЗ по сравнению со стоимостью устранения повреждения, которое она будет предотвращать.

Уполномоченные органы должны определить значение приемлемого риска. Репрезентативное значение приемлемого риска R_T, когда удары молнии могут создать риск утраты человеческой жизни или приобретения хронических заболеваний, составляет 10^{-5} год$^{-1}$.

Примечание — Значения приемлемого риска приведены в *ГОСТ Р МЭК 62305-2*.

Риск касания ударов молнии каких-либо конструкций зависит от высоты конструкции, рельефа местности и местного уровня активности молний. Риски, связанные с молниями, можно детально оценить по *ГОСТ Р МЭК 62305-2*.

Оценка частоты возникновения молний в 7.2 соответствует *ГОСТ Р МЭК 62305-2*.

Прогнозирование риска попадания молний предусматривает оценку ударов молнии в ВЭУ или вблизи нее, а также и вблизи соединенных с ней линий коммуникаций. Количество попаданий ударов молнии в ВЭУ в составе ВЭС сложно прогнозировать из-за сильного влияния местного рельефа вместе с местной активностью молний. А кроме того, ВЭУ испытывают нисходящие и восходящие разряды молний в различных пропорциях в различных местах размещения. Методология, используемая для оценки общего количества ударов молний, попадающих в ВЭУ в составе ВЭС, а также процентное отношение восходящих молний описаны в *D*.2.

Информация о местных грозовых условиях должна быть собрана для всех площадок предполагаемого размещения ВЭУ (например, в высоких широтах, где зимняя молния может представлять особую угрозу).

Примечание — Информацию по возникновению молний зимой в мире см. в приложении *D*.

Оценка риска зависит от точности анализируемых данных. Точность оценки будет такой же или менее, чем точность использованных данных. Оценка риска является вероятностной характеристикой, данные о возникновении молнии являются статистическими средними значениями, а само возникновение молнии является случайным по своему характеру. Поэтому не следует ожидать, что краткосрочный прогноз количества случаев воздействия молнии на отдельные ВЭУ или ВЭС будет очень точным. Оценка риска дает возможность определить уровень снижения риска при использовании молниезащиты и позволяет сравнить риски для различных проектов ВЭУ (см. приложение *D*).

7.2 Оценка влияния числа ударов молнии на ВЭУ или группу ВЭУ

7.2.1 Деление опасных событий, связанных с ударами молний, на категории

Среднегодовое число опасных событий, которые могут быть опасными для ВЭУ, можно подразделить на события:

N_D — из-за попадания удара молнии в ВЭУ, год$^{-1}$;

N_M — из-за удара молнии вблизи ВЭУ (в пределах 350 м), год$^{-1}$;

N_L — из-за попадания удара молнии в линии коммуникаций, соединенные с ВЭУ, год$^{-1}$;

N_I — из-за удара молнии вблизи линий коммуникаций, соединенных с ВЭУ, год$^{-1}$;

N_{DJ} — из-за удара молнии в соседние ВЭУ или другие соседние сооружения на дальнем конце линии коммуникаций, соединенной с защищаемой ВЭУ, год$^{-1}$.

7.2.2 Оценка среднего числа ударов молнии, попадающих в одиночную ВЭУ

7.2.2.1 Общие положения

Среднегодовое число ударов молнии в ВЭУ или группу ВЭУ определяют по формуле

$$N_D = N_{SG} \cdot A_D \cdot C_D \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где N_{SG} — плотность ударов молний в землю на 1 км^2 земной поверхности в год;

A_D — площадь области защиты от ударов молнии в ВЭУ, м^2 (расчет параметра — см. 7.2.2.3);

C_D — коэффициент размещения, характеризующий рельеф местности (расчет параметра — см. 7.2.2.4).

Примечание — На участках с отдельными высокими конструкциями рекомендуется оценивать N_D более точно.

Разряды молний с многочисленными точками ударов в землю удваивают число ударов молний в землю N_G (см. *[4]*), и поэтому:

$$N_{SG} = 2N_G, \quad (2)$$

где N_{SG} — плотность ударов молний в землю на 1 км^2 земной поверхности в год;

N_G — число ударов молний в землю на окружающей ВЭУ территории (локальное число ударов молнии в землю), км$^{-2}$ · год$^{-1}$ (расчет параметра — см. 7.2.2.2).

Примечание — Некоторые системы обнаружения молний могут прямо определять N_{SG}.

Следует учитывать, что для сложных условий окружающей среды могут возникать сильные погрешности прогнозирования из-за увеличения площади сбора ударов молнии или коэффициента размещения. Более подробно определение этих параметров для оценки среднего числа ударов молнии описано в *D*.2.

7.2.2.2 Среднегодовое число ударов молнии в землю N_G в месте нахождения ВЭУ

Для районов, в которых нет наземных точек регистрации систем обнаружения молний, среднегодовое число ударов молнии в землю на окружающей ВЭУ территории рекомендуется определять как для регионов с умеренным климатом по формуле

$$N_G = 0{,}25N_t, \quad (3)$$

где N_t — общее число (в землю CG + в облако IC) оптических ударов молнии на 1 км^2 земной поверхности в год, по данным НАСА *[5]*.

Примечания

1 Очень высокие одиночно стоящие конструкции могут изменить число ударов молний в землю поблизости. В этом случае при разработке СМЗ рекомендуется дополнительно изучить данные систем обнаружения молний.

2 В большинстве районов мира показатель интенсивности грозовой деятельности может быть получен по наблюдениям оптического излучения разрядов молний. Датчики, установленные на спутниках, реагируют на все типы молний с относительно одинаковым покрытием всех регионов. В среднем данные по плотности, полученные по оптическому излучению, дают лучшую оценку плотности разрядов на землю, чем наблюдения за грозами, которые имеют широкие пределы соотношения между плотностью разрядов на землю и грозовыми часами или грозовыми днями. Существуют также региональные отличия в отношении числа разрядов молнии на землю CG к общему числу разрядов (CG в редакции: IC).

Локальное число ударов молнии в землю с более высокой точностью может быть получено по данным системы обнаружения молний (LLS). Когда требуется более высокая точность, следует скорректировать локальное число ударов в землю, используя формулу

$$N_{\text{G corrected}} = \frac{N_{G_{LLS}}}{DE}, \quad (4)$$

где $N_{\text{G corrected}}$ — скорректированное среднегодовое число ударов в землю с учетом эффективности системы обнаружения молний, км$^{-2}$ · год$^{-1}$;

$N_{G_{LLS}}$ — среднегодовое число ударов в землю или число, полученное от систем обнаружения молний, км$^{-2}$ · год$^{-1}$;

DE — эффективность обнаружения разряда или удара молнии на единицу системы обнаружения молний (например, на единицу сети LLS-Network) в интересующем регионе.

Примечания

1 Эффективность обнаружения восходящих молний, генерируемых от ВЭУ, стандартной системой обнаружения молний много ниже, чем нисходящих, поэтому значение плотности однокомпонентных или многокомпонентных разрядов молнии на землю не включает все восходящие разряды молний.

2 Значение эффективности обнаружения *DE*, используемое в расчетах, рекомендуется уточнить с поставщиком данных системы обнаружения молний. Для простой оценки и оценки с малой точностью этого параметра эффективность обнаружения принимают равной единице.

3 Дополнительные указания по использованию систем обнаружения молний для оценки числа ударов молний см. в *[4]*.

7.2.2.3 Площадь области защиты от ударов молнии в отдельно стоящую ВЭУ и группу ВЭУ A_D

Площадь области защиты от ударов молнии в отдельно стоящую ВЭУ — это прилегающая поверхность, ограниченная окружностью радиуса, равного расстоянию от оси конструкции до точки пересечения прямой линии, проходящей через верхнюю точку конструкции под наклоном 1:3, с поверхностью земли.

Рекомендуется представлять все ВЭУ в виде высокой башни высотой, равной высоте ступицы плюс один радиус ветроколеса. Данная рекомендация применима для ВЭУ с любым типом лопастей, включая лопасти, изготовленные из непроводящего материала, такого как стеклопластик.

На рисунке 1 показан пример определения области защиты от ударов молнии в ВЭУ, расположенной на равнинной местности. Это круг радиусом в 3 раза больше высоты установки.

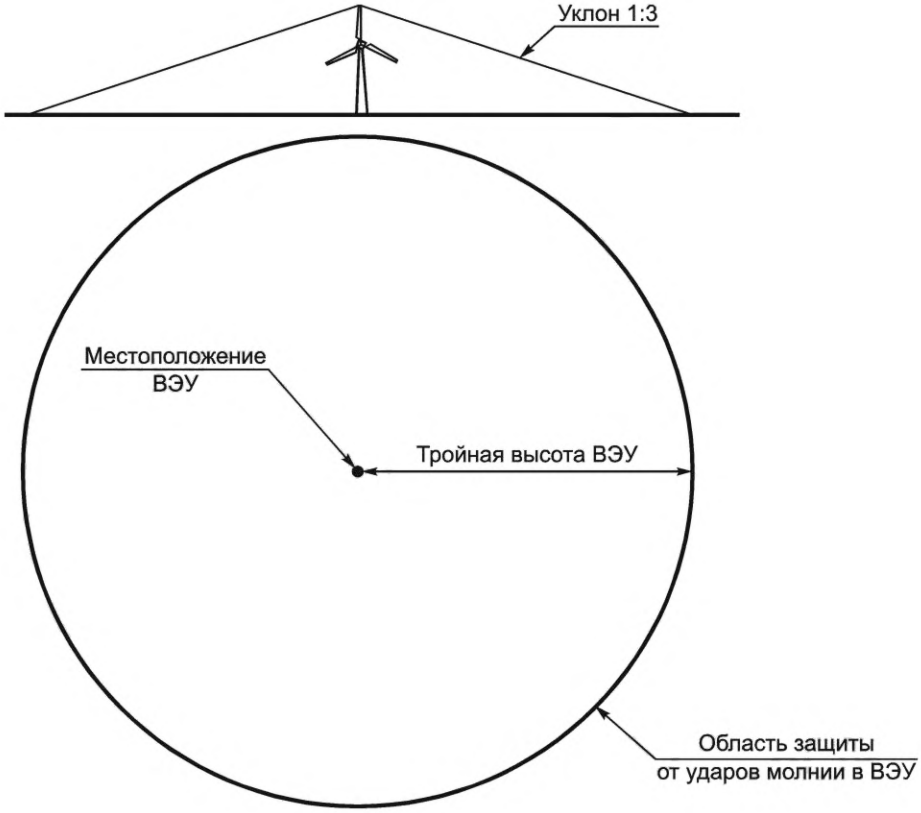


Рисунок 1 — Область защиты от ударов молнии в ВЭУ, расположенной в равнинной местности

Среднегодовое число ударов молнии в отдельно стоящую ВЭУ, расположенную на равнинной местности, при C_D = 1 рассчитывают по формуле

$$N_D = N_{SG} \cdot A_D \cdot C_D \cdot 10^{-6} = N_{SG} \cdot 9\pi \cdot H^2 \cdot 10^{-6}, \quad (5)$$

где H — высота ВЭУ, м.

При определении площади области защиты от ударов молнии всей ветровой электростанции A_{DWF} следует учитывать перекрытие площадей области защиты соседних ВЭУ. В этих случаях площади области защиты разделяют между ВЭУ в местах пересечения градиентных линий, проходящих из вершин установок под наклоном 1:3, без учета разницы высот окружающей местности. На рисунке 2 показан пример площади сбора ударов молнии ВЭС, состоящей из десяти ВЭУ.

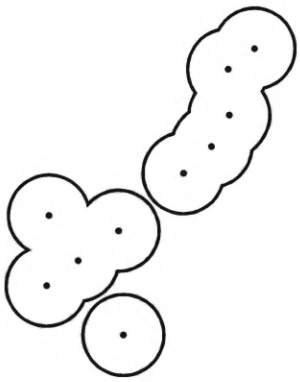


Рисунок 2 — Пример площади области защиты от ударов молнии в ВЭС (ADWF) с десятью ВЭУ (черные точки) с учетом перекрывания

7.2.2.4 Коэффициент размещения ВЭУ C_D

Расположение ВЭС может иметь большое влияние на среднегодовое число ударов молний в ВЭУ. Некоторые условия ведут к увеличению числа восходящих молний от ВЭУ или к увеличению числа нисходящих молний. Местная топография, например горный рельеф и высота над уровнем моря, может сильно влиять на интенсивность грозовой деятельности как во время теплого, так и холодного сезонов. Более того, при зимних грозах создаются условия, способствующие зарождению восходящих молний от высоких объектов. Для более точной оценки среднегодового числа ударов молнии в ВЭУ или группу ВЭУ N_D рекомендуется увеличить коэффициент размещения, чтобы учесть влияние местных погодных условий и топографии.

Три ранее описанных параметра (грозовая активность зимой, сложность рельефа и влияние высоты над уровнем моря) трудно оценить количественно, они могут сильно отличаться в зависимости от конкретного места размещения ВЭУ (дополнительную информацию см. в приложении *D*). Это связано с тем, что зимние грозы имеют различные характеристики при различном расположении: горная или холмистая местность может быть представлена множеством пиков и высот. В период зимних гроз могут также влиять высота месторасположения ВЭУ над уровнем моря и высота центра заряда облаков.

ВЭС, расположенные на побережье и в море, также могут увеличивать среднегодовое число ударов молнии в ВЭУ или группу ВЭУ (N_D), и это может привести к необходимости применения более высокого коэффициента размещения.

7.2.3 Оценка среднегодового числа ударов молнии вблизи ВЭУ

Среднегодовое число ударов молнии вблизи ВЭУ определяют по формуле

$$N_M = 0{,}5 \cdot N_{SG} \cdot A_M \cdot 10^{-6}, \quad (6)$$

где A_M — площадь области защиты от ударов молнии вблизи ВЭУ, м^2, включает территорию в границах 350 м от периметра конструкции. АМ определяют по формуле

$$A_M = 2 \cdot 350 \cdot (L + W) + 350^2\pi. \quad (6.1)$$

Надлежащая молниезащита ВЭУ и соединенных с ней линий коммуникаций также включает защиту от повреждений ВЭУ в результате ударов молнии вблизи ВЭУ и вблизи соединенных с ней линий коммуникаций.

Примечание — N_M можно не учитывать для ВЭУ с общей высотой более 100 м. В этом случае стандартное расстояние 350 м обычно охватывается прямыми ударами молний.

7.2.4 Оценка среднегодового числа ударов молнии в линии коммуникаций, соединенные с ВЭУ

Крупные ВЭУ обычно подсоединены к системе высоковольтных кабелей и также обычно подсоединены к внешнему центру управления через линию связи, на обе эти линии коммуникаций могут оказывать влияние удары молнии в линию или вблизи нее (см. рисунок 3). В случае, если линия связи является оптоволоконной линией (рекомендуется), риск ее повреждения молнией можно не учитывать.

Примечание — На ВЭС области защиты от ударов молнии соседних ВЭУ часто накладываются. В таких случаях площади области защиты могут быть просто поделены между ВЭУ, где пересекаются линии от верха ВЭУ с уклоном 1:3.

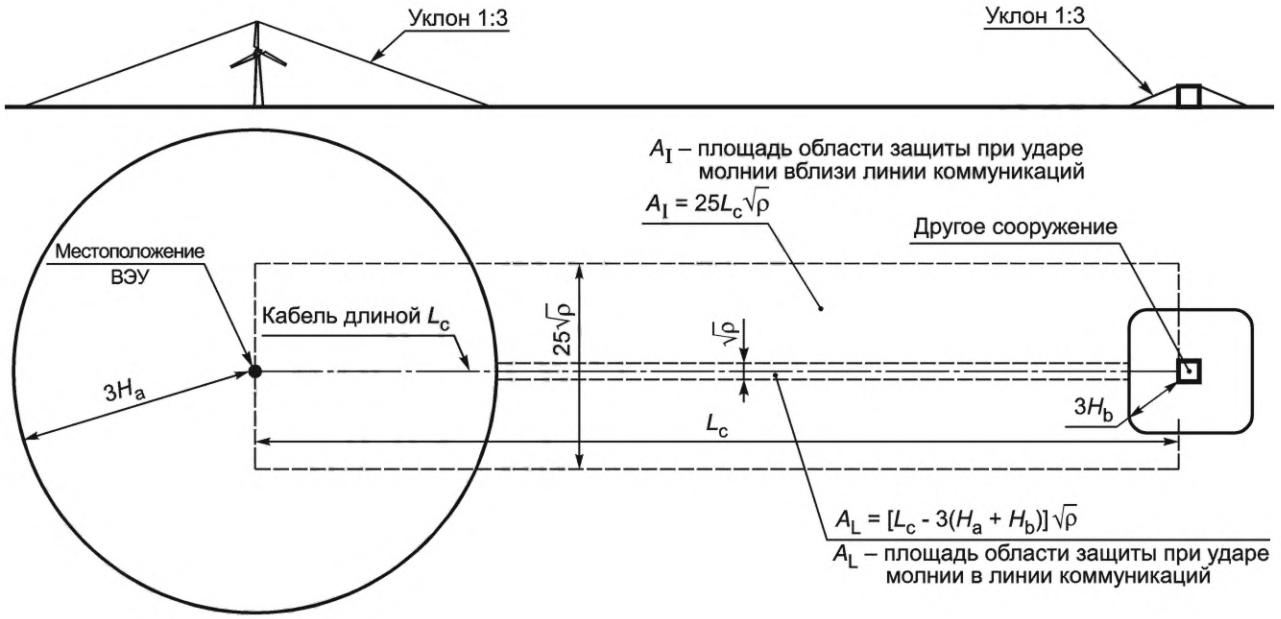


Рисунок 3 — Области защиты от ударов молнии ВЭУ высотой H_a и сооружения высотой H_b, соединенных между собой при помощи подземного кабеля

Количество ударов молнии в линию коммуникаций, соединенную с ВЭУ, определяют согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, приложение А*, по формуле

$$N_L = N_{SG} \cdot A_L \cdot C_I \cdot C_E \cdot C_T \cdot 10^{-6}, \quad (7)$$

где A_L — площадь области защиты от ударов молнии в линию коммуникаций, м^2 (см. рисунок 3 и таблицу 3);

C_I — монтажный коэффициент линии: 1 — для воздушной и 0,3 — для подземной (см. *ГОСТ Р МЭК 62305-2* для более дифференцированных значений C_I);

C_E — коэффициент окружающей среды, равный 1 для сельских районов;

C_T — трансформаторный коэффициент для типа линии.

Трансформаторный коэффициент C_T = 1, если между точкой касания молнии и ВЭУ нет трансформатора, и C_T = 0,2, если трансформатор имеется. Учитывая, что обычно высоковольтный трансформатор устанавливается на больших ВЭУ, для кабелей среднего напряжения, подсоединяющих ВЭУ к сети, допускается использовать C_T = 0,2 (см. *ГОСТ Р МЭК 62305-2*).

Примечание — N_L = 0 для подводных линий коммуникаций (подводные высоковольтные кабели и кабели связи).

Таблица 3 — Площади области защиты от ударов молнии A_L воздушной и A_I подземной линий коммуникаций

Параметр	Воздушная линия	Подземная линия
A_L	$6H_c\,(L_c - 3(H_a + H_b))$	$(L_c - 3(H_a + H_b))\sqrt{\rho}$
A_I	$1000L_c$	$25L_c\sqrt{\rho}$

Примечание — В таблице 3 использованы следующие обозначения:

L_c — длина линии коммуникаций от ВЭУ до следующей конструкции на линии. Следует допускать максимальное значение L_c = 1000 м;

H_a — высота ВЭУ, подсоединенной к концу «a» линии коммуникаций, м;

H_b — высота ВЭУ (или другого сооружения), подсоединенной к концу «b» линии коммуникаций, м;

H_c — высота расположения молниеотводов линии коммуникаций над землей, м;

ρ — стабильность проводящих свойств почвы, внутри которой проходит линия коммуникаций, Ом · м. Максимально допустимое значение ρ = 500 Ом · м.

7.2.5 Оценка среднегодового количества ударов молний вблизи линий коммуникаций, соединенных с ВЭУ

Количество ударов молний вблизи линий коммуникаций (т. е. достаточно близко для воздействия на линию) можно оценить следующим образом:

$$N_I = 0{,}5 \cdot N_{SG} \cdot A_I \cdot C_I \cdot C_E \cdot C_T \cdot 10^{-6}, \quad (8)$$

где N_I — количество перенапряжений амплитуды не ниже 1 кВ (1/год) на секции линии;

A_I — площадь области защиты от ударов молнии вблизи линий коммуникаций, м^2 (см. рисунок 3 и таблицу 3).

Трансформаторный коэффициент $C_T = 1$, если между точкой касания молнии и ВЭУ нет трансформатора, и $C_T = 0{,}2$, если трансформатор имеется. Учитывая, что обычно высоковольтный трансформатор устанавливается на больших ВЭУ, для кабелей промежуточного напряжения, подсоединяющих ВЭУ к сети, можно использовать $C_T = 0{,}2$ (см. *ГОСТ Р МЭК 62305-2*).

7.3 Оценка риска повреждения

7.3.1 Базовое уравнение

Риск повреждения ВЭУ молнией и соответствующие финансовые потери определяют как сумму всех компонентов риска повреждений, связанных с разными источниками повреждений (разными типами ударов молнии в ВЭУ). Каждый компонент риска определяют с помощью следующего общего уравнения:

$$R_X = N_X \cdot P_X \cdot L_X, \quad (9)$$

где R_X — компонент риска, связанный с повреждением данного типа (типом повреждений X), для ВЭУ;

N_X — количество опасных событий в год, которые могут привести к повреждению данного типа, год$^{-1}$;

P_X — вероятность повреждений данного типа (функция различных мер защиты);

L_X — величина косвенного убытка при повреждении данного типа.

Более подробно об определении отдельных компонентов риска и оценке воздействия молнии см. приложение *D*.

Молниезащита необходима, если риск R выше допустимого уровня R_T.

$$R > R_T \quad (10)$$

В этом случае должны быть приняты меры защиты, чтобы снизить риск R до уровня, не превышающего R_T.

Примечания

1 Значение R_T может быть установлено изготовителем ВЭУ или согласовано между изготовителем и заказчиком.

2 Риски удара молний различного типа (S1—S4, см. *D.3.1*) для конкретного проекта оценивает или изготовитель ВЭУ/ВЭС, или заказчик, или совместно.

3 Классификацию ударов молнии, связанных с оценкой рисков повреждений, и классификацию повреждений из-за удара молнии см. в *D.3.1*.

7.3.2 Оценка компонентов риска при ударах молнии в ВЭУ

Компоненты риска, связанные с ударами молнии в ВЭУ (тип удара молнии S1), определяют по соответствующим формулам:

- компонент риска нанесения вреда живым существам вследствие поражения электрическим током (D_{1D} и D_{1T})

$$R_{AT} = N_D \cdot P_{AT} \cdot P_P \cdot L_{AT}; \quad (11)$$

$$R_{AD} = N_D \cdot P_{AD} \cdot P_P \cdot L_{AD}; \quad (12)$$

- компонент риска физического повреждения ВЭУ

$$R_B = N_D \cdot P_B \cdot P_P \cdot L_B; \quad (13)$$

- компонент риска отказа внутренних систем

$$R_C = N_D \cdot P_C \cdot P_P \cdot P_e \cdot L_C. \quad (14)$$

Параметры для расчета компонентов риска приведены в таблице 4.

Примечание — В ВЭУ t_z — это время в часах в год, когда люди присутствуют в опасном месте, и оно обычно очень незначительное. Безопасность персонала должна обеспечиваться в соответствии с разделом 10. В документации на ВЭУ должны быть определены безопасные места.

7.3.3 Оценка компонентов риска при ударах молнии вблизи ВЭУ

При оценке рисков, связанных с ударами молнии вблизи ВЭУ (тип удара молнии S2), определяют компонент риска отказа внутренних систем по формуле

$$R_M = N_M \cdot P_M \cdot P_P \cdot P_e \cdot L_M. \quad (15)$$

Параметры для расчета по формуле (15) приведены в таблице 4.

7.3.4 Оценка компонентов риска при ударах молнии в линию коммуникаций, подведенную к ВЭУ

Компоненты риска, связанные с ударами молнии в линию коммуникаций, подведенную к ВЭУ (тип удара молнии S3), рассчитывают по следующим формулам:

- компонент риска нанесения вреда живым существам вследствие поражения электрическим током

$$R_U = (N_L + N_{DJ}) \cdot P_U \cdot P_P \cdot L_{UT}; \quad (16)$$

- компонент риска физического повреждения ВЭУ

$$R_V = (N_L + N_{DJ}) \cdot P_V \cdot P_P \cdot L_V; \quad (17)$$

- компонент риска отказа внутренних систем

$$R_{W1} = (N_L + N_{DJ}) \cdot P_W \cdot P_P \cdot P_e \cdot L_{W1}. \quad (18)$$

Параметры для расчета компонентов риска приведены в таблице 4.

Таблица 4 — Параметры для расчета компонентов риска повреждений в результате ударов молнии (по *ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, таблица 5*)

Обозначение	Точка поражения, последствия
Среднегодовое количество опасных событий, вызванных ударом молнии	
N_D, год$^{-1}$	В ВЭУ
N_M, год$^{-1}$	Вблизи ВЭУ
N_L, год$^{-1}$	В линию коммуникаций, подведенную к ВЭУ
N_I, год$^{-1}$	Вблизи линии коммуникаций, подведенной к ВЭУ
$N_{D,b}$, год$^{-1}$	К сооружению на конце «b» линии коммуникаций (см. рисунок 3)
N_{SG}, год$^{-1}$, км$^{-2}$	Частота ударов молнии в землю
Вероятность того, что удар молнии в ВЭУ	
P_{AT}	вызовет опасное напряжение прикосновения и шаговое напряжение
P_{AD}	нанесет вред живым существам вследствие поражения электрическим током
P_B	вызовет физическое повреждение ВЭУ
P_C	вызовет отказ внутренних систем

Окончание таблицы 4

Обозначение	Точка поражения, последствия
Вероятность того, что удар молнии вблизи ВЭУ	
P_M	вызовет отказ внутренних систем
Вероятность того, что удар молнии в линию коммуникаций	
P_U	нанесет вред живым существам вследствие поражения электрическим током
P_V	вызовет физическое повреждение ВЭУ
P_W	вызовет повреждение внутренних систем
Вероятность того, что удар молнии вблизи линии коммуникаций	
P_Z	вызовет повреждение внутренних систем
Потери	
L_{AT}	из-за вреда живым существам вследствие поражения электрическим током в результате прямого удара (удары молнии в ВЭУ). См. информацию по оценке убытков в *D.5*
L_{AD}	из-за вреда живым существам вследствие поражения электрическим током в результате резистивной и индуктивной связи (удары молнии в ВЭУ). См. приложение *D*
L_B	из-за физического повреждения ВЭУ (удары молнии в ВЭУ). См. приложение *D*
L_C	из-за отказа внутренних систем (удары молнии в ВЭУ). См. приложение *D*
Примечание — Значения потерь L_t; L_f; L_o и коэффициенты r_p, r_t, r_f, уменьшающие убытки, приведены в приложении *D*.	

7.3.5 Оценка компонентов риска при ударах молнии вблизи линии коммуникаций, подведенной к ВЭУ

При оценке рисков, связанных с ударами молнии около линии коммуникаций, подведенной к ВЭУ (тип удара молнии S4), определяют компонент риска отказа внутренних систем по формуле

$$R_Z = N_I \cdot P_Z \cdot P_P \cdot P_e \cdot L_Z. \quad (19)$$

Для этой оценки если $(N_I - N_L) < 0$, то допустим, что $(N_I - N_L) = 0$.

Параметры для расчета компонента риска приведены в таблице 4.

8 Молниезащита отдельных компонентов ВЭУ

8.1 Общие положения

8.1.1 Уровень молниезащиты

Все отдельные компоненты ВЭУ должны быть защищены в соответствии с уровнем УМЗ I, за исключением случаев, когда оценка рисков согласно разделу 7 показывает, что уровень защиты менее УМЗ I является оптимальным с экономической точки зрения для различных ВЭУ и разных мест размещения. Может быть целесообразным дифференцировать меньший общий риск, например лопасти ВЭУ защищены по более высокому уровню УМЗ, а другие части можно отремонтировать или заменить с меньшими затратами, — и все можно защитить с меньшим уровнем молниезащиты.

Обеспечение срока службы с определенным уровнем УМЗ может потребовать проведения техобслуживания и проверок, которые будут обусловлены ситуацией на конкретной площадке. Требования к техобслуживанию и проверкам СМЗ, включая систему заземления, должны быть описаны в руководствах по эксплуатации и техобслуживанию. Процедуры эксплуатации и техобслуживания описаны в разделе 12.

8.1.2 Зоны молниезащиты

ВЭУ должна быть подразделена на физические участки, которые грубо определяют уровень воздействия молнии на отдельные элементы в этой зоне. Определение воздействия молнии путем деления ВЭУ на зоны молниезащиты позволяет обеспечить систематическую и достаточную защиту всех

компонентов ВЭУ. Зоны молниезащиты определяются в зависимости от возможности прямого попадания молнии и от величины тока молнии и соответствующих магнитных и электрических полей, ожидаемых в этой зоне (см. приложение *F*). Дополнительные указания по использованию ЗМЗ приведены в приложении *F*.

8.2 Лопасти

8.2.1 Общие положения

Лопасти ВЭУ наиболее подвержены воздействию молниевых разрядов. Они подвергаются полному воздействию электрических полей, вызванных ударом молнии, токов молнии, а также магнитных полей, вызванных токами молнии. Объяснение процесса удара молнии и соответствующий процесс переноса электрического тока/разряда приведены в приложении *B*.

Лопасти ВЭУ подвергаются воздействию молнии с распределенной силой и частотой вдоль их длины, когда частота прямых касаний является наивысшей на концевой части и уменьшается по направлению к корневой части. Опыт натурных испытаний и эксплуатации, документально свидетельствующий о распределении точек касания (частоте), приведен в *G.8*. Изготовитель должен указать в документации подверженность воздействию молний (участки вероятного касания и соответствующие уровни молниезащиты) в отношении рассматриваемых лопастей. Указания по определению молниевой обстановки приведены в приложении *F*.

Общее описание различных аспектов, относящихся к молниезащите лопастей, приведено в приложении *G*.

8.2.2 Требования

Молниезащита должна быть достаточной для выдерживания лопастями ударов молнии и проведения тока молнии, выявленного в результате оценки подверженности молниям в соответствии с разделом 7, без повреждений конструкции, которые бы привели к ослаблению функционирования лопасти.

Изготовитель должен определить и учесть распределение точек ударов молний в специальной конструкции лопастей, предпочтительно на основе хорошо проверенных данных испытаний в натурных условиях и данных эксплуатации для аналогичных конструкций лопастей. Если полевые данные отсутствуют для аналогичных конструкций лопастей, то опыт показал, что наружная часть лопасти (обычно составляющая внешние 5—10 м) более подвержена воздействию молний, чем оставшиеся участки лопастей. Примеры приведены в *G.8*.

Изготовитель должен указать, какое распределение точек удара молнии использовано при оценке воздействия молний на лопасти, путем оценки риска влияния на различных расположенных по размаху участках и обеспечить, чтобы лопасти могли выдерживать вероятное воздействие токов удара для выбранного уровня молниезащиты. Воздействие должно быть задокументировано, например путем определения молниевой обстановки вдоль лопасти, примеры см. в приложении *F*.

Минимальные аспекты, обеспечивающие надлежащее функционирование, включают в себя:

- определение подверженности воздействию молний фактической лопасти, параметры тока молнии и частота различных ударов, касающихся лопасти, подтвержденные, как описано в 8.2.3;
- правильный перехват удара молнии в точках воздушного перехвата, дискретных или распределенных, в зависимости от подверженности лопасти;
- нисходящий путь для тока молнии;
- координацию изоляции путем изолирования, разделения или соединения СМЗ и дополнительных токоведущих частей, если они имеются, для минимизации риска боковых ударов и перенапряжения соединительных интерфейсов.

Повреждения элементов конструкции лопастей, поверхностного слоя лопастей или СМЗ за счет попадания молнии не должны приводить к потере работоспособности лопастей до следующего запланированного периода технического обслуживания и осмотра.

8.2.3 Проверка

Способность системы молниеприемников и вертикального молниеотвода к перехвату молний и проведению тока молнии должна быть определена для конкретной лопасти и подтверждена одним из следующих методов:

a) испытаниями высоким напряжением и большим током в соответствии с 8.2.5;

b) демонстрацией сходства типа лопасти (конструкции) с лопастями, для которых такая молниезащита проверена с помощью испытаний согласно 8.2.5.

Две лопасти определяются как аналогичные, если различия отрицательно не влияют на эффективность перехвата, способность проводить ток и координацию изоляции защит, как это определено ис-

пытаниями или анализом. Проверка сходства конструкции лопастей с лопастями, испытанными ранее, описана в приложении *H*;

c) методами анализа, ранее проверенными путем сравнения полученных по ним результатов с результатами испытаний в соответствии с 8.2.5. В документации по анализу или имитации должно быть подтверждение применимости и действительности использованных методов анализа. Указания по проверке результатов использования стандартных методов анализа даны в приложении *I*.

Производитель лопастей в сопроводительной документации на поставляемое оборудование должен указать, какой из вышеуказанных методов использован, и привести результаты проверки.

Испытание по первому перечислению 8.2.3 является обязательным для новых конструкций защиты лопастей, если только не демонстрируется сходство с предшествующими конструкциями.

Все проводящие части лопасти должны быть подвергнуты проверке, чтобы убедиться в том, что их взаимодействие с СМЗ во время перехвата молнии и отвода тока происходит без конструктивного повреждения, вызывающего нарушение функционирования лопасти.

Высоковольтные испытания, используемые для определения характеристик системы молниеприемников (размещения, компоновки и координации изоляции), не могут быть использованы для определения эффективности перехвата, как это выявлено для специальных уровней молниезащиты. Высоковольтные испытания являются средством проверки характеристик с использованием процессов и требований приложения *C*. Характеристики каждого уровня молниезащиты УМЗ лопасти устанавливают с помощью контрольных испытаний большими токами.

8.2.4 Разработка защиты

8.2.4.1 Общие положения

В следующих подразделах описаны вопросы, важные для конструирования и реализации части СМЗ, относящихся к лопастям.

8.2.4.2 Система молниеприемников

Молниеприемники размещают на поверхностях лопасти в месте, где могут возникать встречные лидеры, что может быть причиной поражения разрядами молнии или пробоя при отсутствии молниеприемника. Система молниеприемников может быть частью конструкции лопасти (элементы, добавленные к лопасти, или их объединение).

Опыт эксплуатации и анализ подверженности воздействию молний показали, что большинство ударов молний происходит на внешних частях лопастей (дополнительную информацию см. в *G.8*), что следует учитывать при организации молниезащиты лопастей. Методы разработки системы молниеприемников (катящаяся сфера, защитный угол и т. п.), указанные в *ГОСТ Р 59789*, не учитывают вероятность мест поражений на лопастях, поэтому не применяются для лопастей ВЭУ.

Система молниеприемников должна быть рассчитана согласно разделу 7 и проверена согласно 8.2.3.

Система молниеприемников должна быть надлежащим образом зафиксирована и выполнена из материалов, способных выдержать предполагаемые воздействия ветра, влаги, частиц пыли и т. п. Особое внимание необходимо уделять материалам при создании морских и прибрежных ВЭУ.

Все внутренние части системы молниеприемников, монтаж молниеприемников и присоединение к молниеотводам должны быть спроектированы так, чтобы минимизировать риск возникновения внутренних разрядов, т. е. стримеров и лидеров, возникающих от этих частей.

Система молниеприемников должна быть спроектирована таким образом, чтобы обслуживающий персонал мог проинспектировать, отремонтировать или заменить ее части, поврежденные или изношенные вследствие воздействия молнии или других факторов окружающей среды согласно процедурам, описанным в руководствах по эксплуатации и техобслуживанию. Молниеприемники при эксплуатации подвержены эрозии в основании дугового разряда молнии. Эрозия зависит от заряда, входящего в основание дугового разряда, материала поверхности и геометрии системы молниеприемников. Для лопастей, которые принимают большое количество ударов молнии, может потребоваться с течением времени замена устройств воздушного перехвата ударов молнии. Срок службы системы молниеприемников должен быть оптимальным и быть обеспечен тщательным выбором ее материала и конструкции и их соотнесением с периодами обслуживания и сервиса. Производитель должен определить процедуру корреляции расчетного срока службы с параметрами испытаний, чтобы гарантировать, что предлагаемые интервалы обслуживания/замены являются адекватными.

8.2.4.3 Система молниезащиты и ее соединительные элементы

Система молниезащиты и ее соединительные компоненты включает все проводящие части лопасти, которые принимают участие в отводе тока молнии от системы молниеприемников до конца комеля лопасти.

Соединения с СМЗ должны быть прочными и надежными и гарантировать, что вся система может выдержать комбинированное (электрическое, тепловое и электродинамическое) воздействие тока молнии. Требуемый уровень контакта на соединительных элементах СМЗ должен быть подтвержден с помощью соответствующего прибора, например четырехпроводного микроомметра. Способность СМЗ выдерживать механические нагрузки на лопасти должна быть проверена путем установки на лопасти системы, которая подвергается испытаниям согласно *ГОСТ Р 54418.23*, а способность системы выдерживать электродинамические силы должна подтверждаться согласно 8.2.3. Пределы и максимальное отклонение измеренного сопротивления должны быть установлены заранее изготовителем.

Поперечное сечение вертикального молниеотвода и проводящих частей лопасти, используемых в качестве вертикальных молниеотводов (преднамеренных и естественных), должны обеспечить отвод приходящихся на них долей тока молнии в соответствии с выбранным уровнем УМЗ. Соответствие требованиям подтверждают испытаниями по 8.2.3.

Испытательный ток грозового импульса может быть масштабирован соответственно его значению, полученному для фрагмента лопасти (см. приложение *F*).

Испытания соединительных элементов проводят по приложению *C*. Значения испытательного тока должны соответствовать первому компоненту разряда молнии для выбранного уровня УМЗ. Если использованы нежесткие соединения (вращающиеся контакты, подшипники или искровые разрядники), то испытание проводят длительным током разряда молнии. Если существует несколько путей для прохождения тока молнии, то величина и форма волн испытательного тока для каждого пути могут быть вычислены в соответствии с распределением тока по путям.

Все внутренние части вертикального молниеотвода и элементов соединения должны быть сконструированы таким образом, чтобы воспрепятствовать развитию электрических разрядов от элементов системы молниеприемников и минимизировать риск внутренних разрядов, пробивающих поверхность лопасти.

Вертикальный молниеотвод и элементы соединения, подверженные электродинамическим воздействиям, такие как соединение между молниеотводом лопасти и ступицей, испытывают по приложению *D* с использованием испытательной схемы, реалистически воспроизводящей их размещение в ВЭУ.

Наружно монтируемые вертикальные молниеотводы, подверженные прямому поражению молнией, относят к системе молниеприемников, и на них распространяются требования 8.2.4.2.

Изготовитель должен установить процедуру регулярной проверки частей системы вертикальных молниеотводов и его соединительных элементов. Следует учитывать, что из-за воздействий окружающей среды могут возникнуть повреждения и ухудшение свойств частей системы вертикальных молниеотводов, и их соединительные элементы могут повреждаться и ухудшать свои свойства, и в этом случае соответственно должны корректироваться их срок службы и интервалы обслуживания.

Испытания для проверки вертикальных молниеотводов и соединительных элементов описаны в приложении *C*.

Проверку вертикального молниеотвода и его соединительных элементов выполняют, как описано в 8.2.3.

8.2.4.4 Дополнительные проводящие компоненты

Если в лопасти существуют дополнительные проводящие компоненты (конструкционные элементы, CFRP, балансиры, тормозные тросы, электрические кабели датчиков, нагреватели, световая сигнализация и т. п.), их расположение должно быть скоординировано с системой молниезащиты их изоляцией или разделительными расстояниями. Если это не может быть обеспечено, используют соответствующее уравнивание потенциалов (разделительные расстояния — *по ГОСТ Р 59789*).

Координация изоляции и оценка распределения тока, предусмотренные проектом, должны быть выполнены в процессе инженерного анализа, численного моделирования или при испытаниях. Возможные методы проверки правильности выбранных решений см. в *[6], [7]* или в аналогичных стандартах. Проверку результатов инженерного анализа и численного моделирования выполняют с помощью сравнительных испытаний. Примеры такой проверки приведены в приложении *I*.

Проводящие компоненты должны конструироваться так, чтобы проводить требуемую долю (доли) тока молнии. Требуемая проводящая способность различных путей отвода тока должна быть проверена испытанием большими токами по 8.2.5.3.

Электрическое и электронное оборудование должно быть защищено соответствующими экранами, защитой от перенапряжений и системой уравнивания потенциалов (см. 8.5).

Следует также учесть влияние электродинамических сил.

Примечания

1 Наибольшее напряжение между проводящими компонентами обычно возникает во время отвода токов последующих компонентов разряда, тогда как наибольшая удельная энергия и заряд проходят по различным токовым путям во время обратного разряда первого компонента.

2 При расчете разделительного расстояния по *ГОСТ Р 59789* и в методах испытаний с учетом *[7]* принимают во внимание высокое напряжение во время отвода тока последующего компонента отрицательного разряда.

8.2.4.5 Воздействие электрических полей на лопасти из композитного материала

Вследствие высокого расположения и незащищенности лопастей ВЭУ лопасти будут часто подвергаться воздействию высоких электрических полей в течение своего срока службы. Высокие статические и переходные электрические поля создаются грозовыми облаками, воздействуя электрическим током на конструкцию лопасти. Приближающиеся лидеры молнии подвергают конструкцию лопасти воздействию более высоких электрических полей. В обоих случаях электрические поля могут со временем ухудшить электроизоляционные свойства композитных материалов. Поэтому СМЗ должны быть разработаны исходя из принципов разработки высоковольтной изоляции.

8.2.5 Методы испытаний

8.2.5.1 Общие положения

Методы испытаний используют для всей конструкции лопасти или ее частей, таких как вершины лопасти или многослойные образцы. Испытания допускается проводить в качестве инженерных испытаний, поддерживающих процесс проектирования и итерации, и они являются обязательными для окончательной проверки и подтверждения соответствия конструкции лопастей.

8.2.5.2 Испытания при высоком напряжении

Эффективность перехвата систем молниеприемников на лопасти должна быть оценена испытанием на возникновение первичного лидера по *С.2.2*.

Улучшение способности слоев лопасти препятствовать возникновению внутренних разрядов и предотвращать их распространение по поверхности лопасти может быть достигнуто увеличением электрической пробивной прочности материала и усовершенствованием конструкции внутренних частей лопасти с целью минимизировать напряженность поля. Напряжение пробоя изолирующих композитных материалов и слоев покрытия допускается оценивать с учетом *ГОСТ 1516.2*, а также [8], *[9]* (переменный ток), *[10]* (импульсное напряжение) и *[11]* (покрытие).

Электрическая активность на изолирующих поверхностях (стримеры, перекрытия по поверхности и т. п.) может разрушать их из-за частичных дуг и электрической эрозии. Влияние влаги может изменить изолирующие свойства поверхности, сделав ее более проводящей, и таким образом повысить риск прямого поражения молнией. Дугостойкость различных лопастей и покрывающих материалов можно оценить и сравнить по *ГОСТ 27474* с учетом *[12]*.

8.2.5.3 Испытания большим током

Системы молниеприемников прежде всего будут подвергаться воздействию заряда, переносимого при разряде молнии (интегралу тока молнии по времени), поэтому соединительные компоненты и все части системы молниеотводов должны быть испытаны большими токами по *С.3* приложения *С*.

Элементы соединений и части вертикального молниеотвода должны пройти испытание на физическое повреждение большим током в соответствии с *С.3*.

Формы и амплитуды испытательных импульсов должны включать первый компонент разряда и, при необходимости, также длительный ток в соответствии с выбранным уровнем УМЗ. Определенные для пластины амплитуду тока и форму импульса можно масштабировать для соответствия реальному воздействию с учетом особенностей местной грозовой деятельности. Инструкция по испытаниям приведена в приложении *С*.

8.3 Гондола и другие элементы конструкции

8.3.1 Общие положения

Молниезащита гондолы и других компонентов конструкции ВЭУ должна быть выполнена с использованием как можно бóльших металлических элементов для молниеприема, осуществления электрических соединений, экранирования и отвода тока молнии к системе заземления. Дополнительные компоненты молниезащиты, такие как молниеприемники для защиты метеорологического оборудования и световой предупреждающей сигнализации для авиации на гондоле, молниеотводы и электрические соединители должны быть выполнены и размещены в соответствии с *ГОСТ Р 59789*.

Координация изоляции и оценка распределения тока, предусмотренные проектом, должны быть выполнены в процессе инженерного анализа, численного моделирования или при испытаниях. Все части и соединения, по которым протекает ток молнии, должны быть способными выдержать тепловое и электромеханическое воздействие, возникающее при отводе токов молнии соответствующих уровней. Возможные методы проверки правильности выбранных решений см. в *[6], [7]* или в аналогичных стандартах. Проверку результатов инженерного анализа и численного моделирования выполняют с помощью сравнительных испытаний. Примеры такой проверки приведены в приложении *I*.

Части гондолы и другие элементы конструкции, используемые в качестве естественных вертикальных молниеотводов, должны отвечать требованиям, предъявляемым к естественным вертикальным молниеотводам согласно *ГОСТ Р 59789*. Проверка с помощью испытаний не требуется для элементов конструкции с размерами, четко соответствующими требованиям *ГОСТ Р 59789*.

Документация по СМЗ для всех подсистем должна отвечать требованиям раздела 11.

8.3.2 Ступица

Ступица больших ВЭУ представляет собой полую чугунную сферу диаметром в несколько метров. Таким образом, сама толщина материала обеспечивает устойчивость конструкции ступицы к воздействию молнии. В большинстве случаев электрические системы, механические системы управления и приводы размещены в ступице, а кабели выведены наружу из ступицы к лопастям и гондоле. Ступица выполняет функцию клетки Фарадея, обеспечивая защиту от магнитного влияния отверстий в направлении от ступицы к лопастям, передней части установки и гондолы (т. е. ее можно рассматривать как ЗМЗ). В большинстве случаев эти отверстия закрыты дисками с фланцами лопасти и фланцем главного вала, которые можно рассматривать как очень эффективные магнитные экраны. Когда отверстия закрыты магнитными экранами, как описано выше, для внутреннего помещения ступицы не требуется определенная молниезащита. Молниезащита ступицы тогда сводится к уравниванию потенциалов и защите от переходного напряжения, когда имеются системы, расположенные снаружи ступицы, такие как приводные системы лопасти, а также электрические системы и система управления в ступице, соединенные с кабелями, выходящими наружу из ступицы.

8.3.3 Обтекатель ступицы

Обычно ступица имеет стекловолоконный кожух, называемый обтекателем ступицы, который устанавливается на ступице и вращается вместе с ним. Метод катящейся сферы всегда будет указывать на возможность разряда молнии в передний конец обтекателя, где должна быть предусмотрена молниезащита. В некоторых конструкциях установок электрические и механические системы управления и привод размещены вне ступицы и закрыты обтекателем. Такие системы должны быть защищены от поражения молнией системами молниеприемника. Если таковые отсутствуют, системы размещают под обтекателем, при этом приходится признать риск прокола обтекателя молнией и отсутствие какой-либо молниезащиты. Однако в большинстве случаев простая и практичная система молниезащиты обтекателя может быть изготовлена в виде металлической конструкции, закрепленной перед обтекателем как молниеприемник и соединенной со ступицей.

8.3.4 Гондола

Конструкция гондолы должна быть частью молниезащиты, обеспечивая, чтобы молнии, развивающиеся в направлении гондолы, поражали естественные металлические части, способные выдерживать удар, или систему молниеприемника, предназначенную для этой цели. Гондолы с GFRP-покрытием или аналогичные должны быть обеспечены системой молниеприемника и молниеотводами, образующими сетку (клетку Фарадея) вокруг гондолы. Система молниеприемников и выступающие проводники в этой сетке должны быть способны выдержать разряд молнии, соответствующий выбранному уровню молниезащиты.

Система молниеприемников, включающая открытые проводники в этой клетке, должна выдерживать удары молнии, соответствующие выбранному уровню УМЗ. Другие проводники в клетке Фарадея должны быть такого размера, чтобы выдержать часть токов молнии, которые будут на них воздейство-

вать. Система молниеприемников для защиты приборов и т. п., расположенных с наружной стороны гондолы, должна быть разработана в соответствии с общими правилами из *ГОСТ Р 59789*, а вертикальные молниеотводы должны быть подсоединены к вышеуказанной клетке.

Металлическая сетка может быть использована для гондол с кожухом из стеклопластика для создания экрана от воздействия внешних электрических и магнитных полей, а также магнитных полей от токов, проходящих в сетке. В качестве альтернативы все цепи внутри гондолы располагают в закрытых металлических коробах, кабельных лотках и т. п. Система выравнивания потенциалов должна включать основные металлические компоненты внутри и снаружи гондолы. В результате фактически создают эффективную эквипотенциальную поверхность, к которой должны быть подсоединены все соединения заземления и выравнивания потенциалов.

Желательно, чтобы ток молнии от разряда в лопасти протекал напрямую по упомянутой выше сетке, полностью исключая прохождение тока через подшипники механизма регулирования наклона лопастей и подшипники привода (см. 8.2 и 8.4 по защите лопастей и подшипников). Для отвода токов молний от подшипников обычно применяют щетки различных типов. Однако эффективность таких отдельных щеток может быть низкой, т. к. очень трудно создать щеточные и заземляющие системы с сопротивлением, достаточно низким для значительного снижения тока, проходящего через главный вал и подшипники с низким сопротивлением к основанию гондолы. Дополнительную информацию см. в 8.4.4.

Примечание — Гондола с таким магнитным экраном не способна защитить от влияния магнитных полей токов молнии, протекающих внутри гондолы, например в главном валу.

8.3.5 Башня

Трубчатая стальная мачта, которую в большинстве случаев используют для больших установок, обычно соответствует габаритам, требуемым для вертикальных молниеотводов, указанным в *ГОСТ Р 59789*, и может считаться отличным электромагнитным экраном (клеткой Фарадея), закрывающим от электромагнитного влияния, как граница раздела, от гондолы до уровня грунта. Поэтому в большинстве случаев есть основания рассматривать внутренний объем мачты как зону молниезащиты ЗМЗ 1 или ЗМЗ 2. Для того чтобы мачта образовывала замкнутое пространство, на всем пути по фланцам между секциями мачты должен быть надежный электрический контакт. Мачта и все ее основные металлические части должны быть соединены с защитным заземляющим проводом PE и системой уравнивания потенциалов для наилучшего использования защиты, обеспечиваемой клеткой Фарадея. Что касается соединений металлических конструкций и систем внутри башни, таких как лестницы, провода и направляющие, то необходимо руководствоваться 9.3.5.

Привод с гондолой обычно закрывается металлическими листами и заслонками, которые также могут служить в качестве электромагнитного защитного экрана, закрывающего башню (см. 8.4.2 с описанием молниезащиты подшипников поворота).

Привод башни и системы заземления описаны в разделе 9. Если башня имеет конструкцию в виде клетки Фарадея, то для содержимого башни не требуется определенная молниезащита. Молниезащита башни тогда будет сводиться к уравниванию потенциалов и защите от переходного напряжения цепей электрических систем и систем управления, уходящих в другие ЗМЗ, такие как гондола и наружная часть башни.

Решетчатые башни обычно не считаются эффективной клеткой Фарадея, хотя внутри решетчатой башни магнитное поле немного ослабевает, а ток молнии снижается.

Целесообразно считать внутреннюю часть решетчатой башни уровнем ЗМЗ 0_B. Вертикальное отведение молнии должно осуществляться через конструкционные элементы решетчатой башни, которые должны, в свою очередь, соответствовать размерам, необходимым для вертикальных молниеотводов согласно *ГОСТ Р 59789*, с учетом перераспределения тока по параллельным путям. Для экранов кабелей в решетчатых мачтах может потребоваться присоединение к мачте через определенные интервалы для того, чтобы избежать пробоя изоляции кабеля; это должно быть оценено согласно расчетам (см. *ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010, приложение D*).

В железобетонных мачтах в качестве молниеотвода может быть использована арматура: по два — четыре параллельных вертикальных элемента с достаточным поперечным сечением, соединенных горизонтально на вершине, в основании и через каждые 20 м между ними. Стальная арматура обеспечивает достаточно эффективное ослабление магнитного поля и уменьшение тока молнии внутри башни, если она будет соединена указанным выше образом. В *ГОСТ Р 59789* даны указания по интегрированию стальной арматуры с СМЗ.

Документация по СМЗ должна соответствовать требованиям раздела 11.

8.3.6 Методы проверки

Проверку выполняют с помощью испытаний, приведенных в приложении С.

Следует использовать соответствующие методы анализа и испытаний. Должны быть оформлены отчеты об используемых анализах/методах.

8.4 Механический привод и система установки на ветер

8.4.1 Общие положения

ВЭУ обычно имеет подшипники для поворота лопастей, вращения главного вала, работы редуктора, генератора и системы управления поворотом.

Гидравлические или электрические приводные системы используются для управления и функционирования основных элементов.

Подшипники и приводные системы имеют движущиеся части, соединяющие напрямую или не напрямую перемычками различные части ВЭУ, которые могут стать проводниками тока молнии.

Все подшипники и приводные системы, которые могут находиться на пути прохождения тока молнии, должны быть защищены для снижения уровня тока, проходящего через элемент, до допустимого уровня.

8.4.2 Подшипники

После попадания молнии в ВЭУ невозможно осмотреть подшипники и оценить их состояние, поэтому системы для защиты подшипников должны быть проверены и описаны в документации.

Защита может быть частью конструкции самого подшипника или это может быть внешняя система, установленная параллельно подшипнику для обвода тока.

Если подшипники функционируют без защиты, то должно быть доказано, что подшипник может работать в течение всего расчетного срока службы после ожидаемого количества проведений тока молнии с соответствующим уровнем тока. Если подшипник не способен функционировать в течение всего расчетного срока службы, необходимо обеспечить его защиту (см. 8.4.4).

Способность подшипника выдерживать ток молнии, которому он подвергается, должна быть верифицирована одним или несколькими из следующих методов:

a) испытания большим током согласно 8.2.5;

b) демонстрация сходства типа подшипника (конструкция) с типом подшипника, для которого такая молниезащита проверена с помощью испытаний согласно 8.2.5;

c) использование анализа или имитаций, проверенных путем сравнения полученных по ним результатов с результатами испытаний согласно 8.2.5. В документации по анализу или имитациям должно быть подтверждение применимости и действительности примененных методов/анализа.

Изготовитель должен четко указать в документации, как соответствовать плану проверки на основе трех указанных методов.

Если документация основана на испытаниях, то подшипник с защитой или без и системы обхода для подшипника должны быть испытаны на установке, реалистически воспроизводящей условия эксплуатации подшипника и систем защиты/обхода, а именно по нагрузке, смазке, скорости вращения, соответствующих проекту и влияющих на последствия протекания тока молнии. Указания по методам проверки различных решений даны в таблице 5.

Таблица 5 — Проверка правильности проектирования подшипников и защиты подшипников

Метод молниезащиты подшипников	Процент предполагаемого тока молнии в точке монтажа	Проверочное испытание
Защита отсутствует	100 % в подшипнике	Испытание подшипников большим током
Защита подшипника	Ток делится между подшипником и его защитой. Необходимо определить разделение тока	Испытание подшипников и системы защиты большим током
Обводная система	Незначительный	Испытание большим током обводной системы

Когда используются искровые зазоры, то координация изоляции должна определяться в ходе высоковольтных испытаний или анализа для гарантирования протекания тока молнии через искровые разрядники. Координация изоляции на основании разделительных расстояний должна соответствовать *ГОСТ Р 59789*.

Для испытаний током применяют общую схему испытаний из *С.3.3*. Указания в отношении испытаний вращающихся и неподвижных подшипников, включая пример испытательной схемы, включены в приложение *J*.

8.4.3 Гидравлические системы

Если гидравлические системы являются частью пути тока молнии, необходимо обеспечить, чтобы проникновение тока молнии не повлияло на систему. Для гидравлических систем необходимо учитывать риск утечки жидкости из-за повреждения фитингов и воспламенения гидравлического масла.

Для направления тока в обход приводных цилиндров допускается использовать защитные меры в виде скользящих контактов или соединительных перемычек.

Гидравлические патрубки, доступные для тока молнии, должны быть защищены от проникновения тока в патрубки. Если патрубки имеют механическую броню, она должна быть связана со стальными элементами оборудования на обоих концах патрубка. Необходимо убедиться, что броня имеет достаточное поперечное сечение для отвода части тока молнии.

Аналогичные положения допускается применять для систем водяного охлаждения.

8.4.4 Искровые промежутки и скользящие контакты

Для отвода тока от подшипников и приводных систем следует рассмотреть использование искровых промежутков или скользящих контактов. Такие обводные системы, включая их соединительные проводники, для достижения эффективности должны иметь меньшее полное сопротивление, чем прямой естественный путь тока через конструкцию.

Искровые промежутки и скользящие контакты должны быть способны отводить ток молнии, который может появиться в местах их расположения в ВЭУ. Для подтверждения соответствия требованиям проводят испытания для выбранного уровня УМЗ согласно *С.3.3*.

Искровые промежутки и скользящие контакты должны быть спроектированы так, чтобы сохранять требуемые характеристики независимо от условий окружающей среды, дождя, обледенения, загрязнение солью, пылью и т. п.

Искровые промежутки или скользящие контакты рассматривают как изнашиваемые части и срок их эксплуатации рассчитывают с учетом неблагоприятного воздействия загрязнений. Искровые промежутки и скользящие контакты регулярно осматривают и проверяют в соответствии с руководством по обслуживанию и ремонту.

8.4.5 Проверка

Функциональность всех систем защиты подшипников и привода должна быть подтверждена результатами испытаний импульсным током с формами волн и амплитудами, представляющими ожидаемые параметры молнии в месте установки системы защиты для выбранного уровня УМЗ, и документально зафиксирована.

Следует использовать соответствующий инженерный анализ, численное моделирование или испытания. Необходимы отчеты проверок по анализу/методам.

Рекомендуется проводить испытания импульсным током на полномасштабных объектах, у которых важные элементы системы представлены в макете для испытаний.

Испытания должны продемонстрировать (определение испытательных импульсов см. в *ГОСТ Р МЭК 62305-1* и приложении *С*), что система защиты способна противостоять разрушающим воздействиям как первого компонента (импульса) разряда, так и длительного тока (продолжительный ток) для выбранного уровня УМЗ. К одному и тому же образцу необходимо применить два испытания, но не обязательного в одном и том же разряде. В документации по испытаниям должна быть описана точная последовательность испытаний.

Если скользящие контакты используются как часть системы, то должны быть проведены механические испытания для подтверждения устойчивости системы, при этом следует обращать особое внимание на износ контакта из-за эрозии от тока молнии. Износ должен быть незначительным для беспрепятственного функционирования между проведениями планового технического обслуживания.

Испытания можно проводить на масштабных моделях, но в расчетах необходимо учитывать масштабные коэффициенты и воздействия.

Методы испытаний включены в *С.3.3*.

Примечание — Если очевидно из конструкции или показано анализом, что ток молнии полностью обходит элемент (т. е. через элемент передается незначительный ток молнии), то испытания большим током не требуются.

8.5 Электрические низковольтные системы, электронные системы и их компоненты

8.5.1 Общие положения

Этот пункт описывает защиту электрических систем и систем управления ВЭУ от воздействия импульсов тока и перенапряжений, вызванных:

- разрядами молний, поражающих ВЭУ;
- токами лидера, развивающегося от ВЭУ;
- непрямыми разрядами молний (т. е. влияние разрядов молнии через электромагнитные импульсы без прямого воздействия на установку).

Все типы разрядов молний вызывают электромагнитные импульсы.

Примечание — Дополнительные требования к электрооборудованию — по *ГОСТ Р МЭК 60204-1*.

Электрические системы и системы управления подвержены повреждениям за счет электромагнитных импульсов от грозовых разрядов. Поэтому должны быть предусмотрены меры их защиты от электромагнитных импульсных воздействий молнии (меры защиты SPM). Эффективная защита электрических систем и систем управления ВЭУ от электромагнитных импульсных воздействий молнии предусматривает систематический подход к предоставлению ЗМЗ согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-4*. Меры защиты SPM являются частью концепции ЗМЗ всей ВЭУ, описанной в приложении *F*.

Изготовитель ВЭУ должен разработать меры защиты SPM для всей электрической системы на основе *ГОСТ Р МЭК 62305-4*. Из-за определенного ограничения по размерам, даже в больших ВЭУ, ток молнии распространяется всего в нескольких метрах от чувствительного оборудования, что требует принятия специальных мер предосторожности, чтобы быть уверенными в совместимости с условиями грозовой обстановки.

Примеры применения концепции ЗМЗ в ВЭУ приведены в приложении *F*. Меры защиты SPM основаны на концепции ЗМЗ: ВЭУ разделена на зоны (т. е. объемы пространства), которые могут соответствовать частям ВЭУ, таким как внутренняя часть крупных элементов конструкции: ступица, гондола, башня, и более мелкие элементы, такие как шкафы. Разделение конструкции на зоны может быть применено для удобства системного определения степени тяжести электромагнитных импульсов молнии для каждой зоны. Необходимо задокументировать, что степень тяжести электромагнитных импульсов молнии в этих зонах согласуется с уровнем устойчивости внутренних, заключенных в них систем.

Устойчивый отказ электрических систем и систем управления из-за электромагнитных импульсов молнии может быть вызван:

- набегающими и индуцированными волнами перенапряжений, переданными к оборудованию через подключенные проводники;
- воздействиями излучения электромагнитных полей непосредственно на само оборудование.

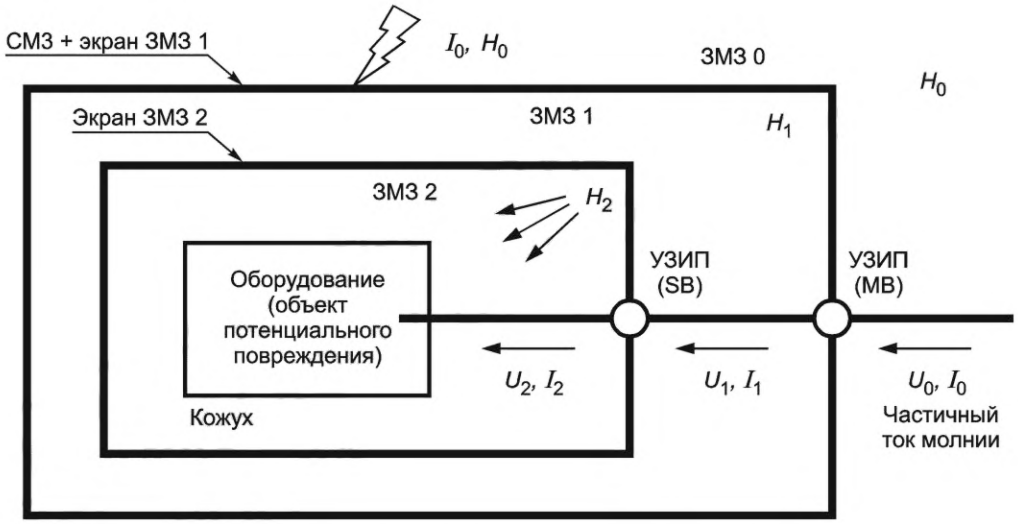
Для описания степени тяжести воздействий электромагнитных импульсов молнии (входящих и наведенных) в отдельных ЗМЗ установки параметры воздействующего электромагнитного импульса молнии должны быть оценены анализом или по *ГОСТ Р МЭК 62305-4* и *ГОСТ Р 59789*.

Примечание — Можно принять, что меры, эффективные для защиты от воздействия электромагнитных импульсов молнии, обеспечивают также эффективную защиту от воздействий непрямых разрядов молнии.

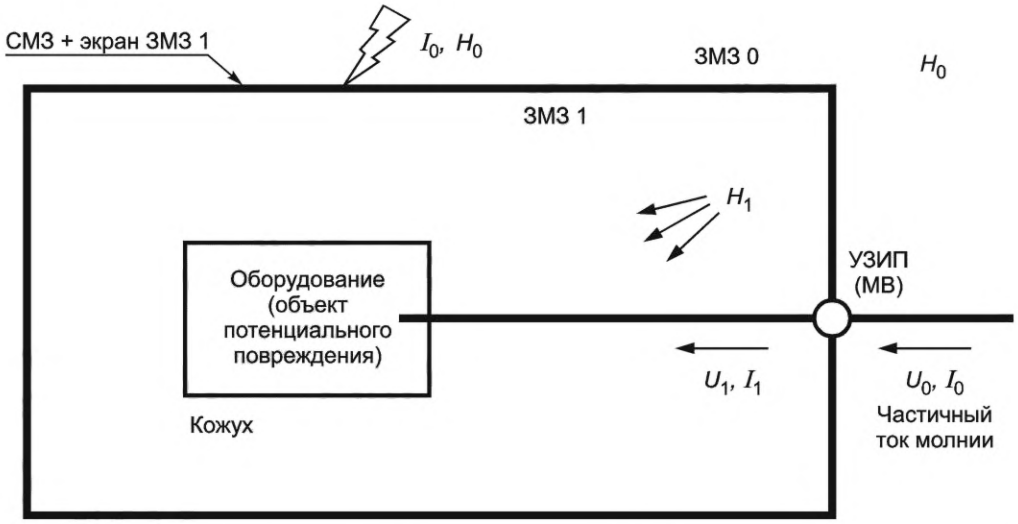
Основные меры защиты SPM согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-4* включают:

- соединение — см. 8.5.2;
- магнитное и электрическое экранирование путей прохождения кабелей и проводников (размещение системы) — см. 8.5.5;
- систему защиты от импульсных перенапряжений — см. 8.5.5;
- заземление — см. раздел 9.

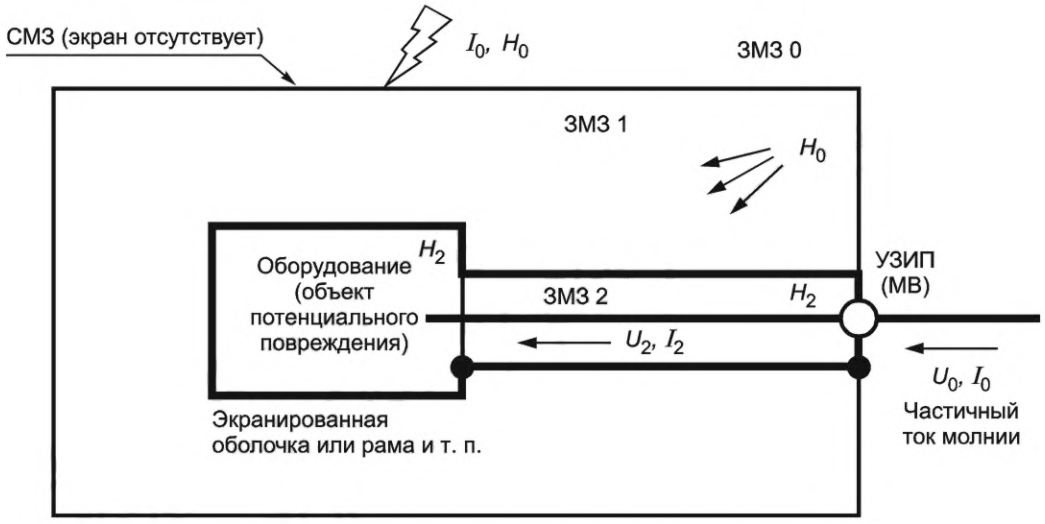
На рисунке 4 приведены примеры возможных мер защиты SPM (мер защиты от электромагнитного импульса молнии) в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 62305-4—2016, рисунок 2*. Уточненные требования см. в *ГОСТ Р 50571.5.53*.



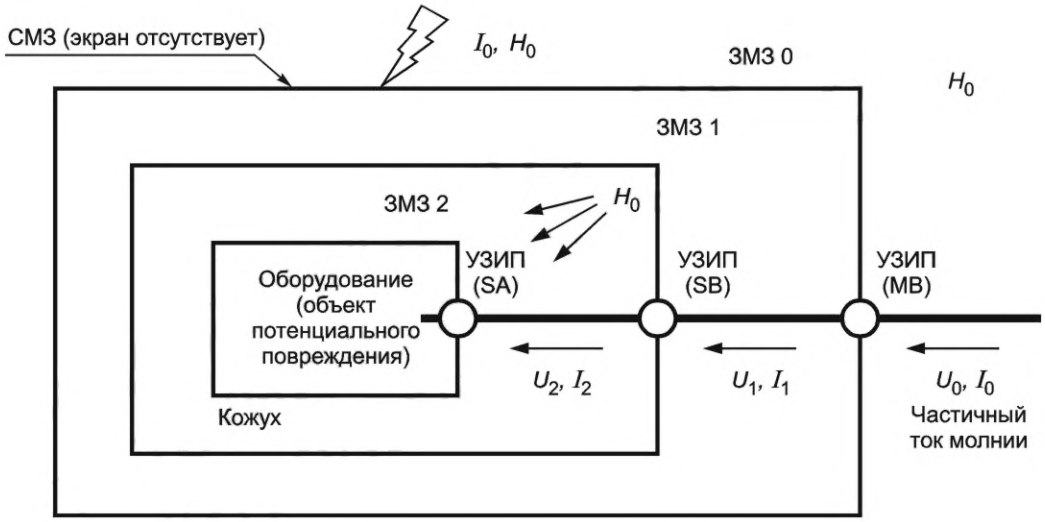
a — применение пространственных экранов и системы согласованных УЗИП в качестве меры защиты SPM. Оборудование надежно защищено от импульсных перенапряжений ($U_2 << U_0$ и $I_2 << I_0$) и наведенных магнитных полей ($H_2 << H_0$)



b — применение пространственных экранов и УЗИП на входе в зону ЗМЗ 1 в качестве меры защиты SPM. Оборудование защищено от перенапряжений, передаваемых проводным путем ($U_1 < U_0$ и $I_1 < I_0$) и от наведенных магнитных полей ($H_1 < H_0$)



c — применение экранирования внутренней линии и УЗИП на входе в зону ЗМЗ 1 в качестве меры защиты SPM. Оборудование защищено от перенапряжений, передаваемых проводным путем ($U_2 < U_0$ и $I_2 < I_0$) и от наведенных магнитных полей ($H_2 < H_0$)



d — применение только системы согласованных УЗИП в качестве меры защиты SPM. Оборудование защищено от перенапряжений, передаваемых проводным путем ($U_2 << U_0$ и $I_2 << I_0$), но не защищено от наведенных магнитных полей (H_0)

▬ — экранированная граница; ——— — неэкранированная граница

Примечание — УЗИП могут быть расположены в следующих точках:
- на границе ЗМЗ 1 (например, на вводно-распределительном щите MB);
- на границе ЗМЗ 2 (например, на распределительном щите SB);
- на или вблизи оборудования (например, на штепсельной розетке SA).

Рисунок 4 — Примеры возможных мер защиты SPM

Дополнительные методы включают в себя изоляцию, схемные решения, симметричные схемы, продольное полное сопротивление и т. п.

В документации (см. раздел 11) должна быть представлена, как минимум, следующая информация о мерах защиты SPM:

- определение ЗМЗ согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-1*;
- чертежи ВЭУ с указанием ЗМЗ и их границ, принципиальные электрические схемы с указанием УЗИП, защитные экраны кабелей и точки соединений экранов кабелей.

Базовые примеры представления подобной информации в документации приведены на рисунках *F. 6* и *F.7*.

В случае отсутствия частичных токов молнии внутри ЗМЗ защита от перенапряжения необходима лишь для кабелей, проходящих из одной зоны в зону с более чувствительными элементами (т. е. от ЗМЗ с более низким номером в ЗМЗ с более высоким номером), поскольку внутренние соединения в пределах зоны могут не иметь защиты. Такой подход более подробно описан в *ГОСТ Р МЭК 62305-4* и рассмотрен в приложении *F*. Случай протекания частичных токов молнии внутри ЗМЗ рассмотрен в приложении *F*.

На рисунке 5 показаны две зоны защиты от молнии ЗМЗ 1, соединенные электрическими или кабельными линиями. Особого внимания требует случай, когда обе зоны ЗМЗ 1 представляют собой отдельные сооружения с раздельными системами заземлений, расположенными на расстоянии десятков или сотен метров друг от друга. В этом случае большая часть тока молнии может протекать по незащищенным коммутационным линиям.

На рисунке 6 показано, что проблема взаимного соединения двух зон защиты от молнии ЗМЗ 1 может быть решена при помощи использования экранированных кабелей или экранированных кабельных коробов при условии, что экраны смогут проводить частичный ток молнии. УЗИП могут не устанавливаться, если падение напряжения на экране не очень велико.

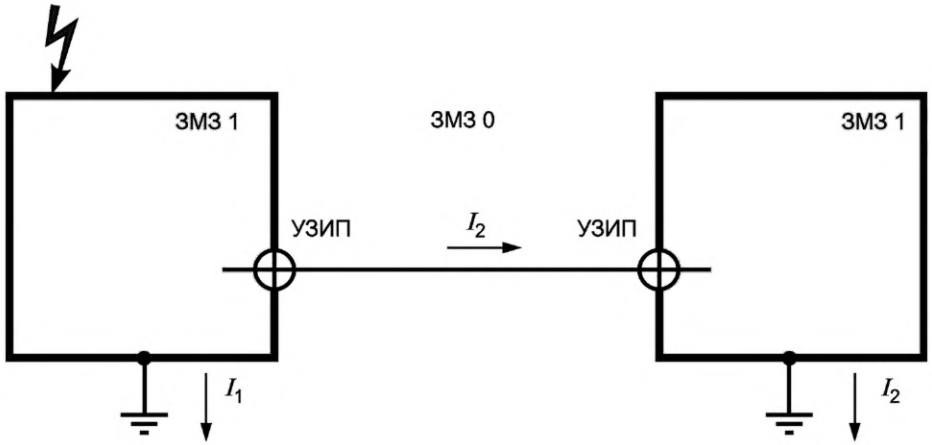


Рисунок 5 — Соединение двух зон ЗМЗ 1 с использованием УЗИП

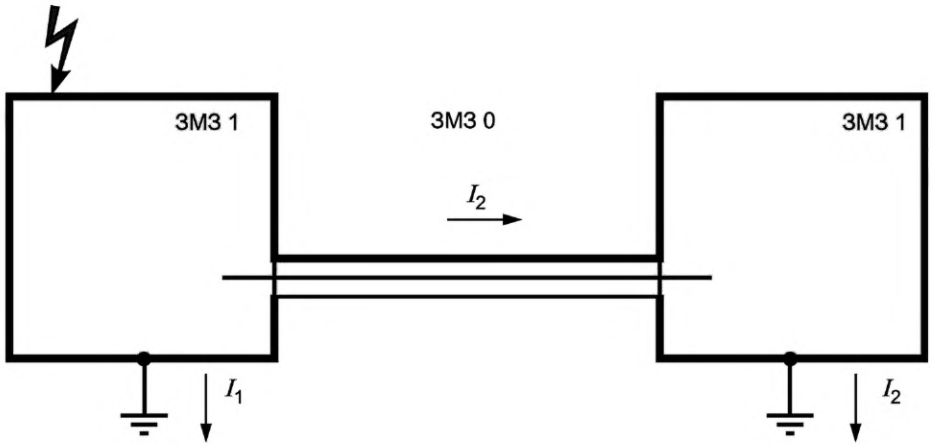


Рисунок 6 — Соединение двух зон ЗМЗ 1 с использованием экранированных кабелей или экранированных кабельных коробов

8.5.2 Уравнивание потенциалов внутри ВЭУ

Уравнивание потенциалов внутри ВЭУ согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-4* (см. также *[13]*) должно гарантировать, что потенциально опасное искрение и дуга не возникнут между проводящими частями ВЭУ за счет электрических разрядов. Система уравнивания потенциалов обеспечивает защиту от на-

пряжения прикосновения и шагового напряжения во время разряда молнии. Система уравнивания потенциалов играет важную роль в снижении вероятности повреждения электрических систем и систем управления. Гальванические связи с малым сопротивлением предотвращают опасную разность электрических потенциалов между оборудованием внутри ВЭУ.

Для достижения наибольшего эффекта система уравнивания потенциалов должна максимально использовать большие металлические конструкции ВЭУ (т. е. главным образом башню, основание гондолы, раму гондолы и ступицу). Такие соединительные шины могут дополнительно снижать уровни магнитного поля, образующиеся вследствие молнии. Соединения уравнивания потенциалов, такие как те, которые изображены на рисунках *F.3* и *F.4*, способствуют равномерному распределению тока во внешних металлических конструкциях ВЭУ и таким образом уменьшают влияние электромагнитного поля внутри конструкции (например, внутри гондолы или башни).

Крупные металлические конструкции обеспечивают максимальное электромагнитное экранирование при электрическом соединении. Высокая эффективность электромагнитного экранирования достигается, когда непрерывное соединение элементов металлических конструкций выполнено с достаточно малыми интервалами.

Например, если соединения размещаются между металлическими платформами и стенкой мачты в нескольких местах, рассредоточенных вокруг границы «платформы — мачта», это обеспечит эффективное электромагнитное экранирование внутри мачты.

Большинство повреждений систем управления ВЭУ можно предотвратить при помощи уравнивания потенциалов и экранирования. Более подробно соединения системы уравнивания потенциалов ВЭУ рассмотрены в приложении *K*.

8.5.3 Защита от электромагнитных импульсов разрядов молнии и уровни устойчивости

8.5.3.1 Общие положения

Оценку необходимости дополнительной защиты оборудования в условиях отдельных ЗМЗ проводят по предельным значениям выдерживаемых оборудованием перенапряжений и токов. Предельные значения выдерживаемых оборудованием перенапряжений и токов (уровни устойчивости) устанавливают с помощью испытаний по электромагнитной совместимости (см. *[14]*).

Несмотря на установленные в данном случае требования минимальной устойчивости, оборудование всегда должно иметь уровень устойчивости, соответствующий уровню опасности условий окружающей среды в месте его установки.

Если испытание не пройдено, то должен быть выполнен индивидуальный анализ уровня помехоустойчивости. Если технические требования изготовителя предусматривают внешнюю защиту или меры, четко указанные в руководстве по эксплуатации, то следует использовать требования к испытаниям с внешним защитным устройством или локальные меры.

8.5.3.2 Устойчивость портов электропитания

Уровни импульсной прочности оборудования силовых портов определены в *ГОСТ 30804.6.2* и проверяются испытаниями согласно *ГОСТ IEC 61000-4-5*. Минимальные требования к устойчивости к импульсным нагрузкам следующие.

Порты переменного тока (230 В/400 В):

- ± 2 кВ фаза — земля;
- ± 1 кВ фаза — фаза;
- следует выполнять дополнительные требования к уровню прочности/устойчивости изоляции в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 60664.1*.

Порты постоянного тока (50 В):

- ± 1,0 кВ линии на землю;
- ± 0,5 кВ междуфазное;
- следует выполнять дополнительные требования к уровню прочности/устойчивости изоляции в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 60664.1*.

8.5.3.3 Устойчивость сигнальных портов оборудования

Уровни импульсной прочности оборудования для сигнальных портов определяют с учетом *[15]* и *[16]* для телекоммуникационных портов и *ГОСТ 30804.6.2, ГОСТ IEC 61000-4-5* для сигнальных портов в целом, для оборудования, установленного в помещениях заказчика и здании коммутатора соответственно. Требования по минимальной импульсной прочности для оборудования в помещениях заказчика следующие.

Телекоммуникационные порты:

- порт, соединенный с внешней линией (линией, идущей из здания), испытывают испытательным напряжением 1,5 кВ в общем режиме (порт относительно земли) и испытательным напряжением 1,5 кВ между сигнальными проводниками в дифференциальном режиме;

- порт, соединенный с неэкранированной внутренней линией (линией, полностью остающейся внутри здания, нет прямого подсоединения к внешней линии), испытывают испытательным напряжением 1 кВ в общем режиме.

Проведение испытаний сигнальных портов в целом не зависит от длины экранированных/неэкранированных участков кабеля. Испытания проводят испытательным напряжением 0,5 кВ в общем режиме, порт испытывают как неэкранированный (порт относительно земли).

8.5.3.4 Устойчивость электронных средств

Уровни электромагнитной помехоустойчивости электронных средств (или сопротивляемости) — по *ГОСТ IEC 61000-4-9* (см. также *[14]*). Минимальные требования по выдерживаемым импульсам:

±1 кА/м; 8/20 мкс по *ГОСТ IEC 61000-4-9*;

±100 А/м (колебательно затухающий) — см. *[14]*.

Устойчивость выбирают в соответствии с применением.

8.5.4 Экранирование и кабельная разводка

Экранирование является средством ослабления электромагнитного поля, что может существенно снизить уровни напряжений, индуцируемых в цепях.

Магнитное поле, возникающее внутри ЗМЗ при разряде молнии в конструкцию или в землю около нее, может быть ослаблено только пространственным экранированием ЗМЗ. Волны перенапряжений, индуцируемые в систему управления через подсоединенные кабели, могут быть минимизированы пространственным экранированием или прокладкой и защитой проводников (например, соединение оболочки кабеля с обоих концов с землей) или комбинацией обоих методов.

Магнитное экранирование и кабельная разводка должны отвечать требованиям *ГОСТ Р МЭК 62305-4*, а также требованиям по электромагнитной совместимости (см. *[13]*).

Материалы и размеры магнитных экранов должны отвечать требованиям *ГОСТ Р МЭК 62305-4—2016,* раздел 6.

Эффект от применения экранов и прокладки трассы проводников должен быть документирован по результатам анализа и/или проверки.

Оценка напряженности магнитного поля внутри ЗМЗ должна основываться на расчетах магнитного поля согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-4—2016, приложение А*. Допускается использовать компьютерное моделирование при условии, что адекватность использованных моделей проверена в соответствии с приложением *I*.

Оценку эффекта защиты путем экранирования выполняют по *ГОСТ Р МЭК 61587-3* (см. также *[17]*).

8.5.5 Система защиты от импульсных перенапряжений

8.5.5.1 Общие положения

Скоординированная система защиты от импульсных перенапряжений (SPD защита) состоит из набора тщательно подобранных, согласованных устройств защиты от перенапряжений УЗИП, установленных для уменьшения числа сбоев электрических и электронных систем.

Примечание — Координация системы защиты от импульсных перенапряжений включает соединительные цепи для обеспечения координации изоляции всех систем.

Скоординированная система защиты от импульсных перенапряжений ограничивает влияния грозовых перенапряжений и возникающих внутри коммутационных перенапряжений. Защита электрических систем и систем управления требует систематического подхода к согласованным УЗИП, предназначенным для электрических низковольтных систем и систем управления. Рекомендации по организации системы защиты от импульсных перенапряжений в зоне ВЭУ приведены в приложении *L*.

8.5.5.2 Размещение УЗИП

В соответствии с *ГОСТ Р МЭК 62305-4* УЗИП следует размещать на линии входа в каждую ЗМЗ:

- как можно ближе к границе ЗМЗ 1 необходимо установить УЗИП, проверенные током I_{imp} (испытание класса I) согласно классификации *ГОСТ IEC 61643-11*;

- как можно ближе к границе ЗМЗ 2 и выше и, если необходимо, как можно ближе к оборудованию, которое требует защиты, необходимо установить УЗИП, проверенные током I_n (испытание класса II) согласно классификации *ГОСТ IEC 61643-11*.

Если УЗИП не расположено у входа в ЗМЗ, в документации необходимо указать, что оборудование подсоединено с обоих концов входа и может выдержать ожидаемое перенапряжение. Также необходимо убедиться, что волна тока не нарушает магнитную обстановку в ЗМЗ, см. рисунок 7.

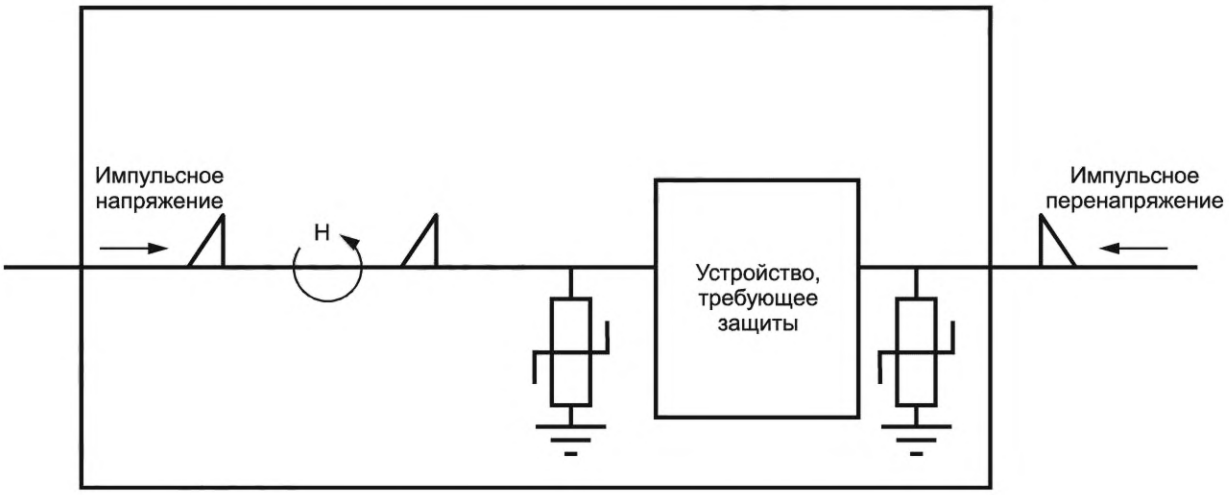


Рисунок 7 — Появление магнитного поля внутри замкнутой зоны из-за длинного соединительного кабеля от входа в эту зону до УЗИП

Когда расстояние между УЗИП и оборудованием, требующим защиты, более 10 м (длина кабеля), должна быть предусмотрена одна из следующих дополнительных мер защиты:

- размещение дополнительного УЗИП как можно ближе к оборудованию, требующему защиты (рисунок 8*a*). Уровень напряжения защиты U_P такого УЗИП не должен превышать требуемое номинальное выдерживаемое импульсное напряжение защищаемого оборудования U_W;
- применение одновводного УЗИП, установленного в или около начала электрической цепи (рисунок 8*b*). Их остающееся напряжение — уровень напряжения защиты U_P — не должно превышать 50 % требуемого номинального выдерживаемого импульсного напряжения защищаемого оборудования U_W;
- применение двухвводного УЗИП (*ГОСТ IEC 61643-11*), установленного на или около ввода электрической цепи (рисунок 8*c*). Уровень напряжения защиты U_P такого УЗИП не должен превышать требуемое номинальное выдерживаемое импульсное напряжение защищаемого оборудования U_W. Эту меру следует применять вместе с другими мерами, такими как использование экранированной проводки во всех защищаемых цепях.

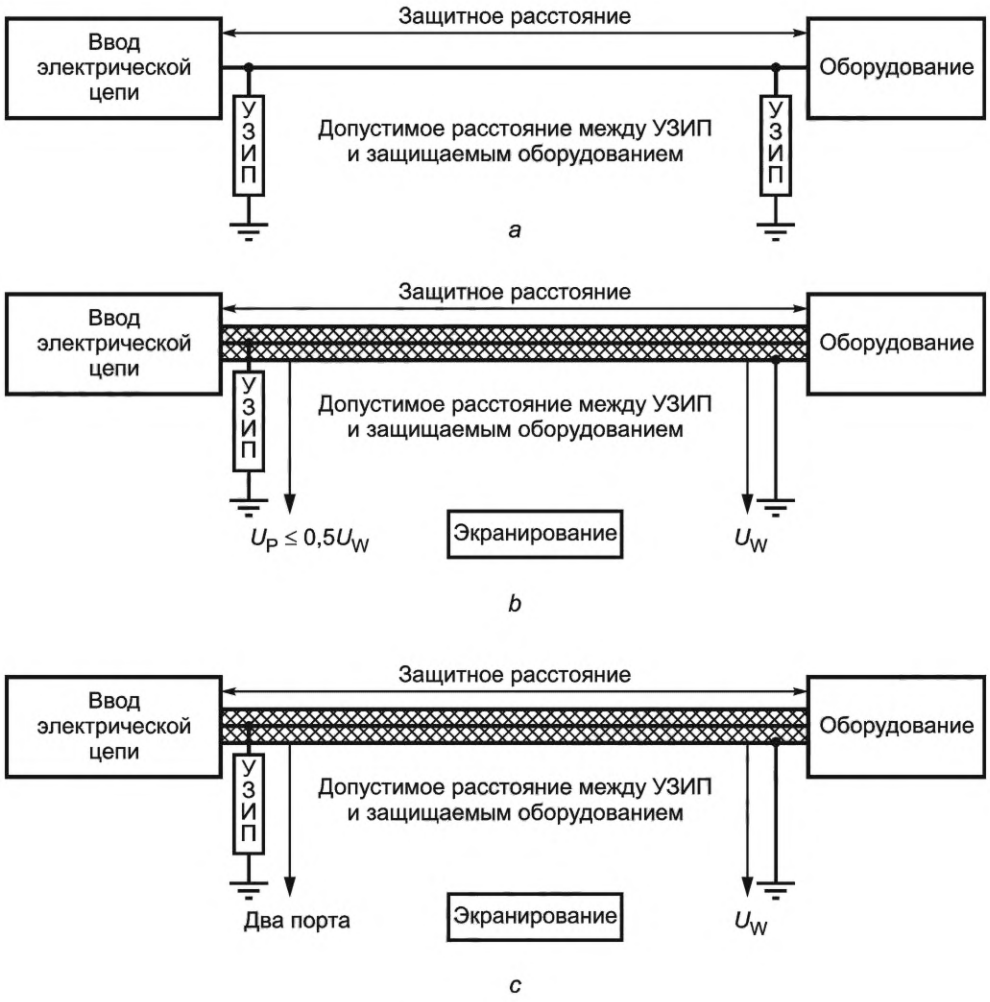


Рисунок 8 — Дополнительные меры защиты

8.5.5.3 Выбор УЗИП

УЗИП, которые должны выдерживать неполный ток молнии с обычной формой волны 10/350 мкс, должны пройти испытания импульсным испытательным током I_{imp}, соответствующим процедуре испытаний класса I согласно *ГОСТ IEC 61643-11*.

УЗИП, которые должны выдерживать индуктированные импульсные токи с обычной формой волны 8/20 мкс, должны пройти испытания импульсным испытательным током I_{imp}, соответствующим процедуре испытаний класса II согласно *ГОСТ IEC 61643-11*.

УЗИП должны соответствовать:

- *ГОСТ IEC 61643-11* в отношении систем электропитания;
- *ГОСТ IEC 61643-21* в отношении телекоммуникационных и сигнальных систем.

8.5.5.4 Монтаж УЗИП

УЗИП должны соответствовать правилам монтажа, указанным:

- в *ГОСТ Р 50571.4.44, ГОСТ Р 50571.5.53* и *ГОСТ IEC 61643-12* в отношении защиты линий электропитания;
- *ГОСТ IEC 61643-22* для защиты линий управления и телекоммуникационных систем.

Места размещения УЗИП должны быть задокументированы, например показаны на чертежах и электромонтажных схемах в соответствии с системой защиты от импульсных перенапряжений. Для УЗИП, установленных в разных границах ЗМЗ, и возможных компонентов защиты от перенапряжений, установленных внутри оборудования, должны быть выполнены требования по энергетической координации в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 62305-4* и *ГОСТ IEC 61643-12.*

Согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-4* необходимо проанализировать согласование УЗИП в электрических системах и системах управления. Документация должна включать достаточное количество информации по поводу того, как осуществляется согласование УЗИП.

Дополнительные указания относительно соединений для уравнивания потенциалов (заземления) и кабельной разводки в электрических системах и системах управления, а также по монтажным работам приведены в 8.5.1—8.5.4, примеры приведены в приложении *К*.

8.5.5.5 Воздействие окружающей среды

УЗИП должны выдерживать внешние нагрузки, характерные для места установки ВЭУ, такие как:

- температура окружающей среды;
- влажность;
- коррозионно-активная атмосфера;
- вибрационные и механические нагрузки.

Если изготовитель ВЭУ не указал специальных значений, то считают, что УЗИП, установленные в гондоле или башне установки, испытывают напряжения за счет вибрации со следующими параметрами:

- частота — 0,1—10 Гц;
- ускорение — 0,5 м/с^2.

Эти стандартные значения выдерживаемой УЗИП вибрации, которые используются в системах ВЭУ, основываются на *[18]* и могут использоваться при отсутствии другой информации.

В зависимости от условий в точке размещения отдельных частей ВЭУ могут возникнуть дополнительные и специфические требования к исполнению и размещению систем защиты от импульсных перенапряжений. При необходимости изготовитель ВЭУ должен учитывать условия окружающей среды для конкретных точек ВЭУ, например гондолы и ступицы.

8.5.5.6 Техобслуживание

Техобслуживание и замену УЗИП следует проводить в соответствии с планом техобслуживания, указанном в руководстве по техобслуживанию ВЭУ.

УЗИП следует устанавливать таким образом, чтобы была возможность их осмотреть и заменить.

8.5.5.7 Контроль УЗИП

Возможно, возникнет необходимость осуществлять контроль за защитой важных элементов электрических систем и систем управления ВЭУ при помощи УЗИП.

8.5.5.8 Выбор УЗИП по уровню напряжения защиты и устойчивости системы

Необходимый уровень напряжения защиты U_P в зоне молниезащиты должен быть определен согласно установленных уровней устойчивости оборудования в ЗМЗ, как это описано в 8.5.3.

8.5.5.9 Выбор УЗИП по максимальному длительному рабочему напряжению

Особые требования по максимальному длительному рабочему напряжению U_c могут применяться к системам защиты от импульсных перенапряжений из-за больших вариаций напряжения и временных повышений напряжения в электрической системе, в которую входит ВЭУ.

В таких случаях анализом и/или испытаниями должны быть определены соответствующие части электрических систем, уровни напряжения, уровни тока и длительность, и с их учетом выбраны УЗИП.

Для выбора систем защиты от импульсных перенапряжений дополнительно необходимо определить следующие параметры источника тока возбуждения генератора и основной (линейной) цепи источника:

- максимальные напряжения (фаза — фаза и фаза — земля), включая пределы изменения;
- максимальное длительное рабочее напряжение U_c с учетом того, чтобы обеспечить устойчивость к повторяющимся переходным процессам, накладываемым на рабочее напряжение;
- максимальную частоту;
- рабочую частоту с учетом частоты коммутаций источника.

Дополнительные примеры приведены в приложении *L*.

Должно быть представлено подтверждение, что выбранные УЗИП могут выдерживать эти специальные уровни напряжения.

8.5.5.10 Выбор УЗИП по номинальному разрядному току I_n и импульсному току I_{imp}

Рекомендуется провести анализ распределения тока молнии внутри ВЭУ согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-1* и *ГОСТ Р МЭК 62305-4*. На основании данных расчетов УЗИП могут быть выбраны по номинальному разрядному току I_n и импульсному току I_{imp}.

Для защиты особо уязвимых цепей могут быть необходимы более высокие номинальные значения токов УЗИП, чем те, которые указаны в *ГОСТ Р 50571.5.53*, или же такие цепи необходимо экранировать. Такие цепи, особенно подверженные высоким нагрузкам или повторным нагрузкам, должны

быть идентифицированы путем анализа. Если возможно, такие особо уязвимые цепи в электрических системах и системах управления ВЭУ должны быть указаны изготовителем ВЭУ на электромонтажных схемах. Подробная информация приведена в приложении *L*.

8.5.5.11 Выбор УЗИП по току короткого замыкания и скорости прерывания остаточного тока

Уровень выдерживаемого тока короткого замыкания для комбинации УЗИП и устройства защиты от сверхтоков (УЗС), например предохранителя и уровень прерывания сопровождающего тока в УЗИП, указанный изготовителем УЗИП, должны быть более или равны максимальному току короткого замыкания, ожидаемому в этой точке. Кроме того, если уровень прерывания сопровождающего тока объявлен для УЗИП, должно быть подтверждено расчетами или испытаниями, что установленное в конкретной силовой цепи УЗС не функционирует.

8.5.5.12 Поведение УЗИП в случае воздействия нескольких ударов молний

Вследствие относительно высокой частоты ударов молнии в ВЭУ и критического характера установки УЗИП в ВЭУ УЗИП должны выдерживать множественные поражения молниями.

8.5.5.13 Защита от коммутационных перенапряжений, создаваемых внутри ВЭУ

Переходное электрическое и импульсные перенапряжения, вызываемые операциями коммутирования в электрических системах (коммутационный электромагнитный импульс, SEMP), также должны учитываться. Тем не менее это выходит за рамки рассмотрения настоящего стандарта. Общую информацию рекомендуется смотреть в *ГОСТ Р 55630*, где обсуждаются коммутационные перенапряжения.

Защита от коммутационных перенапряжений может быть обеспечена за счет размещения УЗИП как можно ближе к месту возникновения таких угроз. Перенапряжения при коммутациях могут быть более длительными и могут содержать больше энергии, чем переходные перенапряжения атмосферного происхождения. Это следует учитывать при выборе УЗИП по номинальному разрядному току и импульсному току.

В *L.7* приведена информация по выбору УЗИП по перенапряжениям, возникающим внутри ВЭУ.

8.5.6 Испытания на помехоустойчивость

Испытания на помехоустойчивость системы защиты от импульсных перенапряжений проводят согласно приложению *M* — для систем с портами электропитания или сигнальными портами, соединенными с линиями, входящими от ЗМЗ 0_A или 0_B (с неполными токами молнии, протекающими в этих линиях). Стандартными примерами таких систем являются системы управления и аварийной сигнализации, установленные наверху гондолы, например заградительные огни, электроника внутри лопастей.

Дополнительная информация об уровне помехоустойчивости других электрических систем испытания приведена в приложении *M* (см. также 8.5.5.8).

8.6 Электрические системы высокого напряжения

Крупные ВЭУ обычно подключены через высоковольтный трансформатор к подземной высоковольтной кабельной системе, которая может подсоединять группу ВЭУ либо напрямую к сети, либо к трансформаторной подстанции, повышающей напряжение до уровня распределительной системы.

Высоковольтный трансформатор ВЭУ обычно размещают в гондоле, внизу мачты или рядом с мачтой установки ВЭУ.

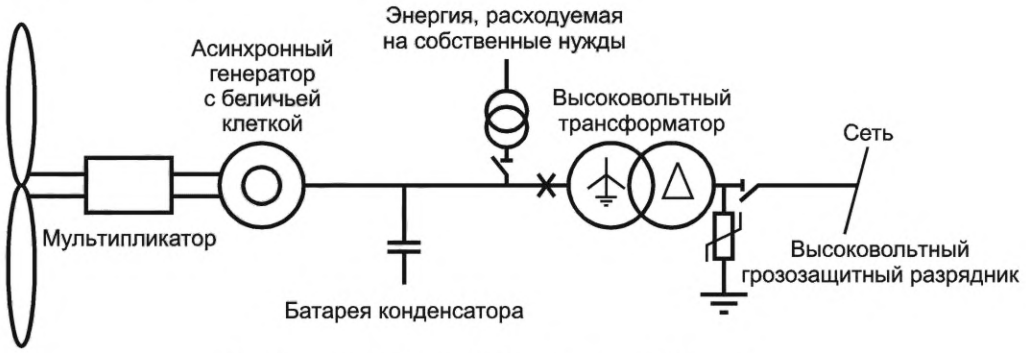
Высоковольтные устройства защиты от импульсных перенапряжений обычно называют высоковольтными разрядниками. Применяемые для ВЭУ высоковольтные разрядники служат для защиты трансформатора и высоковольтной системы в целом от повышения электрического потенциала земли вследствие токов молнии, проходящих через систему заземления, а также для защиты от переходных напряжений, входящих в ВЭУ от высоковольтной кабельной системы за пределами ВЭУ. Необходимость в установке высоковольтных разрядников на стороне высокого напряжения трансформатора следует проанализировать исходя из принципов *ГОСТ Р МЭК 62305-2* (см. также *[19]*, *раздел 7 и приложение B*).

Оценка уровней переходных процессов, идущих от высоковольтной кабельной системы за пределами ВЭУ, требует специального моделирования переходных процессов в электрической сети. Оценку проводят с учетом *[19]*. Если такую оценку не выполняют, в качестве общей меры предосторожности рекомендуется использовать высоковольтные разрядники. Указания по моделированию переходных процессов в сети приведены в *ГОСТ Р МЭК 62305-4*.

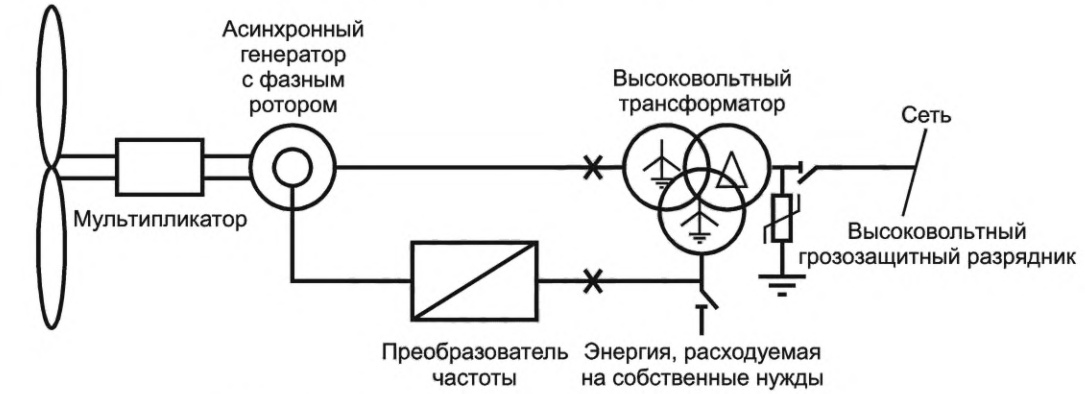
Высоковольтные разрядники должны быть металлооксидными, без искровых промежутков (см. *[20]*), их следует выбирать и применять в соответствии с *ГОСТ Р 53735.5*.

Высоковольтные разрядники предпочтительно размещать на выводах высоковольтного трансформатора, как показано на рисунке 9, обеспечивая, таким образом, максимальную защиту трансформато-

ра. Допускается размещать высоковольтные разрядники на расстоянии от защищаемого объекта, допустимое расстояние определяется расчетами. Между разрядником и защищаемым элементом обычно допускается расстояние до 10 м. Если расстояние больше, то необходимо провести более детальный анализ и решить, могут ли разрядники в основании башни обеспечить необходимую защиту трансформатора, расположенного в гондоле. Если трансформатор размещается снаружи башни, следует соединить систему заземления трансформатора с системой заземления ВЭУ, рекомендуется, чтобы это была одна система заземления.



a – асинхронный генератор с беличьей клеткой



b – асинхронный генератор с фазным ветроколесом/ротором

Рисунок 9 — Примеры размещения высоковольтных разрядников в двух типовых основных электрических цепях ВЭУ

УЗИП на стороне низкого напряжения высоковольтного трансформатора, скорее всего, будут являться общей мерой защиты, в частности, если с высоковольтной стороны через трансформатор могут проходить значительные импульсные воздействия токов переходных процессов, следует выбрать тип УЗИП, применимый для трансформатора (например, УЗИП с высокой энергоемкостью). Емкостные и индуктивные связи между низковольтной и высоковольтной сторонами трансформатора, учитываемые при импульсном воздействии, и, следовательно, уровни перенапряжений, переданные на низковольтную сторону, очень сильно зависят от конструкции трансформатора и, в частности, от заземляющего соединения обмотки низкого напряжения (см. дополнительную информацию в *[21], приложение Е*). Поэтому рекомендуется в качестве общей меры защиты устанавливать УЗИП на низковольтной стороне трансформатора или же получить от производителя достаточно детализированную модель трансформатора для изучения переходных режимов и принятия решения о необходимости в установке УЗИП на низковольтной стороне трансформатора.

Примечание — В *[22]* приведены общие требования к высоковольтным системам на машинном оборудовании.

9 Система заземления ВЭУ

9.1 Общие положения

9.1.1 Назначение

Для рассеивания токов молнии и предотвращения повреждения ВЭУ необходимо использовать эффективную систему заземления оборудования. Кроме того, система заземления защищает людей и домашний скот от удара электрическим током. Если происходит повреждение электрической сети, необходимо поддерживать напряжение прикосновения и шаговое напряжение, и общий подъем потенциала земли на безопасном уровне, пока защитные устройства не сработают и безопасно не прервут протекание тока повреждения. Система заземления должна рассеивать и отводить высокочастотный и высокоэнергоемкий ток молнии в землю без каких-либо опасных тепловых и/или электродинамических воздействий.

Рекомендуется устанавливать систему заземления ВЭУ, которая будет использоваться для молниезащиты, а также для заземления системы электропитания. Рекомендуется использовать в системе заземления металлические детали конструкции фундамента, т. к. использование металлических деталей в больших конструкциях фундамента приведет к самому низкому возможному сопротивлению заземления, и попытка отделить систему заземления от металлических деталей фундамента приведет к появлению опасности для конструкции, в частности, для бетонного фундамента.

В части предотвращения высокого шагового напряжения и напряжений прикосновения из-за сбоев высоковольтных элементов система заземления должна отвечать требованиям *ГОСТ Р 50571.5.54*, *ГОСТ Р 50571.16* (см. также *[23]* и *[24]*) и другим нормативным документам по высокому напряжению. Система заземления в части обеспечения безопасности людей — см. *[25]* и *[26]*.

Настоящий стандарт не включает определение систем молниезащиты и систем заземления для ВЭС, т. к. необходимы специальные исследования для каждой конкретной станции с учетом условий конкретной площадки, а также соединений между силовыми и телекоммуникационными системами ВЭУ и внешними системами. Указания в отношении систем заземления для ВЭС приведены в приложении *N*.

9.1.2 Основные требования

Система заземления ВЭУ должна обеспечить достаточную защиту от повреждений вследствие токов КЗ и ударов молнии, которые перехвачены установкой. Система заземления должна соответствовать уровню УМЗ разработанной системы защиты ВЭУ.

Система заземления должна удовлетворять четырем основным техническим требованиям:

a) обеспечение личной безопасности от напряжений прикосновения и шагового напряжения, появляющихся во время замыкания на землю и воздействия тока молнии;

b) предотвращение повреждения оборудования;

c) выдерживание тепловых и электродинамических нагрузок, которые будут воздействовать во время короткого замыкания и воздействия молнии;

d) длительная достаточная механическая прочность и коррозийная устойчивость.

9.1.3 Заземляющие устройства

Применяют два основных типа заземляющих устройств по *ГОСТ Р 59789*:

- заземляющее устройство типа А — данное устройство не рекомендуется для ВЭУ, но может использоваться для малых сооружений (например, зданий, в которых находится измерительная аппаратура, или подсобных сооружений, которые подсоединены к ВЭС). Заземляющие устройства типа А имеют горизонтальные или вертикальные электроды, подключенные как минимум к двум вертикальным молниеотводам на конструкциях.

Примечание — Дополнительную информацию по установкам типа А см. в *ГОСТ Р 59789—2021, подпункт 5.4.2.1*;

- заземляющее устройство типа В — данное устройство рекомендуется для ВЭУ. Заземляющее устройство типа В включает в себя или внешний кольцевой заземляющий электрод, находящийся в контакте с землей на протяжении как минимум 80 % его общей длины, или заземляющий электрод фундамента. Кольцевые электроды или металлические детали в фундаменте должны быть подсоединены к конструкции башни.

9.1.4 Сопротивление системы заземления

Сопротивление системы заземления не влияет на эффективность системы молниеприемников и системы вертикальных молниеотводов. Система заземления должна иметь наиболее низкий возможный уровень полного импульсного сопротивления для снижения перепада полного напряжения (напри-

мер, уменьшения повышения полного электрического потенциала земли), для снижения неполного тока молнии, идущего в линии коммуникации, соединенные с ВЭУ, и снижения риска искрового перекрытия на другие линии коммуникаций вблизи системы заземления.

Разработчик фундамента должен описать в документации средства защиты, примененные для снижения нарастания потенциала земли при прямом воздействии молнии с импульсом тока *I* с длительностью фронта, соответствующей уровню УМЗ I. В документации должно быть описано, как достигнуто соответствие *ГОСТ Р 59789*, и как перенапряжения, обусловленные частотно зависимыми импедансами системы заземления, согласуются с напряжением прикосновения и шагового напряжения, подъемом напряжения на заземлителе при постоянном токе и кратковременных воздействиях.

Дополнительная информация приведена в *О.2.2*.

9.2 Уравнивание потенциалов

9.2.1 Общие положения

Уравнивание потенциалов обеспечивается путем соединения СМЗ:

- с проводящими элементами конструкции ВЭУ;
- металлическими конструкциями (определение — см. 3.36);
- внутренними системами;
- внешними проводящими элементами и линиями коммуникаций, подведенными к конструкции.

Когда уравнивание потенциалов используют для внутренних систем, часть тока молнии может идти в эти системы, и это воздействие необходимо учитывать.

Способ, с помощью которого осуществляется уравнивание потенциалов линий коммуникаций, таких как линии электропитания или линии связи, имеет большое значение, и он должен быть рассмотрен вместе с оператором сети электросвязи, оператором системы электропитания и другими операторами или уполномоченными лицами, т. к. могут быть противоречивые требования.

9.2.2 Уравнивание потенциалов металлического оборудования при растекании тока молнии

Соединения для уравнивания потенциалов при растекании тока молнии должны быть по возможности непосредственными и прямыми.

Минимальные значения поперечного сечения проводников системы уравнивания потенциалов (заземления), соединяющих внутренние металлические части с заземляющими шинами/точками, указаны в *ГОСТ Р 59789*.

9.3 Элементы конструкции ВЭУ

9.3.1 Общие положения

В большинстве случаев все проводящие конструкционные элементы ВЭУ будут проводить часть тока молнии, и поэтому должно быть осуществлено уравнивание потенциалов проводящих конструкционных элементов.

9.3.2 Металлическая трубчатая башня

Башню считают первичным защитным заземленным проводником и эквипотенциальным соединением.

Из-за большой высоты возможно прямое поражение молнией конструкции башни, что следует учитывать при ее проектировании. Все электрические проводящие элементы и все основные металлические детали, которые могут проводить ток, должны быть соединены с башней. Башню используют как молниеотвод и проектироваться таким образом, чтобы ток молнии мог беспрепятственно проходить вдоль башни.

9.3.3 Металлическая башня с железобетонным закреплением

Башню считают первичным защитным заземленным проводником и эквипотенциальным соединением. Из-за большой высоты возможно прямое поражение молнией конструкции башни, что следует учитывать при ее проектировании (см. *ГОСТ Р 59789*).

Если с железобетонными башнями используют внешние системы молниезащиты, они должны быть соединены с ее стальной арматурой.

Выводы системы уравнивания потенциалов, подсоединенные к стальной арматуре, должны быть размещены в точках, предназначенных для подключения оборудования внутри башни. Проектирование башни — см. 9.3.6.

Из-за большой высоты башни проектируют как «гибридные башни», где верхняя часть проектируется в виде металлической трубчатой башни (см. 9.3.2), а нижняя часть проектируется как металличе-

ская башня с железобетонным закреплением. Особое внимание должно уделяться соединениям уравнивания потенциала, находящимся между верхней и нижней частями башни. Эти соединения должны распределяться вокруг поверхности платформы башни в нескольких положениях на равном расстоянии по периметру, чтобы обеспечивать эффективное электромагнитное экранирование внутри башни и защиту внутреннего оборудования. Эти соединения должны выдерживать электромеханические и тепловые воздействия тока молнии (см. *ГОСТ Р 59789*). Это может достигаться путем выбора элементов, которые были успешно испытаны согласно *ГОСТ Р МЭК 62561.1*.

Для железобетонных башен, которые частично или полностью построены из элементов и заанкерованной стальной проволоки, тросов натяжения, фланцев и подобных элементов (например, отлитые модули башни), все части и соединительные детали таких систем должны быть способны выдерживать влияние проведения тока молнии соответствующего уровня и соответствующих электродинамических сил (см. *ГОСТ Р 59789*) без смягчения требований к механическим частям.

9.3.4 Решетчатая башня

Решетчатая башня защищает внутреннюю область башни от прямого поражения молнией и обеспечивает некоторое ослабление электромагнитного поля молнии, поэтому пространство внутри башни определяют как ЗМЗ 0_B. Отвод тока молнии происходит через конструкционные элементы решетчатой башни, габаритные размеры которых должны быть как у молниеотводов в соответствии с *ГОСТ Р 59789*, с учетом перераспределения тока по параллельным путям.

Некоторая защита для кабелей может быть достигнута путем размещения их во внутренних углах металлических профилей стойки башни. Экранирующие кабелепроводы или кабельные коробки, установленные внутри башни, будут также обеспечивать защиту.

9.3.5 Системы внутри башни

Область внутри башни должна иметь свою молниезащиту (одну или несколько зон), с уровнем защиты, требуемым для внутреннего оборудования по 8.5.

Система лестниц должна быть соединена проводниками системы уравнивания потенциалов с башней на каждом конце и на каждой платформе. Соединения должны обеспечить, чтобы напряжение прикосновения и шаговое напряжение не превышали значений, указанных в *ГОСТ Р 59789*.

Перила, направляющие для лебедок, гидравлическая система, провода для индивидуальной защиты и прочие компоненты, проходящие через башню, должны быть соединены проводниками системы уравнивания потенциалов на каждом конце.

Если в проекте делается упор на разделительные расстояния, то это должно быть специально оговорено и документировано.

Система заземления высоковольтного трансформатора должна быть соединена с системой заземления ВЭУ. Не рекомендуется использовать раздельные системы заземления для систем питания и молниезащиты.

9.3.6 Бетонный фундамент

Металлическая арматура фундамента ВЭУ, которая всегда является частью пути прохождения тока молнии или тока повреждения до удаленной земли из-за механических и электрических соединений с башней фундамента, всегда должна рассматриваться как часть СМЗ.

Следует убедиться в электрической непрерывности стального каркаса железобетонных конструкций. Стальной каркас железобетонных конструкций имеет непрерывный электрический контакт, если соединены основные части вертикальных и горизонтальных стержней. Соединения металлической арматуры должны быть либо сварными, либо зажимными, либо внахлест с перекрытием, как минимум, в 20 раз превышающем диаметр соединяемой арматуры, а также должны быть соединены токопроводящей нитью или иным образом, чтобы в итоге было обеспечено надежное электрическое соединение. Особое внимание необходимо обращать на межкомпонентные соединения для предотвращения повреждения бетона вследствие локального образования дуги между контактами.

Соединения между элементами арматуры должны быть определены разработчиком, а монтажник должен проверить качество соединений. Требование по использованию коротких и прямых соединений для молниезащитного заземления должно учитываться всегда.

Если металлическая арматура используется для защитного заземления системы питания, то толщина металлических арматурных стержней и соединений должна соответствовать требованиям к системам заземления системы питания, которые обычно указываются в электротехнических правилах и нормах.

Выводы для дополнительного соединения, измерения или расширения системы заземления/уравнивания потенциалов должны быть сделаны в определенных местах фундамента.

9.3.7 Фундамент в скальных районах

На скалистых участках самое низкое удельное сопротивление обычно наблюдается на поверхности скалы. В *[27]* даны карты с указанием регионов, где предполагается наличие скальных пород с высоким удельным сопротивлением 1 мС/м или менее (удельное сопротивление 1000 Ом или более).

В скальных районах следует использовать систему заземления типа В (информацию о ее конструкции см. в *О.1.1*).

Необходимо провести исследование по повышению низкочастотного потенциала земли с целью исследования условий отдельной площадки, и проект системы заземления должен основываться на результатах исследования, и должны быть выполнены требования по допустимому напряжению прикосновения и шаговому напряжению.

Болты анкерного крепления должны быть соединены между собой и с кольцевой системой заземления. Если используется железобетон, то см. 9.3.6.

На скалистых участках, возможно, не получится достичь низкого сопротивления заземления без использования протяженных заземлителей (противовесов). В таких районах акцент делают на контроле разности потенциалов на поверхности, обеспечивающей ограничение напряжения прикосновения и шагового напряжения в местах возможного нахождения людей и скота. Данное ограничение может быть достигнуто, например, с помощью размещения одного или нескольких кольцевых электродов вокруг ВЭУ и других установок, предоставляя в то же время защиту от перенапряжений для всех линий коммуникаций, соединяющих ВЭУ с системой сбора энергии и системами связи (см. 8.5).

9.3.8 Фундамент на металлических сваях

Фундамент на металлических сваях по своей природе является большим заземляющим электродом. Его следует использовать как первичный заземляющий электрод.

В зависимости от удельного сопротивления грунта для контроля градиента потенциала поверхности вблизи фундамента могут быть необходимы кольцевые электроды.

9.3.9 Фундамент в море

В целом, удельное сопротивление морской воды значительно ниже, чем почвы (см. информацию по удельному сопротивлению морской воды в *[27]*). Поэтому для ВЭУ, установленных в прибрежной зоне, считается достаточным выполнение требований к системе заземления фундаментов ВЭУ, размещенным на суше, например фундамента на металлических сваях или железобетонного фундамента, при этом дополнительные меры, такие как кольцевой электрод и т. п., не требуются. Взаимное соединение фундаментов обычно не требуется, кроме соединения экранов кабелей системы сбора энергии с заземлением на обоих концах.

Внешние системы заземления из меди не могут быть использованы для фундамента в прибрежной зоне из-за коррозии.

9.4 Размеры электродов

Минимальная длина l_1 заземляющих электродов зависит от уровня молниезащиты (I—IV) и удельного сопротивления грунта.

Для удельного сопротивления грунта выше 500 Ом · м минимальная длина l_1 линейно увеличивается до 80 м при удельном сопротивлении грунта 3000 Ом · м.

Установка типа В включает или кольцевой проводник с внешней стороны защищаемой конструкции, который находится в контакте с землей на протяжении как минимум 80 % его общей длины, или заземляющим электродом служит фундамент. Такие заземляющие электроды могут быть сетчатыми.

Для кольцевого заземляющего электрода (или заземлителя-фундамента) средний радиус r_e области, охватываемой кольцевым заземляющим электродом (или заземлителем-фундаментом), должен быть не менее l_1:

$$r_e \geq l_1. \tag{20}$$

Значения l_1 приведены в приложении *О*, рисунок *О.1* в зависимости от уровней СМЗ I, II, III и IV.

Если требуемое значение l_1 больше подходящего значения r_e, следует добавить дополнительные горизонтальные или вертикальные (или наклонные) электроды длиной l_r (для горизонтальных) и l_v (для вертикальных), получаемых при помощи следующих уравнений:

$$l_r = l_1 - r_e; \tag{21}$$

$$l_v = (l_1 - r_e)/2. \tag{22}$$

Количество электродов должно быть не менее двух.

Дополнительные электроды следует размещать как можно более равномерно, по возможности на равном расстоянии друг от друга.

Установленная минимальная длина l_1 может быть проигнорирована, если сопротивление системы заземления менее 10 Ом, измеренных при частоте, отличающейся от частоты сети 50—60 Гц, и, следовательно, при гармонических колебаниях низшего порядка.

Информация по стабильности электропроводности почвы, ожидаемому току короткого замыкания на землю и времени его отключения является крайне важной при проектировании конструкции и установке системы заземления.

Удельное сопротивление разных видов грунта значительно отличается. Методы определения необходимого заземляющего электрода в соответствии с его геометрическими и физическими формами приведены в приложении *О*.

9.5 Исполнение и техническое обслуживание

Разработчик системы заземления должен подготовить план монтажа, в котором описывается схема системы заземления с подробной информацией по точкам подсоединения, использованию соединителей, зажимов и швов, положению и количеству выходов, а также их типу и качеству.

Проверку следует проводить в ходе строительства, особенно перед заливкой бетона.

Если необходимо, измеряют сопротивление заземления.

В руководстве по техническому обслуживанию и эксплуатации должно быть описано, как часто и каким образом следует проводить проверки и техобслуживание системы заземления. Разработчик ВЭУ должен согласовать с оператором периодичность проверок. Необходимо учитывать агрессивную среду, в зависимости от которой возможно понадобится проводить более частые проверки.

Если установлено, что элементы в системе заземления имеют определенный срок службы, то интервал между проверками не может быть больше самого короткого расчетного срока службы элемента.

10 Безопасность персонала

Монтаж больших ВЭУ на суше занимает несколько дней, если включать время, необходимое для сборки и демонтажа очень больших используемых кранов. С другой стороны, морские ВЭУ можно установить в течение дня при использовании специальных судов или самоподъемных платформ. В любом случае, обычно в течение нескольких недель после возведения ВЭУ и до введения ее в эксплуатацию, проводят завершающие работы. В течение этого периода большое количество людей работает внутри, на и в непосредственной близости с ВЭУ. В указанный период персонал подвергается значительному риску поражения молнией в случае ударов молнии в ВЭУ.

Поэтому необходимо установить правила техники безопасности в отношении ударов молнии. Эти правила должны включать:

- регулярное изучение местных метеорологических сводок (например, каждое утро);
- обучение персонала оказанию первой медицинской помощи при получении травм молнией и травм вследствие поражения электрическим током;
- незамедлительное использование переходных соединителей системы заземления;
- оборудование безопасных мест;
- информацию о сигналах молниевой опасности для всех присутствующих на площадке;
- персональные инструкции в отношении:
    - организации наблюдений за образованием грозовых облаков, слышимым громом и видимой молнией;
    - признаков, показывающих наличие грозовых электрических полей высокого напряжения: наэлектризованные волосы, шумы от плохих контактов или свечение на заостренных элементах конструкций (например, у воздушных систем перехвата ударов молнии);
    - необходимости прекращения работы и перемещения в ближайшее безопасное место при наличии данных признаков или в случае получении предупреждающих сигналов о молниевой опасности.

Эти правила техники безопасности следует включить в план по охране здоровья и технике безопасности для строительной площадки, а также следует включить в руководство по установке ВЭУ, в руководства по техническому обслуживанию и эксплуатации, предоставляемые поставщиком ВЭУ.

Безопасные места должны быть четко обозначены маркировкой (например, условными знаками).

Метеорологические бюро обычно составляют достаточно точные прогнозы грозовых дней и могут оказывать услуги по предупреждению о молниевой опасности по телефону, факсу или сети Интернет, которые должны обязательно учитываться. Получение данных услуг следует предусмотреть в процессе возведения и строительства, при этом необходимость инструктирования людей о ведении наблюдения за образованием грозовых облаков, громом (слышимым на расстоянии 10—15 км) и молнией (видимой на расстоянии ~30 км) является обязательной. Различные изготовители выпускают локальные или даже портативные детекторы молний и грозовых явлений, которые могут быть полезны. Дополнительную информацию по системам мониторинга молний см. в приложении *Р*.

Некоторые системы грозового оповещения могут не выдавать предупреждения по всем вспышкам молнии, особенно по первой вспышке молнии в образующейся грозе (см. *[28]* по системам грозового оповещения), поэтому крайне важно, чтобы весь персонал был осведомлен об опасности молнии в целях безопасности.

Во время строительных работ краны, генераторы и т. п. необходимо подсоединить к системе заземления как можно быстрее.

Люди, работающие на наружной стороне гондолы и на лопастях, находятся в зоне риска точно так же, как и люди, передвигающиеся по башне ВЭУ, стоящие рядом с башней, взбирающиеся по лестнице, прикасающиеся к электрическим цепям или работающие с ними, с аппаратной системой связи и т. п., и будут подвергаться опасности, если молния ударит в ВЭУ. Поэтому им необходимо дать указание прекратить работу, идти в безопасное место и находиться там до момента прекращения опасности.

Платформы внутри пустотелых башен в целом считаются безопасными местами, т. к. башня образует практически идеальную клетку Фарадея. Людям, находящимся на ВЭУ, следует дать указание прекратить работу, идти до ближайшей платформы внутри башни и оставаться там до тех пор, пока гроза не пройдет. Другие безопасные места — внутри металлических тележек на крыше, металлических контейнеров и т. п.

Чтобы не было трудностей с передачей сообщений на большой по площади строительной площадке, рекомендуется установить какой-нибудь акустический сигнал предупреждения, радио или подобные эффективные средства предупреждения (это может быть просто многократное звучание автомобильного или пневматического гудка).

В документации по ВЭУ должны быть определены безопасные места в ВЭУ, включая необходимые безопасные расстояния для персонала и другие меры предосторожности, которые необходимо соблюдать, находясь в безопасном месте, как, например, указания, что людям следует стоять или сидеть на платформе и избегать касания электропроводящих систем, проходящих вертикально внутри башни, таких как системы электропитания.

Расчет безопасного расстояния для персонала, чтобы избежать неконтролируемых пробоев для персонала в безопасных местах, выполняют по *ГОСТ Р 59789*.

11 Документация системы молниезащиты

11.1 Общие положения

Данный раздел включает описание минимально необходимой документации/информации, необходимой для выполнения требований других разделов настоящего стандарта.

Документация системы молниезащиты может либо представлять собой общий документ с описанием реализации молниезащиты ВЭУ, либо содержать ссылки на другую документацию, где имеется информация.

11.2 Документация, необходимая для анализа конструкции

11.2.1 Общая документация

Общая документация должна содержать данные по ВЭУ в целом, с описанием используемого принципа защиты и ссылки на другие, более подробные документы по лопастям ветроколеса, механическим, электрическим системам, системам уравнивания потенциалов, заземления и другим системам (см. 11.2.2—11.2.6).

Общая документация должна содержать как минимум следующее:

а) общий чертеж системы молниезащиты ВЭУ, включающий:

1) отдельные конструкции и соединения;

2) электрические схемы с зонами молниезащиты с указанием их границ (в приложении *F* приведены основные примеры такой документации);

3) молниеотводы;

4) размещение вертикальных молниеотводов;

5) заземляющие электроды и контроль поверхностного потенциала;

6) расположение соединений и шин системы уравнивания потенциалов/заземления;

7) размещение УЗИП;

8) точки соединения защитного экрана кабеля;

b) описание СМЗ:

1) описание того, как ток молнии выводится из точек перехвата через ВЭУ в систему заземления;

2) уровень молниезащиты, используемый при проектировании;

3) если используется уровень ниже УМЗ I, то документально оформленную оценку риска;

4) анализ распределения тока молнии в ВЭУ;

5) выбор и подтверждение согласования УЗИП;

6) спецификацию на используемые материалы, включая коррозионные свойства и защиту от коррозии;

7) идентификацию изнашиваемых частей и необслуживаемых частей СМЗ;

c) процедуры по обеспечению безопасности персонала.

11.2.2 Документация по лопастям ветроколеса

Документация лопастей ветроколеса должна содержать как минимум следующее:

a) чертеж лопастей ветроколеса, включающий:

1) площади поперечного сечения вертикального молниеотвода;

2) любые дополнительные проводящие элементы;

3) соединения между отдельными компонентами вертикального молниеотвода;

b) описание, которое содержит:

1) установку молниеприемников и системы вертикального молниеотвода;

2) предпринимаемые меры, чтобы избежать дугового пробоя в лопасти;

3) определение необходимого осмотра и техобслуживания молниеприемников, искровых зазоров или скользящих контактов;

4) определение необходимого осмотра и техобслуживания системы вертикальных молниеотводов и соединительных элементов;

5) инструкции по проведению проверок и техобслуживанию, включая определение критериев замены изнашиваемых частей;

c) документацию по методу проверки, подтверждающему способность молниеприемников перехватывать удары молнии и проводить токи молнии.

11.2.3 Документация по механическим системам

Документация механических систем должна содержать как минимум следующее:

a) подтверждение способности проведения тока молнии;

b) описания мер, предпринимаемых для защиты подшипников и гидравлических систем от воздействия тока молнии. Описание должно включать документацию и подтверждение отработанной технологии и/или отчеты по испытаниям, показывающие эффективность защитных мер;

c) при отсутствии молниезащиты в отчетах по испытаниям необходимо показать, что даже при регулярных ударах молнии подшипники способны функционировать в течение всего срока службы.

11.2.4 Документация по электрическим и электронным системам

Документация электрических и электронных систем должна содержать как минимум следующее:

a) мероприятия по экранированию и установке электрических и электронных систем;

b) выбор и координацию УЗИП;

c) уровни помехоустойчивости оборудования;

d) план техобслуживания УЗИП;

e) анализ, определяющий потребность в высоковольтных разрядниках.

11.2.5 Документация систем заземления и уравнивания потенциалов

Документация систем заземления и уравнивания потенциалов должна содержать как минимум следующее:

a) общий план соединений систем уравнивания потенциалов и заземления в ВЭУ;

b) описания и чертежи, включающие соответствующие данные;

c) спецификацию на используемые материалы, включая коррозионные свойства и используемую защиту от коррозии;

d) описание мер обеспечения качества, которые будут выполняться на соединениях с СМЗ.

11.2.6 Документация систем молниезащиты оболочки гондолы, ступицы и башни

Документация систем молниезащиты оболочки гондолы, ступицы и башни потенциалов должна содержать как минимум следующее:

a) чертеж, содержащий следующую информацию:

1) оболочку гондолы, обтекатель с показом металлических элементов, используемых в качестве молниеотводов;

2) молниеотводы;

3) точки соединений системы уравнивания потенциалов/заземления;

4) описание и маркировку точек подсоединения системы заземления, если применимо;

5) металлические сетки или закрытые металлические каналы, если имеются;

6) средства экранирования ступицы и гондолы;

7) маркировку точек измерения;

b) отчеты об испытаниях или сертификаты на использованные компоненты СМЗ, если применимо;

c) соединения внешних СМЗ для бетонных башен с металлической арматурой башни;

d) размеры элементов конструкции решетчатых башен.

11.3 Информация о площадке размещения ВЭУ

Следующие информация и документация по конкретной площадке для размещения ВЭУ не являются частью оценки конструкции ВЭУ:

a) частота возникновения молний в месте расположения ВЭС;

b) дополнительно для документации по заземлению:

1) удельное сопротивление грунта;

2) ток замыкания на землю;

3) время отключения КЗ на землю;

c) план по охране здоровья и технике безопасности для строительной площадки по отношению к молниям и грозам.

11.4 Информация для руководства по проверке СМЗ

Руководство по проверке СМЗ должно содержать как минимум следующее:

a) описание СМЗ;

b) описание системы заземления;

c) отчеты предыдущих проверок, если уместно;

d) форму отчета визуального осмотра СМЗ;

e) форму отчета о полной проверке СМЗ.

11.5 Руководства

Соответствующие аспекты, относящиеся к системам молниезащиты и заземления, должны раскрываться в следующих руководствах (инструкциях):

a) руководства по монтажу и техобслуживанию фундамента;

b) руководства по монтажу и техобслуживанию башни;

c) руководства по транспортированию, сборке и вводу в эксплуатацию ВЭУ;

d) руководства по эксплуатации и техобслуживанию ВЭУ.

Указанные инструкции могут быть объединены.

12 Проверки системы молниезащиты

12.1 Объем проверок

Программа проверок должна быть определена и включена в руководства по ВЭУ как часть концепции молниезащиты. Цель проверок — убедиться, что:

- СМЗ продолжает соответствовать первоначальному проекту на основе данного документа;

- все элементы СМЗ находятся в хорошем состоянии и способны выполнять предназначенные функции.

Система молниезащиты должна быть спроектирована таким образом, чтобы у оператора была возможность осмотреть ответственные элементы системы.

Изготовитель ВЭУ несет ответственность за составление плана проверок/инструкций по осмотру и включению мест с автоматическим управлением в рабочие инструкции, руководства по технической эксплуатации, а также в руководства по техническому обслуживанию фундамента и т. д.

12.2 Порядок проведения проверок

12.2.1 Общие положения

Должна быть составлена программа проверок. Проверки должны проводиться в соответствии с 12.1 и в следующие периоды:

- изготовления ВЭУ;
- монтажа ВЭУ;
- ввода ВЭУ в эксплуатацию;
- через определенные промежутки времени в зависимости от места расположения ВЭУ (общие максимальные промежутки времени между регулярными проверками приведены в таблице 6);
- после демонтажа или ремонта частей ВЭУ (например, лопастей, основных элементов, систем управления и т. п.).

12.2.2 Проверки в ходе изготовления ВЭУ

Программа проверок может быть составлена контролерами по качеству или с помощью автоматического управления в соответствии с положениями плана проверок. Во время изготовления, сборки и установки ВЭУ необходимо убедиться, что все оборудование и меры относительно молниезащиты выполнены надлежащим образом. Все важные детали должны быть включены в рабочие инструкции и т. п.

12.2.3 Проверки в ходе монтажа ВЭУ

Во время монтажа систему заземления необходимо тщательно осмотреть и обратить внимание:

- на механические повреждения во время земляных работ и обратной засыпки;
- механическую устойчивость во время заливки бетона;
- электрическую связность с другими стальными частями (например, ступеньки на наружной стороне);
- подсоединение к системам заземления фундамента;
- подсоединение к внешним системам заземления;
- гальваническую коррозию.

Система может включать элементы, которые невозможно осмотреть во время проверки, и на них следует обращать особое внимание во время установки.

12.2.4 Проверка при вводе ВЭУ в эксплуатацию и периодические проверки

Частью ввода ВЭУ в эксплуатацию является проверка СМЗ. Она должна быть проведена, по меньшей мере, путем осмотра, а также определения непрерывности в местах, где СМЗ не может быть проверена. Измерения непрерывности выполняют по *ГОСТ Р 59789* с помощью соответствующих измерительных приборов, таких как четырехпроводной микроомметр. Пример определенных точек измерения см. в приложении Q.

Примечание — Соединения через щетки или искровые зазоры, или эквивалент могут быть короткозамкнуты при необходимости, если необходимо выполнить измерение непрерывности других частей СМЗ.

При составлении плана проверок важно учесть следующие аспекты:

- эрозия и коррозия элементов молниеприемников (только периодическая проверка);
- механические и электрические свойства проводников, соединений, искровых зазоров или скользящих контактов;
- состояние соединений, соединений уравнивания потенциалов, креплений и т. п.;
- состояние УЗИП;
- коррозия электродов заземления (только периодическая проверка).

Через определенные промежутки времени (приведенные в таблице 6) следует проводить полную проверку, включая измерения непрерывности в ответственных элементах СМЗ и проверку УЗИП, за которыми не ведется наблюдение.

Производитель лопастей и производитель ВЭУ могут в своих руководствах по ТО и эксплуатации установить определенные промежутки времени между проверками СМЗ в зависимости от N_d, количества ударов молнии в год, на основе прочности молниезащитной конструкции, проверенной путем

анализа и испытаний. Техобслуживание может зависеть от частоты возникновения ударов молнии, если осуществляется мониторинг ударов молнии в ВЭУ.

Измерения непрерывности соединений можно провести с использованием четырехпроводного микроомметра для подтверждения непрерывности. Используемый критерий успешного прохождения может зависеть от конструкции и поэтому должен определяться изготовителем. Отсутствие непрерывности четко свидетельствует об отказе системы, однако самого по себе измерения недостаточно для проверки и подтверждения соответствия конструкции.

Основная цель — убедиться в целостности соединения, а не определенного конкретного значения.

Удельные величины допускается использовать в качестве опорных между проведением периодических измерений. Измерительные точки и пределы измерений должны быть четко установлены в руководстве по эксплуатации и техническому обслуживанию.

Предпочтительно, чтобы непрерывность вертикальных молниеотводов в лопастях ВЭУ обеспечивалась благодаря конструкции системы и проверялась во время изготовления, таким образом, отсутствовала бы необходимость проведения измерения непрерывности в полевых условиях.

Изготовитель должен предоставить план проверок для различных частей СМЗ, которые необходимо инспектировать. В плане должно быть определено, как часто и каким образом проверяют различные части, в том числе что проверяют путем измерений и, если необходимо, методы измерений. Общий план проведения проверок СМЗ представлен в таблице 6, который используют в случае, если изготовитель не предоставил план проверок. Интервалы между проверками могут отличаться от указанных в таблице 6, если они указаны изготовителем в документации, относящейся к конкретной конструкции СМЗ.

Таблица 6 — Общие интервалы проверок СМЗ

Уровень защиты	Периодичность визуального осмотра (сколько раз в год)	Периодичность полной проверки, включая измерения непрерывности соединений (сколько раз в год)
I и II	1	2
III и IV	1	4

12.2.5 Проверка после демонтажа или ремонта основных узлов

После демонтажа или ремонта основных частей ВЭУ необходимо убедиться, что все оборудование, имеющее отношение к СМЗ, должным образом установлено на прежнее место. При необходимости может быть проведена полная проверка.

Когда ВЭУ работает в нормальном режиме, частота проверок будет определяться в зависимости от условий окружающей среды, но проводить проверку СМЗ ВЭУ следует с частотой, указанной в 12.2.4.

12.3 Техническое обслуживание

Регулярные проверки являются главным условием надежной работы СМЗ ВЭУ.

Если конструкция СМЗ содержит изнашиваемые детали (точки молниеприемников, механические скользящие контакты, искровые зазоры, устройства защиты от импульсных перенапряжений и т. п.), необходимо гарантировать, что эти детали проходят регулярный техосмотр во время регулярных проверок в соответствии с их сроком службы или что за состоянием этих деталей следит система автоматического контроля, которая информирует оператора ВЭУ о неисправности деталей.

Все изношенные или дефектные детали следует незамедлительно заменять.

Приложение *А*
(справочное)

Молниезащита малых ВЭУ

К малым ВЭУ относятся ВЭУ с ометаемой площадью ветроколеса менее или равной 200 м^2, входным напряжением до 1000 В переменного тока или 1500 В постоянного тока, для автономного применения и генерации избыточной энергии в сеть. Обычно такие ВЭУ предназначены для производства электроэнергии, которая в основном необходима для использования на месте.

ВЭУ малой мощности также должны быть оснащены системой молниезащиты. Чтобы такие ВЭУ смогли продолжать работу после воздействия высокого переходного напряжения и токов, связанных с короткими одиночными импульсами грозовых разрядов, необходимо обеспечить защиту от переходного напряжения соединения с внешней сетью и соединений систем управления и связи (если таковые имеются). Прямые удары молнии в ВЭУ малой мощности будут относительно редкими, если только они не размещены на высокой открытой местности без защиты. Однако системы должны оставаться безопасными как с точки зрения сохранения физической целостности и непричинения вреда людям при отрыве конструкций, так и недопущения пожара или повреждения электрической системы, к которой подключена турбина.

И хотя настоящий стандарт не распространяется на молниезащиту ВЭУ малой мощности, некоторые основные принципы и подходы, установленные в настоящем стандарте, могут способствовать недопущению упомянутых выше рисков при работе малых ВЭУ.

Для обеспечения эффективной молниезащиты при создании СМЗ можно использовать прямые испытания при высоких значениях напряжения и тока (см. приложение *С*). Испытывают такие компоненты, как лопасти, анемометры, корпус генератора; электрическая схема и система управления. Окончательное решение по молниезащите может объединять в себе стержень молниеотвода, простирающийся выше ветроколеса и соединения уравнивания потенциала, а также УЗИП, эффективность которого также должна быть подтверждена испытаниями.

Приложение *В*
(справочное)

Воздействие молнии на ВЭУ

В.1 Грозовая обстановка

В.1.1 Общие положения

В настоящем приложении приведена наиболее значимая информация по грозовой обстановке, которая требуется для понимания явлений, происходящих при ударе молнии, и процессов, связанных со взаимодействием молнии с ВЭУ. Более полная информация приведена в *[29]*.

В.1.2 Свойства молнии

Молнию можно рассматривать как источник тока. Для проектирования, определения параметров и выбора компонентов молниезащиты используют четыре параметра тока молнии: пиковый ток *I*, средняя крутизна импульса тока d*i*/d*t*, заряд *Q* и удельная энергия *W*/*R*.

Максимально замеренное значение тока молнии, производимое отдельным ударом, лежит в диапазоне от 2 до 300 кА. Максимально замеренные значения заряда и удельной энергии составляют несколько сотен Кулон (Кл) и до 20 МДж/Ом (в крайне редких случаях) соответственно. Эти параметры тока молнии влияют на величину физического ущерба, причиняемого лопастям ВЭУ и/или аппаратуре СМЗ. Токи удара молний дают высокие нагрузки, которые иногда разрушают конструкцию лопастей из композита. Они также влияют на уровни косвенных воздействий на электрические и электронные системы. Перенос заряда приводит к плавлению в местах приложения молнии, например в приемниках и других местах, где токи молнии должны пройти через зазоры на пути тока.

Максимальные значения параметров тока молнии реализуются лишь в малом проценте молний. Среднее значение пикового тока составляет примерно 30 кА со средними значениями заряда и удельной энергии 5 Кл и 55 кДж/Ом соответственно. Кроме того, электрические характеристики тока молнии отличаются в зависимости от типа разряда молнии, времени года и географического положения.

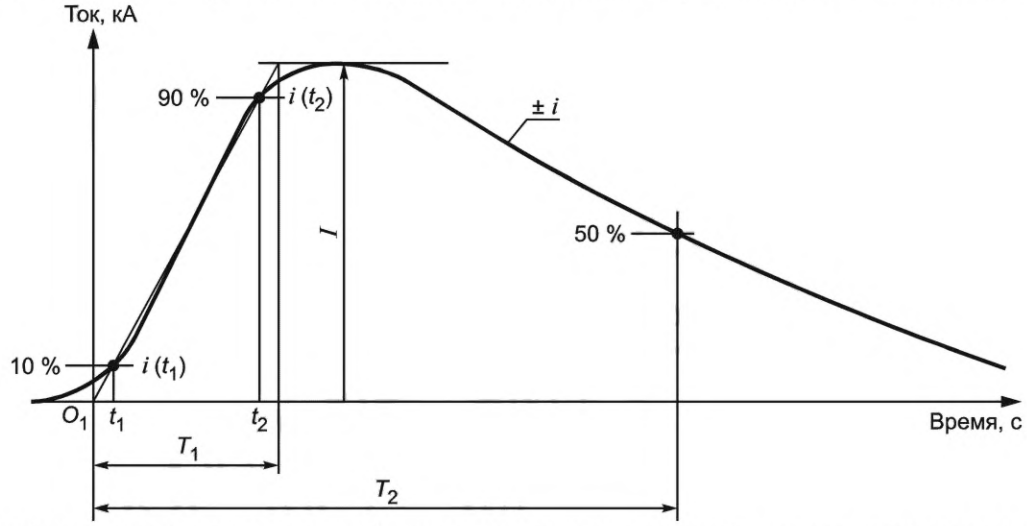
Электрические поля, непосредственно предшествующие прохождению молнии, являются также частью грозовой обстановки, и эти поля определяют, куда в конструкцию войдет молния, будут ли непроводящие поверхности конструкции пробиты и появится ли в соединяющих кабелях ток от внутренних проводящих элементов.

В.1.3 Формирование молниевого разряда

Молнии образуются после отделения разряда в грозовых облаках вследствие процессов, описанных в научной литературе (например, *[29]*). Молнию замечают, когда этот заряд разряжается в землю или в зону с зарядом противоположной полярности в том же или соседнем облаке. Следующее далее описание касается только разрядов молнии в землю, что приводит к передаче заряда между грозовым облаком и землей.

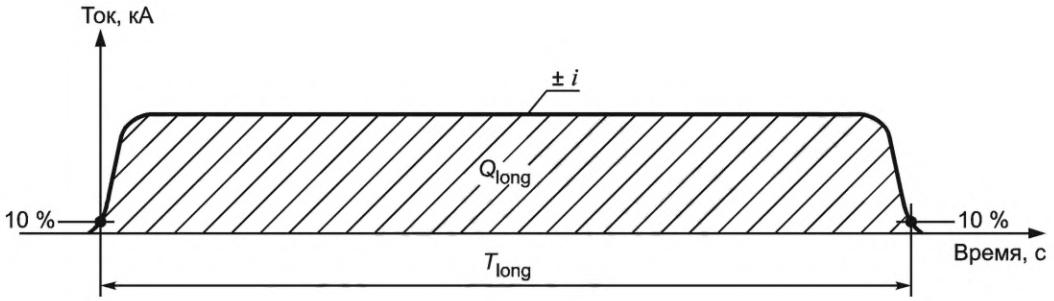
Существует два основных типа молнии — нисходящие или восходящие. Нисходящий разряд молнии берет начало в грозовой туче и направлен к земле. И наоборот, восходящий разряд молнии берет начало в отдельной возвышенности на земле (например, на вершине горы) или наверху высокой заземленной конструкции и направлен в грозовое облако.

Разряд молнии состоит из одного или нескольких ударов в виде короткого удара, как правило, продолжительностью менее 2 мкс (рисунок В.1) и длительного удара, как правило, продолжительностью более 2 мкс (рисунок В.2). Всю ветвь, проходящую один ионизированный путь, называют разрядом молнии, который длится до 1 с.



O_1 — начальный момент короткого удара молнии; I — пиковое значение тока; i — ток; T_1 — длительность короткого удара молнии; T_2 — длительность импульса

Рисунок *В.1* — График изменения тока при коротком ударе молнии (обычно $T_2 < 2$ мс)
(*ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010, рисунок А.1*)



T_{long} — время длительного удара молнии; Q_{long} — заряд длительного удара молнии

Рисунок *B.2* — График изменения тока при длительном ударе молнии (обычно 2 мс < T_{long} < 1 с)
(*ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010, рисунок А.2*)

Кроме того, удары молнии разделяют по их полярности (положительному или отрицательному заряду) и последовательности появления (первый, последующий, наложенный). Отрицательный удар уменьшает отрицательный разряд от грозовой тучи до земли. Положительный удар приводит к переносу положительного заряда от грозовой тучи до земли. Большинство ударов молнии отрицательные и составляют до 90 % нисходящих молний. Как правило, положительные удары молнии имеют самые высокие значения параметров тока (т. е. более высокие *I, Q* и *W/R*), а отрицательные удары молнии имеют наибольшую крутизну импульса тока (т. е. самые высокие отношения d*i*/d*t*).

Все удары молнии не похожи друг на друга из-за естественных изменений в образующей их грозовой туче и индивидуальных путей до земли. Например, невозможно предсказать, что следующая молния, идущая к конкретной конструкции, будет иметь пиковый ток заданной величины. Можно лишь отметить, что конструкция имеет заданную вероятность поражения ударом молнии с параметрами тока, превышающими конкретную величину.

Распределения вероятности значений электрических параметров, используемых для описания удара молнии в базовых стандартах по молниезащите *ГОСТ Р МЭК 62305-1, ГОСТ Р МЭК 62305-2, ГОСТ Р МЭК 62305-4* и *ГОСТ Р 59789*, были получены благодаря прямым измерениям реальных ударов молний в высокие башни. Эти параметры для нисходящей и восходящей молний приведены соответственно в *B.1.4* и *B.1.5*. Дополнительная уточняющая информация может быть получена с помощью региональных и государственных систем обозначения мест молний. Эти системы могут регистрировать местоположение удара молнии и оценить пиковый ток.

Распределения вероятности, которые описывают параметры тока молнии, отличны для каждого типа молний (восходящая/нисходящая и положительная/отрицательная). Соответствующие распределения вероятности показаны ниже вместе с характерной формой волны каждого типа разряда. Указанный уровень вероятности показывает вероятность конкретного параметра тока отдельной молнии, превышающую табличное значение.

***B.1.4* Нисходящие молнии**

B.1.4.1 Общие положения

Нисходящие молнии первоначально образуют предварительный пробой внутри грозовой тучи. В настоящее время физика этого процесса до конца не изучена. Намного лучше изучены части процесса разряда, которые происходят ниже уровня грозовых туч.

B.1.4.2 Отрицательные нисходящие молнии

При отрицательном ударе молнии смещающийся лидер нисходит с грозового облака к земле ступенями в несколько десятков метров с временными паузами между отдельными ступенями примерно в 50 мкс. Ступени имеют короткие (обычно 1 мкс) импульсные токи более 1 кА. Полностью развитый канал лидера имеет общий заряд примерно 10 Кл или более. Диаметр канала лежит в диапазоне до нескольких десятков метров. Общая продолжительность процесса смещающегося лидера составляет несколько десятков миллисекунд. Тусклый канал лидера обычно не виден невооруженным глазом.

Потенциал окончания лидера, кончик лидера, превышает 10 МВ по отношению к земле. По мере приближения кончика лидера к земле этот высокий потенциал повышает напряжение электрического поля на поверхности земли. Когда электрическое поле на уровне земли превышает величину электрического пробоя воздуха, «ответные» (движение вверх) лидеры исходят от земли или с конструкций на земле. Эти движущие вверх лидеры обычно называют встречными лидерами. Встречные лидеры играют важную роль в определении точки приложения удара молнии к объекту.

Когда нисходящий смещающийся лидер встречает движущийся вверх встречный лидер, устанавливается непрерывная дорожка от грозовой тучи к земле. Затем накопленный в лидер-канале заряд разряжается на землю волной тока, распространяющейся до ионизированного канала на скорости, примерно равной 1/3 скорости света. Этот процесс называют первой обратной молнией. Первая обратная молния может иметь пиковое значение до нескольких сотен килоампер и длительность несколько сотен микросекунд. Процесс входа распространяющейся вниз

молнии показан на рисунке *В.3*. На рисунке видно, что условия от относительных до эталонных (например, уровень моря), воздействие объектов на грунт усиливаются на участках с возвышениями и в горах.

После временно́го интервала порядка от 10 мс до нескольких сотен миллисекунд дальнейшие маршруты лидер/обратный удар молнии могут следовать по пути, выбранному первым обратным ударом молнии. Стреловидный лидер, предшествующий этим последующим обратным ударам молнии, обычно не является ступенчатым и намного быстрей (длительность несколько миллисекунд). В среднем разряд молнии содержит от трех до четырех обратных ударов молнии (включая первый). Обратные удары молнии имеют видимую часть разряда молнии.

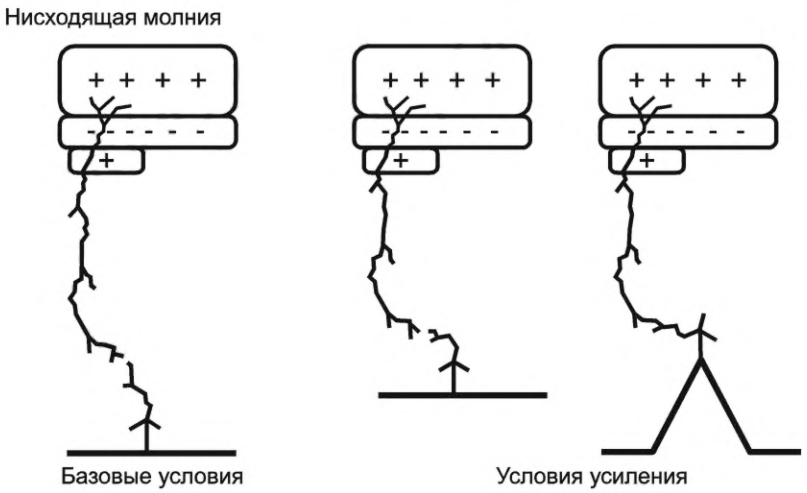


Рисунок *В.3* — Процессы формирования нисходящей молнии

После одного или нескольких обратных ударов молнии непрерывный ток (называемый также длительным ударом молнии) может протекать через все еще ионизированный канал. Непрерывные токи значительно отличаются от кратковременных токов с высокой амплитудой обратных ударов молнии: средняя амплитуда тока находится в диапазоне нескольких сотен ампер, а длительность может составлять несколько сотен миллисекунд. Длительные удары переносят большие заряды непосредственно от грозовой тучи на землю. Порядка половины нисходящих молний включают длительный удар.

На рисунке *В.4* показан характерный профиль тока отрицательной нисходящей молнии. Вслед за контактом ступенчатого лидера со встречным лидером появляется первый обратный удар молнии, приводящий к появлению (на земле) импульсного тока с высокой амплитудой, длящегося несколько сотен миллисекунд. Пиковое значение тока находится в диапазоне от нескольких килоампер до 100 кА, среднее значение составляет порядка 30 кА. Вслед за первыми обратными ударами молнии могут возникнуть последующий(е) обратный(е) удар(ы) молнии и длительный(е) удар(ы). Хотя последующие обратные удары молнии обычно имеют низкое пиковое значение тока и более короткий срок по сравнению с первыми обратными ударами молнии, они, как правило, имеют более высокую скорость роста тока. Отрицательные нисходящие разряды молнии могут состоять из комбинаций различных ранее упомянутых компонентов тока, как показано на рисунке *В.5*.

Параметры тока отрицательной нисходящей молнии приведены в таблице *В.1*.

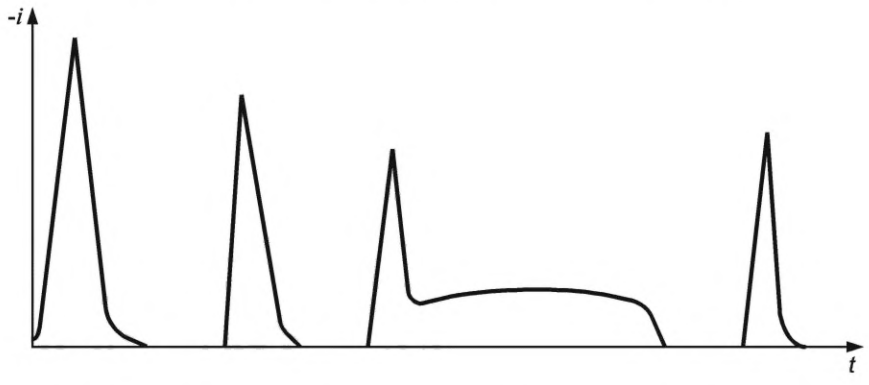


Рисунок *В.4* — Типичный профиль отрицательной нисходящей молнии (не в масштабе)

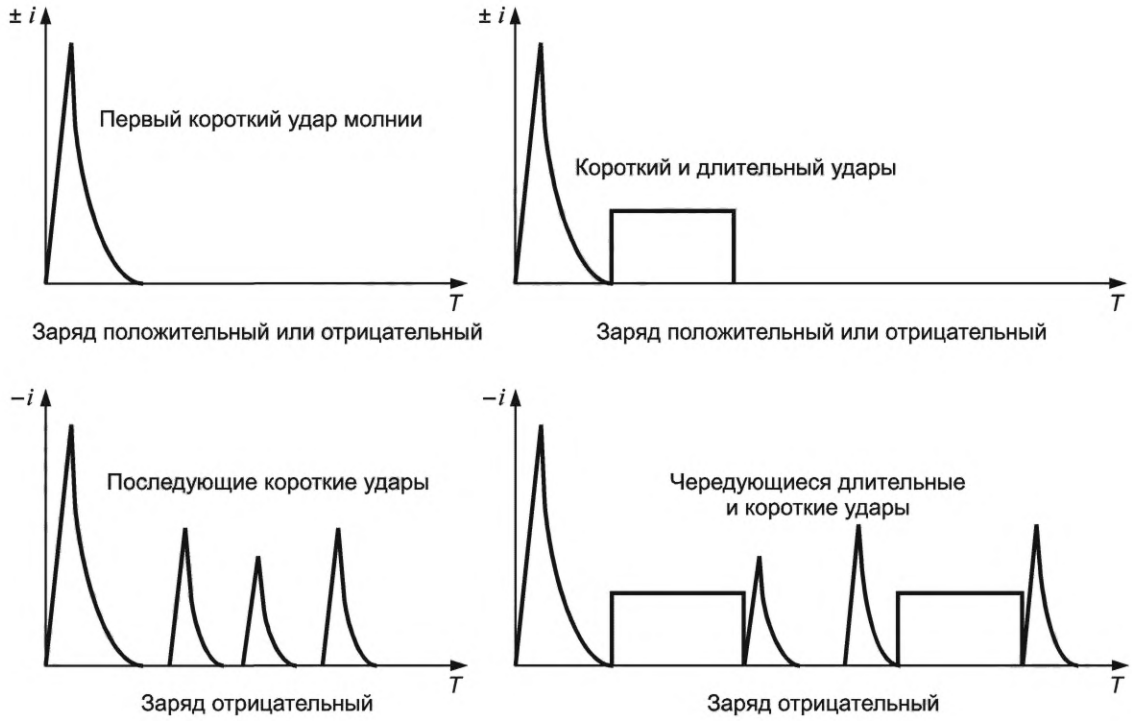


Рисунок *B.5* — Типичные компоненты нисходящих разрядов молний для равнинной местности и невысоких сооружений (*ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010, рисунок А.3*)

Таблица *B.1* — Параметры тока нисходящего разряда молнии (*ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010, таблица А.1*)

Параметр	Фиксированные значения для УМЗ 1	Значения			Тип удара молнии
		95 %	50 %	5 %	
I, кА[1)]		4	20	90	Первый отрицательный короткий
	50	4,9	11,8	28,6	Последующий отрицательный короткий
	200	4,6	35	250	Первый положительный короткий (единичный)
Q_{flash}, Кл	300	1,3	7,5	40	Отрицательный
		20	80	350	Положительный
Q_{short}, Кл	100	1,1	4,5	20	Первый отрицательный короткий
		0,22	0,95	4	Последующий отрицательный короткий
		2	16	150	Первый положительный короткий (единичный)
W/R, кДж/Ом	10 000	6	55	550	Первый отрицательный короткий
		0,55	6	52	Последующий отрицательный короткий
		25	650	15 000	Первый положительный короткий
di/dt_{max}, кА/мкс	20	9,1	24,3	65	Первый отрицательный короткий
		9,9	39,9	161,5	Последующий отрицательный короткий
		0,2	2,4	32	Первый положительный короткий
$di/dt_{30\ \%/90\ \%}$,кА/мкс	200	4,1	20,1	98,5	Последующий отрицательный короткий

Окончание таблицы В.1

Параметр	Фиксированные значения для УМЗ 1	Значения			Тип удара молнии
		95 %	50 %	5 %	
Q_{long}, Кл	200	—	—	—	Длительный
t_{long}, с	0,5	—	—	—	Длительный
Длительность фронта импульса тока, мкс	—	1,8	5,5	18	Первый отрицательный короткий
		0,22	1,1	4,5	Последующий отрицательный короткий
		3,5	22	200	Первый положительный короткий (единичный)
Длительность удара, мкс	—	30	75	200	Первый отрицательный короткий
		6,5	32	140	Последующий отрицательный короткий
		25	230	2000	Первый положительный короткий (единичный)
Временной интервал, мс	—	7	33	150	Многократные отрицательные
Общая длительность удара, мс	—	0,15	13	1100	Отрицательные (все)
		31	180	900	Отрицательные (без единичного)
		14	85	500	Положительный
[1] Значения I = 4 кА и I = 20 кА соответствуют вероятности 98 % и 80 % соответственно.					

В.1.4.3 Положительные нисходящие молнии

В отличие от отрицательных положительные нисходящие разряды молнии инициирует непрерывно распространяющийся нисходящий лидер, который не выявляет явных ступеней. Этапы встречного лидера и обратного удара молнии подобны процессам, описанным выше для отрицательных нисходящих разрядов молний. Положительный нисходящий разряд молнии обычно состоит только из одного обратного удара молнии, за которым может следовать длительный удар.

Положительные нисходящие молнии очень важны для практической молниезащиты, т. к. пиковое значение тока I, заряда Q и удельная энергия W/R могут быть больше, чем при отрицательном нисходящем разряде молнии. Обратный удар молнии стремится к меньшей скорости роста тока по сравнению с отрицательным первым обратным ударом молнии. Характерный профиль тока для положительной нисходящей молнии показан на рисунке *В.6*. Характерные электрические параметры сведены вместе с параметрами отрицательных разрядов в таблицу *В.1*.

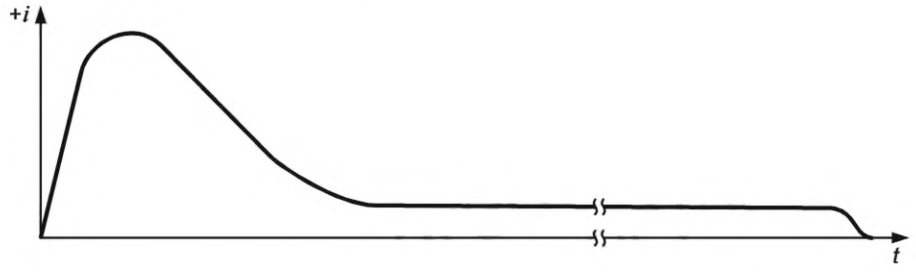


Рисунок *В.6* — Типичный профиль положительной нисходящей молнии

***В.1.5* Восходящие молнии**

Заряд в грозовом облаке вызывает рост электрического поля на поверхности земли, но обычно является недостаточным для запуска движущегося вверх лидера. Однако электрическое поле может значительно вырасти в горах, на расположенных на возвышенностях объектах или высоких конструкциях, подобных башням или ВЭУ (рисунок *В.7*). В таких местах напряженность электрического поля может быть достаточной для инициирования лидера, движущегося вверх с земли на грозовое облако. Конструкции, высота которых выше 100 м уровня местности (например, современная ВЭУ), особенно подвержены воздействию восходящих разрядов.

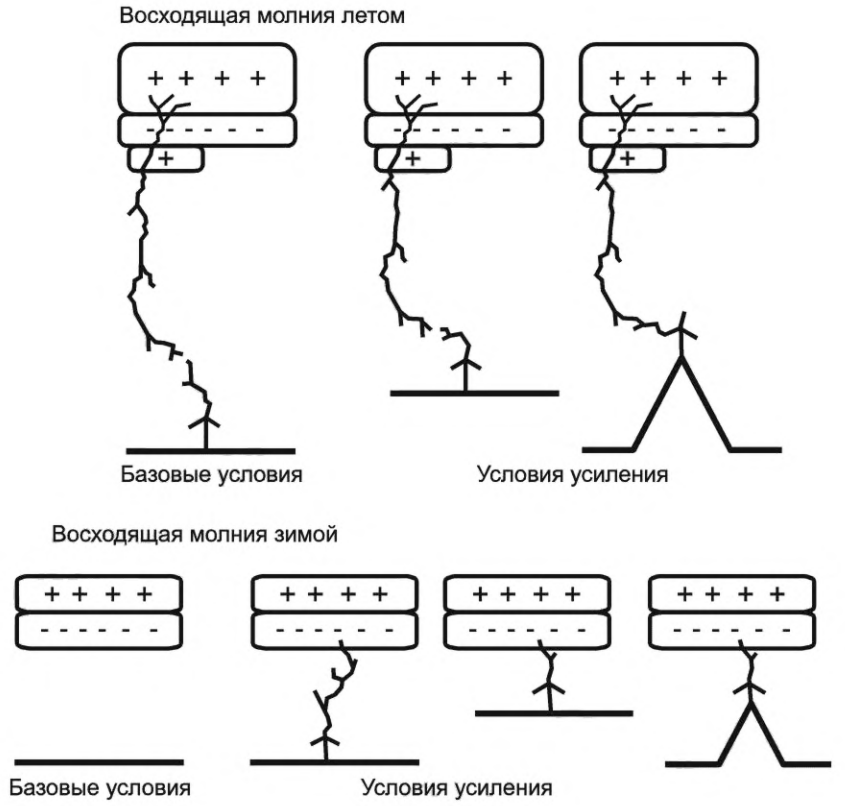


Рисунок *В.7* — Формирование восходящих разрядов молнии летом и зимой

Восходящий разряд начинается с первого длительного удара, который может сопровождаться несколькими наложенными короткими ударами (рисунок *В.8*). За этапом длительного удара может следовать последующий(е) обратный(е) удар(ы) молнии по тому же каналу. Эти обратные удары молнии достаточно похожи на последующие обратные удары нисходящей молнии. Восходящие молнии не содержат компонента, аналогичного первому обратному удару нисходящей молнии. Место приложения к конструкции восходящего разряда молнии просто совпадает с точкой формирования восходящего лидера.

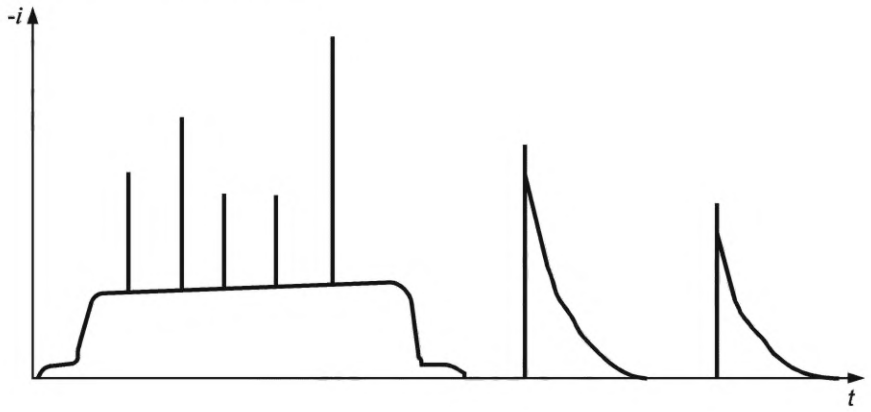


Рисунок *В.8* — Типичный профиль отрицательного восходящего разряда молнии

Параметры восходящей молнии измеряют на высоких объектах, которые склонны к появлению молний этого типа. Подробную информацию о восходящих молниях см. в *[29]*. В последние годы восходящие молнии изучают благодаря измерениям на ВЭУ.

Основная информация о параметрах тока молнии относится к восходящим отрицательным молниям, т. к. восходящие положительные молнии, хотя и наблюдаются, но очень редки.

Хотя пиковые значения порядка 10 кА относительно низкие, перенос заряда, связанный с начальным длительным ударом, в редких случаях составляет 300 Кл, как показано в таблице *B.2* (см. *[29]*). Восходящие разряды молний могут также состоять из различных комбинаций ранее упомянутых составляющих тока, как показано на рисунке В.9.

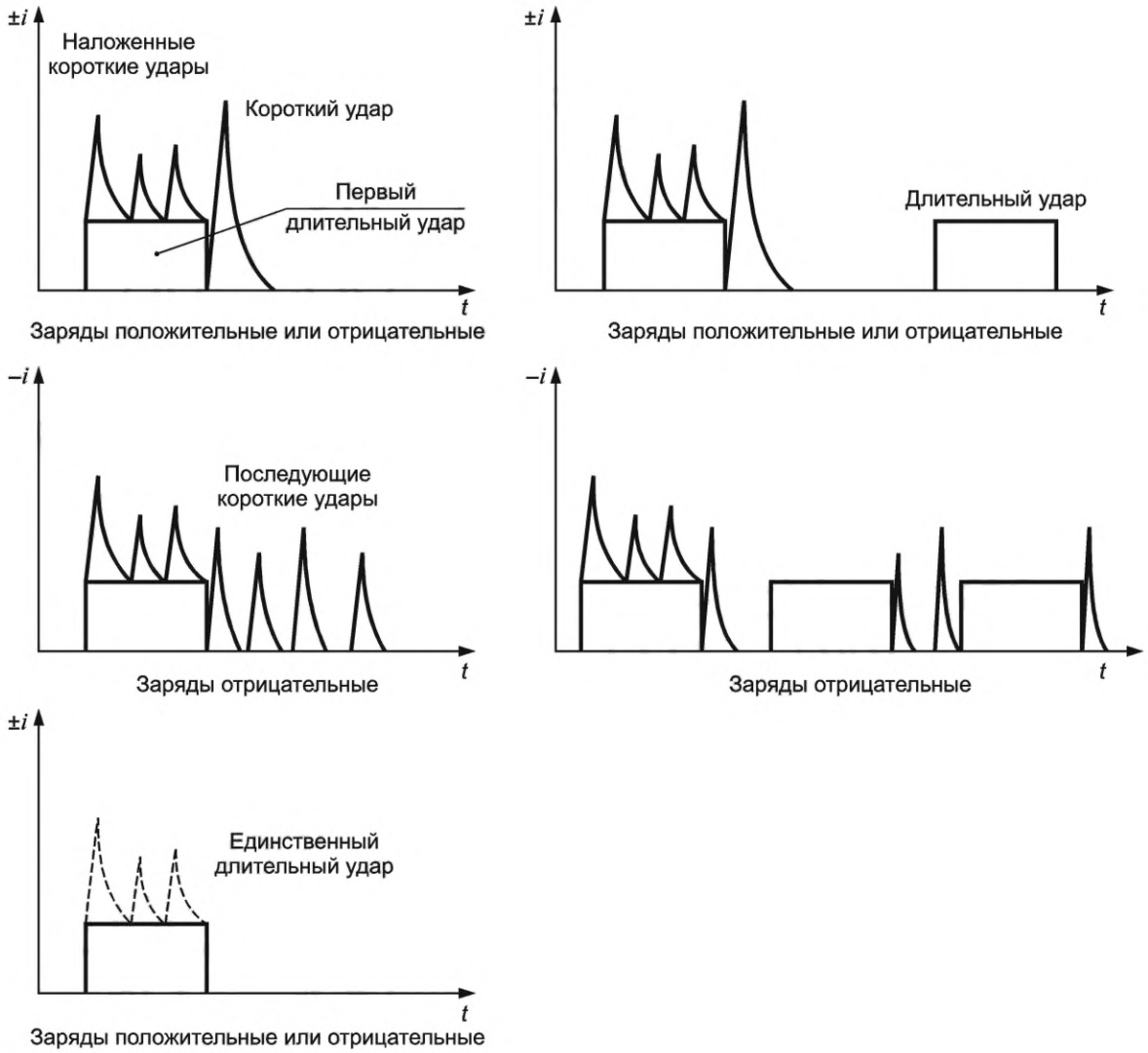


Рисунок *B.9* — Типичные компоненты восходящих разрядов молнии для сооружений средней высоты и высотных сооружений (*ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010, рисунок А.4*)

В общем случае восходящие молнии имеют более низкие значения параметров тока по сравнению с нисходящими молниями, возможно, за исключением общего перенесенного заряда. Более того, высокие объекты, расположенные на поражаемых территориях, могут очень часто поражаться восходящими молниями, особенно во время зимних гроз.

Это имеет непосредственное отношение к ВЭУ, т. к. возвышенные и подверженные воздействию ветра места предпочтительны для ВЭУ по причине благоприятных ветровых условий. Таким образом, необходимо учитывать риск восходящих разрядов молний, а разработчикам рекомендуется искать информацию о грозовых условиях зимой на предполагаемых площадках. Поскольку восходящие молнии исходят от выступающих частей ВЭУ (т. е. лопастей и молниеприемников, защищающих расположенные в гондоле метеорологические приборы), дается точка приложения, и при условии правильно разработанной молниезащиты она также хорошо сработает и для восходящих молний.

Однако частые зимние грозы могут потребовать более надежных молниеприемников или их периодической замены.

Таблица *B.2* — Параметры тока восходящего разряда молнии

Параметр	Максимальное значение
Заряд, Кл	300
Общая длительность, с	0,5—1,0
Пиковый ток, кА	20
Средняя крутизна наложенных импульсных токов, кА/мкс	20
Количество наложенных импульсных токов	50
Примечание — По результатам обширных исследований в Японии максимальные значения заряда и пикового тока в восходящих зимних молниях составляют 1000 Кл и 100 кА соответственно.	

B.2 Параметры тока молнии, относящиеся к точке удара молнии

Как правило, параметры тока молнии, влияющие на целостность СМЗ, — это пиковый ток *I*, заряд *Q*, удельная энергия *W/R*, длительность *T* и средняя крутизна импульса тока d*i*/d*t*. Каждый параметр стремится запустить свой механизм разрушения. Для испытаний необходимо учитывать сочетания значений этих параметров, подбираемые для воспроизведения реального механизма разрушения части испытуемой СМЗ в лаборатории. В таблице *B.3* приведены максимальные значения *I, Q, W/R, T* и d*i*/d*t* для испытаний СМЗ в зависимости от требуемого уровня защиты (для получения дополнительной информации см. *ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010, приложение D*).

Таблица *B.3* — Параметры, используемые для испытаний различных компонентов СМЗ и различных уровней молниезащиты (*ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010, таблица D.1*)

Компонент	Основные проблемы	УМЗ	Параметры тока молнии и защиты от молнии					Примечания
			Q, Кл	*W/R*, кДж/Ом	*I*, кА	d*i*/d*t*, кА/мкс	*T*	
Молниеприемник	Эрозия в соединениях (например, тонкие металлические листы)	I II III, IV	Q_{long} 200 150 100	—	—	—	< 1 с (применение Q_{long} в одном импульсе)	—
Молниеприемники, токоотвод	Нагрев элементов электрической цепи	I II III, IV	—	10 000 5600 2500	—	—	Применение *W/R* в адиабатической конфигурации	Определение размеров по *ГОСТ Р 59789* помогает сократить количество испытаний
	Механические воздействия	I II III, IV	—	10 000 5600 2500	200 150 100	—	—	—
Соединительные элементы	Комбинированное воздействие (тепловое, механическое, электрическое)	I II III, IV	—	10 000 5600 2500	200 150 100	—	< 2 мс (применение *I* и *W/R* в одиночном импульсе)	—
Система заземления	Комбинированное воздействие (тепловое, механическое, электрическое)	I II III, IV	—	10 000 5600 2500	200 150 100	—	< 2 мс (применение *I* и *W/R* в одиночном импульсе)	Размеры обычно определяют на основе механических/химических свойств (коррозия и т. п.)

Окончание таблицы В.3

Компонент	Основные проблемы	УМЗ	Параметры тока молнии и защиты от молнии					Примечания
			Q, Кл	W/R, кДж/Ом	I, кА	di/dt, кА/мкс	T	
УЗИП, содержащее искровые разрядники	Комбинированное воздействие (тепловое, механическое, электрическое)	I II III, IV	Q_{short} 100 75 50	10 000 5600 2500	200 150 100	200 150 100	—	Применяют I, Q_{short} и W/R в одиночном импульсе (длительность T < 2 мс); применяют di/dt в раздельном импульсе
УЗИП, содержащее блоки металлооксидных варисторов	Воздействие электрической энергии (перегрузка цепи)	I II III, IV	Q_{short} 100 75 50	—	—	—	—	Необходимо проверить оба аспекта
	Диэлектрическое воздействие (пробой диэлектрика/ образование трещин)	I II III, IV	—	—	—	200 150 100	< 2 мс (применение I в одиночном импульсе)	Необходимо провести раздельные испытания

В.3 Ток лидера без обратного удара молнии

Восходящие лидеры исходят от самой ВЭУ при появлении высоких электростатических полей из грозовых облаков над лидером или вблизи грозовых облаков. Когда подобные восходящие лидеры не соединяются с лидером с облака, обратного удара молнии нет. Импульсные токи, ассоциирующиеся с лидерами, составляют обычно несколько килоампер и могут доходить до 10 кА. Лидеры могут появляться лишь там, где могут образовываться высокие электростатические поля. Величина, а также градиент тока вызывают электромагнитную обстановку, которая должна учитываться в расчете ЭМС ВЭУ.

В.4 Воздействие электромагнитных импульсов от грозовых разрядов

Воздействия электромагнитных импульсов от грозовых разрядов вызывают перенапряжения, которые могут включать меньше энергии, чем при выбросе напряжения/тока, вызванном прямыми ударами молний, но которые возникают более часто. Этот тип перенапряжений и выбросов напряжения/тока может быть вызван:

- кондуктивными частичными токами молнии;
- индуктивной/емкостной связью;
- ударами молнии вблизи ВЭУ;
- перенесением линий (силовыми и/или линиями связи из-за ударов молнии в эти линии или вблизи них).

Приложение *С*
(обязательное)

Методы испытаний

С.1 Общие положения

В настоящем приложении приведены методы испытаний при разработке новых конструкций лопасти или проверки существующих конструкций для подтверждения их способности справляться с воздействием разряда молнии. Данные методы испытаний могут быть применимы и к другим компонентам ВЭУ, таким как обтекатель ступицы, ступица, гондола или другие их детали.

Изготовитель должен определить количество образцов испытуемых деталей. Объектами испытаний должны быть образцы лопасти, включая концевую часть и существенный участок лопасти, находящийся внутри концевой части, для представления полной конструкции молниезащиты и конструкции образца лопасти, а также взаимодействия СМЗ, вертикального молниеотвода, соединительных элементов вертикального молниеотвода, других элементов СМЗ и конструкции образца лопасти.

Установлено два типа испытаний:

- испытания высоким напряжением. Испытания проводят для определения конкретных точек попадания молнии и каналов пробоя через непроводящие материалы, таких элементов конструкции ВЭУ, как лопасти и оболочка гондолы. Поскольку электрические токи, которые появляются во время данных испытаний, представляют исключительно токи лидера молнии, а не токи гораздо более сильного удара, испытания на попадание тока молнии предназначены исключительно для указания пути/путей, которые могут быть выбраны разрядами молнии. Повреждение в результате данных испытаний несравнимо с возможным повреждением от токов молнии;
- испытания на физическое повреждение при больших токах. Испытания проводят для оценки реального повреждения от тока молнии. Представленные методы испытания применяются как к цельной конструкции концевой части лопасти, так и к небольшим участкам вертикального молниеотвода, например, элементам соединения и т. п. В данных испытаниях не выявляются наиболее возможные точки попадания молнии.

С.2 Испытания высоким напряжением

С.2.1 Подтверждение эффективности молниеприемников

Испытания проводят для подтверждения эффективности молниеприемников на лопастях ВЭУ.

Оценка, основывающаяся на испытаниях по попаданию удара молнии, не может быть коррелирована с эффективностью перехвата, как это предусмотрено выбранным уровнем молниезащиты. Фактическая эффективность перехвата может быть верифицирована только полевыми наблюдениями.

Примечание — Для двухлопастных ветроколес распределение попадания вдоль лопастей будет отличаться от трехлопастных ветроколес, поэтому испытание попаданием высоковольтным начальным лидером, предусмотренное в *С.2.2*, может быть выполнено даже под меньшими углами (т. е. ближе к горизонтали/нулевым градусам) с целью демонстрации адекватной эффективности перехвата для концевой части, а также для встроенных секций лопасти.

С.2.2 Испытания на попадание молнии с использованием начального лидера

С.2.2.1 Цель испытания

Испытание лопастей ВЭУ для проверки следующего:

- эффективности молниеприемников для рассматриваемой лопасти;
- местонахождения возможных точек приложения лидера и искрения или каналов пробоев на лопастях и других непроводящих конструкциях;
- каналов искрения или пробоев по или через диэлектрические поверхности;
- технических характеристик конструкций и/или устройств защиты.

С.2.2.2 Образец для испытаний

Образец для испытаний должен представлять лопасть в натуральную величину или часть вершины лопасти, включая все соответствующие конструктивные детали, присутствующие при серийном производстве. При выборе соответствующей длины лопасти должны учитываться конструктивные детали лопасти, а также вероятность крепления испытательного ударного устройства к стропам крана, других деталей, являющихся частями испытательной схемы и до конца комеля образца лопасти. Опыт показал, что длина лопасти, примерно составляющая 15 % общей лопасти, применима для углов испытаний 10° или менее.

Часть лопасти должна быть достаточно длинной, чтобы включать образцы всех применимых элементов СМЗ, устанавливаемых для репрезентативного состояния при изготовлении. В отчете об испытаниях должна быть подробно описана и обоснована применимость испытательной секции по отношению к полномасштабной конструкции.

Проводящие компоненты, такие как маяки, датчики и молниеотвод(ы), обычно установленные в испытуемом образце (отдельная лопасть, вершина лопасти или средняя часть лопасти), должны быть представлены внутри испытуемого образца.

Эти компоненты необходимо установить в тех же точках внутри испытуемого образца, что и в конструкции лопасти. Если проводящие компоненты в реальной конструкции могут быть размещены в нескольких положениях, то для испытаний их следует устанавливать в наиболее неблагоприятных. Как правило, это положения с наименьшим расстоянием до непроводящих покрытий или с наиболее сильной интенсивностью электрического поля в направлениях, перпендикулярных к внешней поверхности. И образцы новых лопастей, и образцы, которые ранее подверглись износу механическим путем, могут использоваться до тех пор, пока на них не появятся повреждения в процессе механического старения.

Примечания

1 Описание испытаний в настоящем приложении является обязательным для вершин лопастей. Аналогичные принципы испытаний могут применяться для встроенных секций лопастей для проверки эксплуатационных показателей молниеприемников в этих регионах, или для определения вероятных точек попадания молний вдоль лопасти.

2 Опыт показал, что испытуемые лопасти при углах 10° к горизонтальной плоскости предусматривают испытуемые образцы минимальной длиной 10 м для предотвращения пробоев от конца образца лопасти.

С.2.2.3 Испытательная установка

С.2.2.3.1 Общие положения

Испытание по попаданию начального лидера используют при разработке конструкции и ее проверке. Проверочное испытание для лопастей описано в этом подразделе. Испытания проводят, используя один из двух вариантов испытательной установки: А или В.

Каждый из вариантов испытательной установки обеспечивает создание электрической активности в виде короны, стримеров и лидеров в испытательном образце (а не во внешнем электроде), которые возникают в лопасти ВЭУ непосредственно перед попаданием молнии. После включения ионизации воздуха в испытательном образце стример будет продвигаться по направлению к противоположному электроду, который должен иметь крупную геометрическую форму для представления эквипотенциальной поверхности электрического поля на некотором расстоянии от выступающей части лопасти. Таким образом, влияние внешнего испытательного электрода на результаты испытания минимизировано.

Испытательная установка А является наиболее подходящей, так как обычно она допускает использование внешнего электрода большего размера (т. е. проводящую поверхность на лабораторной площадке) и создание наиболее реалистичного электрического поля вокруг образца лопасти.

Испытательная установка В предназначена для создания такого же электрического поля вокруг испытуемого образца, как в схеме испытательной установки А, но с возможностью использования более крупных и тяжелых образцов для испытания и размещения опорных конструкций на лабораторной площадке. При таком расположении электрод большого диаметра должен подвешиваться над образцом для испытания. Большой диаметр необходим для предотвращения нереалистичных напряженностей электрического поля, вызванных границами подвешенного электрода, с потенциальной возможностью пробоя между границами подвешенного электрода и испытательного образца, или между границами подвешенного электрода и плоскостью земли на лабораторном настиле, обходя образец лопасти для испытаний.

Примечание — Для каждого из образцов гибких лопастей можно рассматривать наклон лопасти под таким углом, что сила гравитации будет изгибать лопасть в геометрии, близкой к условиям эксплуатации. Этот принцип неподвижной лопасти применим и к схеме испытательной установки А, и к схеме В.

С.2.2.3.2 Испытательная установка А

Испытательную установку А применяют для испытаний больших частей лопасти, включающей репрезентативные части СМЗ. Общая схема испытательной установки А представлена на рисунке *С.1*.

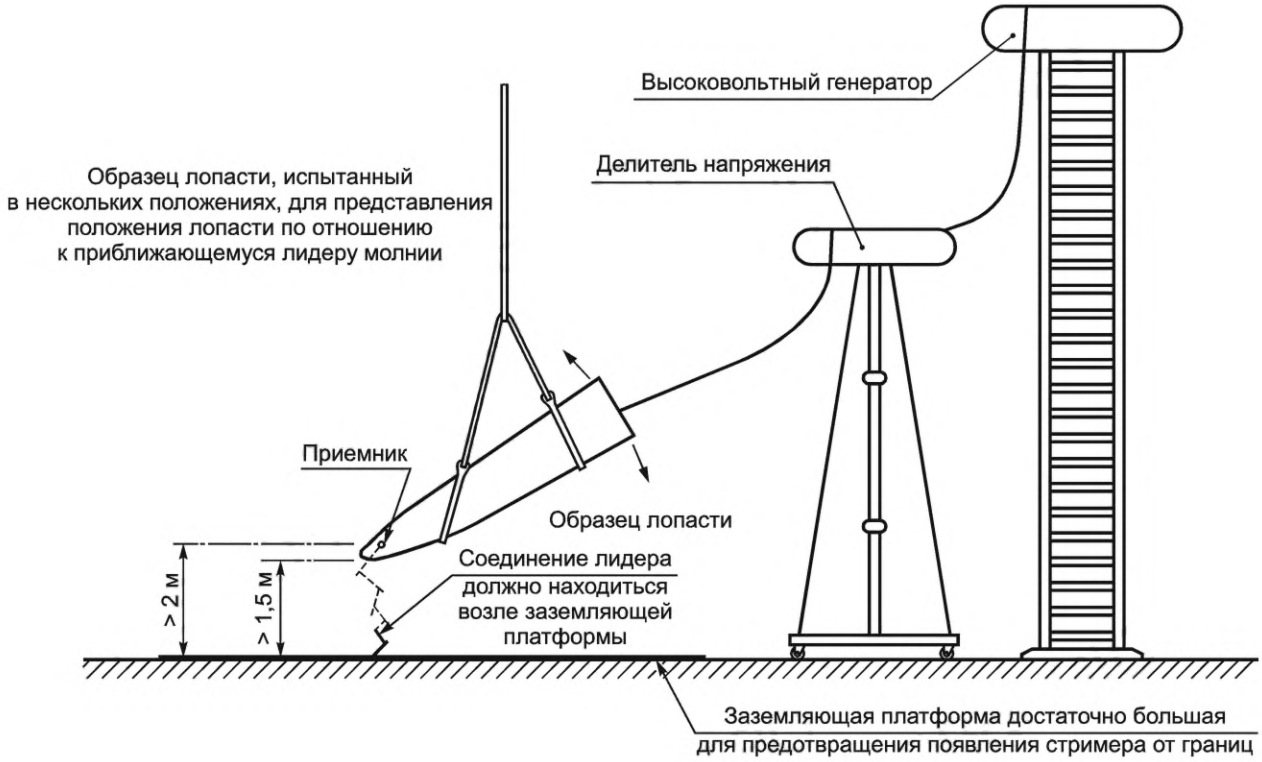


Рисунок *С.1* — Пример схемы испытательной установки А для приложения начального лидера

Расстояния, показанные на рисунке *С.1,* лишь ориентировочные. Минимальное расстояние воздушного зазора до проводящих частей должно быть 1,5 м.

Образец для испытания с СМЗ, соединенной с выходом генератора Маркса, возвышается над внешним электродом, заземляющей платформой большой площади. Заземляющая платформа должна быть достаточного размера для предотвращения краевых эффектов, т. е. предотвращения дуговых разрядов, прекращающихся на краю заземляющей платформы, а также однородной и достаточно ровной, чтобы обеспечить расположение соединительной точки пробоя в нижней части зазора. Образец испытывают под углами наклона 90°, 30° и 10° для всех четырех лопастей, как показано на рисунке *С.2.* Эти углы соответствуют типичным направлениям электрического поля, воздействующего на лопасти при попадании молнии в ВЭУ и отражают наиболее вероятные точки попадания молнии при преобладающем угле лопасти по отношению к полю (90°) и точки попадания в конечной части лопасти, которая может включать дополнительные особенности конструкции лопасти, влияющие на ее аэродинамические свойства (30° и 10°).

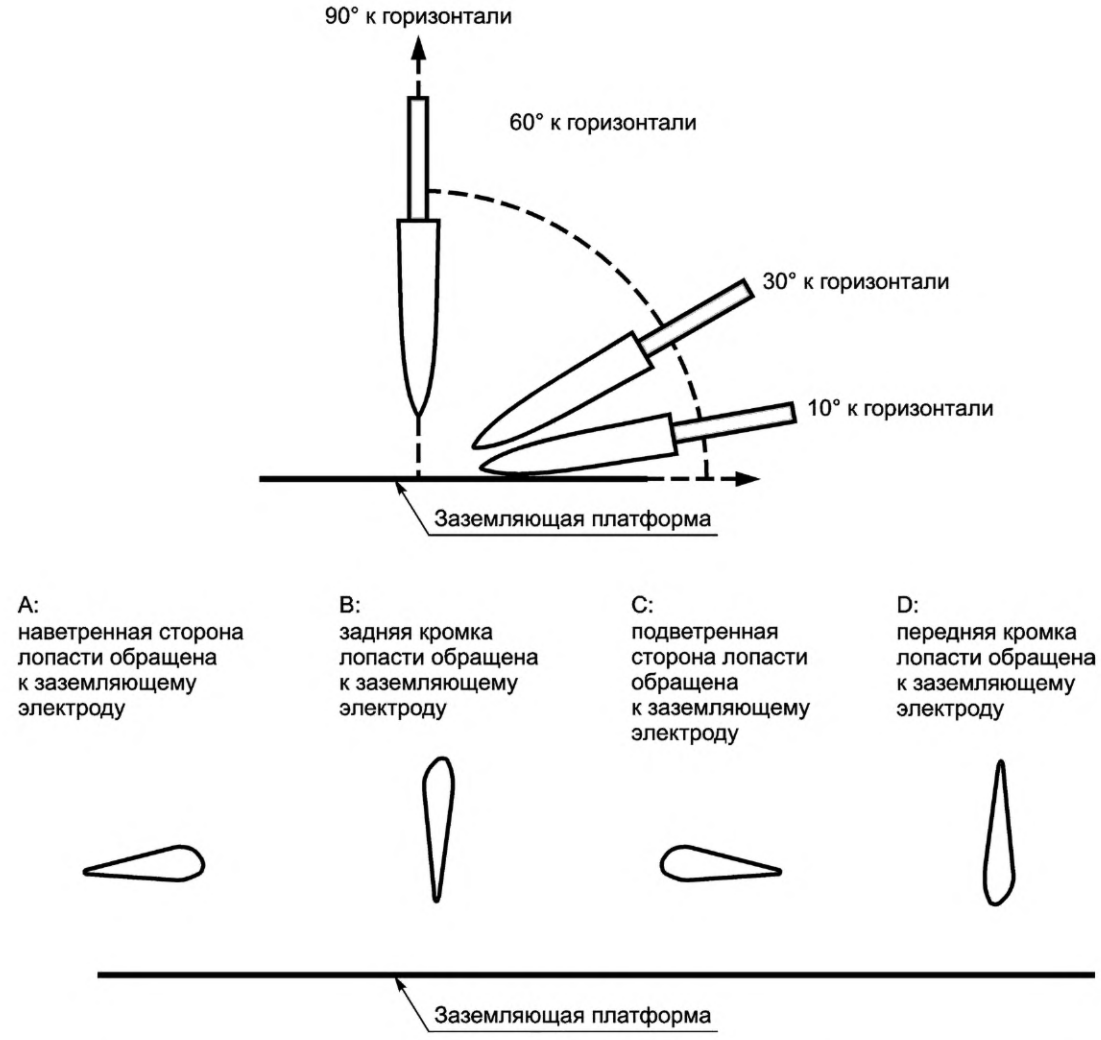


Рисунок *С.2* — Возможные ориентации схемы испытательной установки А для приложения начального лидера

Для двухлопастных ветроколес распределение попадания молнии вдоль лопастей будет отличаться от трехлопастных ветроколес, испытание попадания высоковольтного начального лидера должно выполняться даже с меньшими углами (желательно как можно ближе к 0°) с целью демонстрации адекватной эффективности перехвата для концевой части, а также для встроенных секций лопасти. В настоящее время обязательная для трехлопастных ветроколес последовательность испытаний также может применяться в отношении двухлопастных ветроколес, пока не будет собрано достаточно данных и не определены единые методы для двухлопастных ветроколес.

Примечание — Испытания влажных и загрязненных образцов лопастей может использоваться для подчеркивания специальных свойств конструкции для имитации естественно состарившейся лопасти, но такие испытания не являются обязательными.

Угол между осью по длине лопасти и внешним заземляющим электродом определяют, используя рисунок *С.3*. Для каждого положения лопасти во время испытаний, показанного на рисунке *С.2*, ось по длине лопасти проходит по линии, пересекающей ближайшую к заземляющему электроду поверхность (наветренная сторона при положении А, хвостовая часть при положении В, подветренная сторона при положении С и передняя кромка при положении D) на расстояниях 1 и 5 м от концевой части.



Рисунок *С.3* — Определение оси по длине лопасти в ходе испытаний на попадание удара молнии (*варианты положения лопасти A—D соответствуют рисунку С.2*)

Для конструкций лопастей с остроугольными шлицами, концевыми аэродинамическими поверхностями (КАП), вихревыми генераторами или другими особенностями конструкции лопасти, влияющими на ее аэродинамические свойства, положение оси по длине лопасти определяют аналогично тому, как показано на рисунке *С.3*. Схемы определения угла между осью по длине лопасти и внешним заземляющим электродом для лопасти с КАП показаны на рисунке *С.4*.

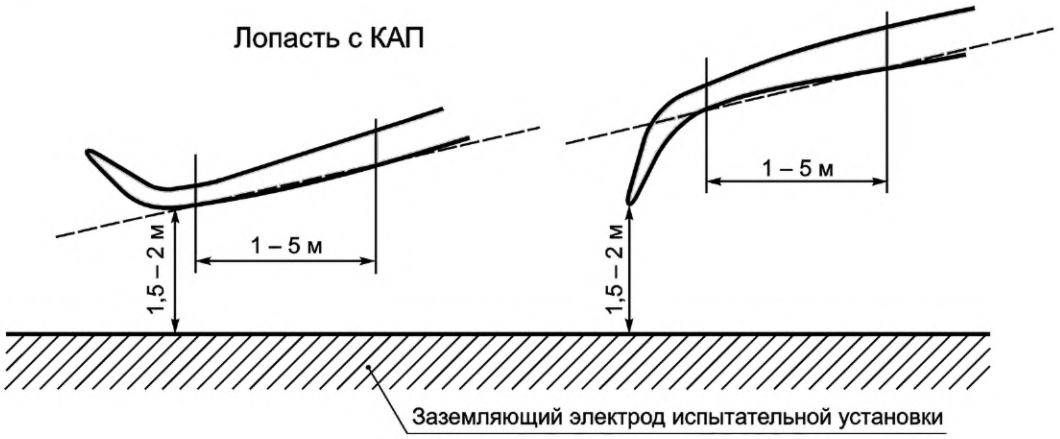


Рисунок *С.4* — Определение углов между осью по длине лопасти и внешним заземляющим электродом для лопасти с КАП при испытаниях высоким напряжением

При наличии на лопастях КАП расстояние до зазора между непроводящими частями может регулироваться в зависимости от конструкции КАП, при условии, что расстояние до молниеприемников и проводящих частей не менее 1,5 м, а минимальное расстояние воздушного зазора до непроводящих частей составляет 0,5 м.

Должны быть удовлетворены два условия для действительного испытания при использовании схемы испытательной установки А:

а) соединение стримеров должно возникать в нижней части воздушного зазора между наэлектризованной лопастью и заземляющей платформой, т. е. более половины расстояния до пробоя от образца лопасти. Это подтверждается фотографиями пробоев. Точка соединения лидера показана на рисунке *С.5*. Если это не происходит, то должна быть улучшена однородность поверхности или расстояние между лопастью и платформой должно быть

увеличено. Если произошло соединение ближе к лопасти, чем половина расстояния между лопастью и заземляющей платформой, и испытание закончилось успешным попаданием в обозначенное защитное устройство или конструкцию, то испытание должно считаться успешным. Если произошел пробой лопасти, то испытание считается непройденным и конкретное испытание не учитывается, и может потребоваться дополнительное испытание;

b) стример от заземляющей платформы не должен исходить от границы заземляющей платформы. В таком случае размер заземляющей платформы может быть увеличен. Следует помнить, что увеличение диаметра высоковольтного электрода может все равно не прекратить образования искрения на конце высоковольтного электрода и не обходить испытательный образец.

Если искровой разряд образуется на заземляющей платформе и испытание заканчивается успешным попаданием в обозначенное защитное устройство или конструкцию, испытание считается успешно пройденным. Если произошел пробой лопасти, то испытание считается непройденным и конкретное испытание не учитывается, и может потребоваться дополнительное испытание.

Условия a) и b) обычно выполняются, если соблюдены следующие расстояния:

- заземляющая платформа находится не менее чем в 2 м от ближайшего проводящего компонента (внутри/снаружи испытуемого образца);
- заземляющая платформа находится не менее чем в 1,5 м от покрытия ближайшего испытуемого образца;
- наименьшее расстояние заземляющей платформы не менее чем в 5 раз больше минимальной длины зазора между лопастью и заземляющей платформой.

Конкретные размеры и ориентации испытательного образца должны быть описаны в плане испытаний.

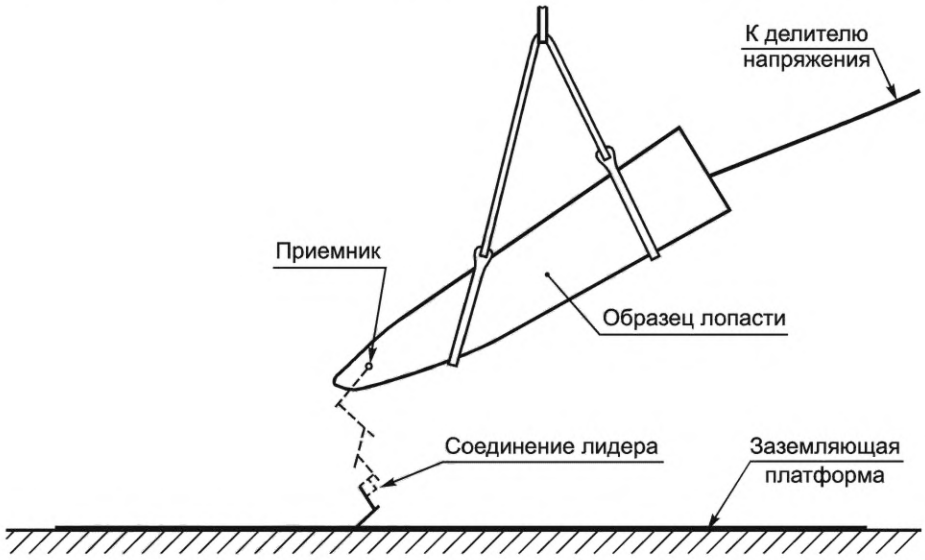


Рисунок С.5 — Пример точки соединения лидера не на испытательном образце

С.2.2.3.3 Испытательная установка В

Общая схема испытательной установки В представлена на рисунке *С.6*.

Образец испытывают в нескольких положениях, представляющих различные направления приближающегося лидера, как это показано на рисунке *С.2* для схемы испытательной установки А.

Расстояния, показанные на рисунке *С.6*, лишь ориентировочные. Минимальное расстояние воздушного зазора до проводящих частей должно быть 1,5 м.

Испытательная установка В является альтернативой испытательной установке А, а также подходит для испытания образцов, которые являются слишком крупными для поднятия в испытательной установке, таких как консоли, метеорологическое оборудование, ступицы, обтекатели ступицы и т. п. Недостаток данной схемы заключается в том, что заземляющая платформа на полу испытательной площадки может исказить электрическое поле возле испытуемого образца. Минимальное расстояние до внешних конструкций, приведенное в *ГОСТ 1516.2* или [8], составляет полтора минимальных пробивных промежутка между двумя противоположными электродами. Чтобы минимизировать искажение электрического поля в зазоре, заземляющая платформа и другие проводящие конструкции должны находиться на расстоянии, составляющем полторы длины зазора, т. е. 3 м при длине зазора в 2 м (рисунок *С.6*).

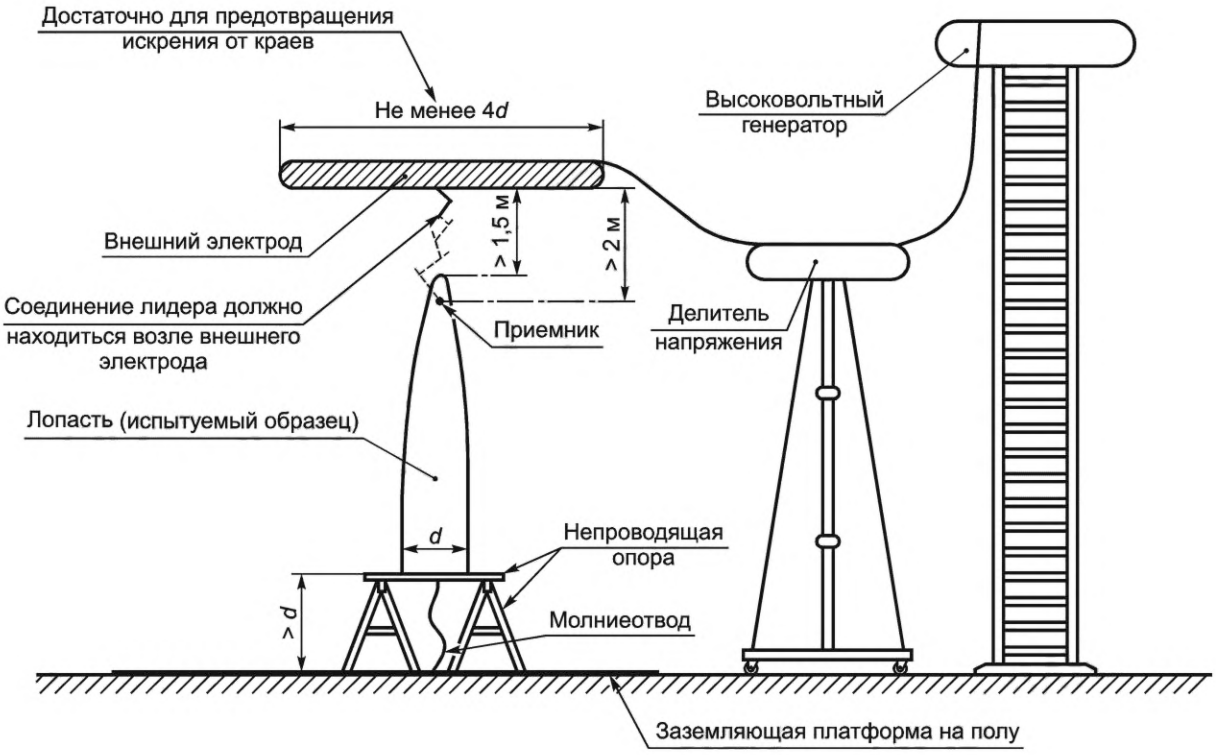


Рисунок *С.6* — Пример схемы испытательной установки В для приложения начального лидера

Образец для испытания находится над заземляющей платформой на опорах на расстоянии в 1,5 раза больше расстояния между молниеприемником на образце для испытания и внешним электродом, чтобы минимизировать воздействие заземляющей платформы на результаты испытания. Когда проводится испытание, внешний электрод подвешивается над образцом для испытания и находится под высоким напряжением. Внешний электрод должен быть достаточного размера для предотвращения краевых эффектов, т. е. предотвращения дуговых разрядов, прекращающихся на краю внешнего электрода. Образец обычно испытывают в двух или более положениях для отображения возможных направлений электрического поля, которые могут воздействовать на эту часть лопасти или другие конструкции при эксплуатации. Одна из опасностей схемы испытательной установки В заключается в том, что, когда внешний электрод имеет положительную полярность, искрение может возникнуть на концах этого электрода и закончиться на заземляющей платформе, обойдя испытательный образец.

При использовании схемы испытательной установки В испытание считается действительным при выполнении трех условий:

a) соединение стримеров происходит в верхней части воздушного зазора между внешним электродом под напряжением и образцом для испытания, т.е. на расстоянии более половины пробивного промежутка от образца лопасти. Это можно подтвердить фотографиями дуговых разрядов. На рисунке *С.6* представлена точка контакта лидеров. Если соответствие требованию не достигается, то должна быть улучшена однородность поверхности или должно быть увеличено расстояние между лопастью и платформой.

b) стример от внешних электродов не создается от края этого электрода. В этом случае размер внешнего электрода может быть увеличен. Однако следует помнить, что увеличение высоковольтного электрода может все равно не прекратить образования искрения на его конце и не обходить испытательный образец. В этом случае единственным решением является использование схемы испытательной установки А;

c) концевой зажим устройства защиты или других проводящих элементов в образце подвешен над заземляющей платформой на расстоянии более чем в 1,5 раза превышающим расстояние между молниеприемником на образце для испытания и внешним электродом.

Условия a) и b) обычно выполняются, если соблюдены следующие расстояния:

- внешний электрод находится не менее чем в 2 м от ближайшего проводящего компонента (внутри/снаружи испытательного образца);
- внешний электрод находится не менее чем в 1,5 м от покрытия ближайшего испытуемого образца;
- наименьшее расстояние внешнего электрода должно быть не менее чем в 5 раз больше минимальной длины зазора между лопастью и заземляющей платформой.

В плане испытания необходимо указать конкретные размеры и положения испытуемого образца.

С.2.2.4 Испытательное напряжение

Используемая форма кривой напряжения представляет собой медленно нарастающую кривую напряжения, достигающую пробоя образца перед предполагаемым пиковым значением напряжения. Эта форма кривой напряжения является наиболее характерной для электрического поля около конструкции при приложении начального лидера.

Изредка пробой может возникать после пика кривой напряжения. Такие испытания считают успешными и учитывают в общей оценке при условии, что это не происходит более чем в 10 % всех пробоев в течение всех испытаний. Если происходит прокол лопасти, испытание не считают успешным и не учитывают, и может быть выполнено дополнительное испытание.

Требуемой формы кривой можно достичь, используя импульсное напряжение коммутационного типа (см. [8]) со временем достижения пика (250 ± 50) мкс (т. е. 250 мкс ±20 %) и временем затухания до половины значения (2500 ± 1500) мкс (т. е. 2500 мкс ±60 %). Поскольку напряжение применяется по нарастающей до напряжения поверхностного пробоя, время спада не представляет особого интереса.

Типичная форма кривой напряжения показана на рисунке *С.7*.

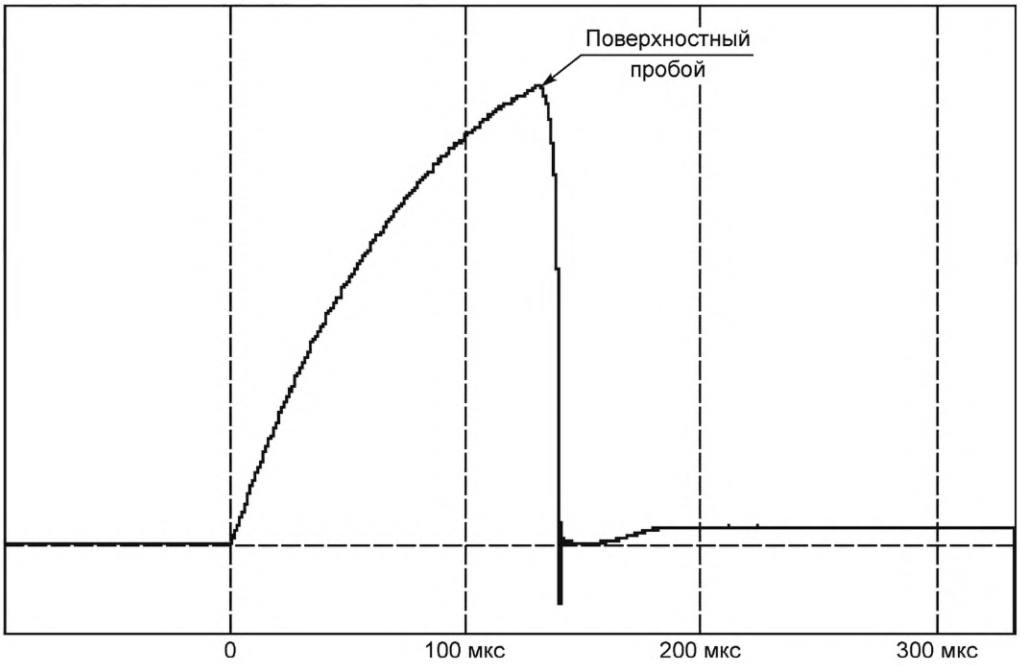


Рисунок *С.7* — Типичное повышение импульсного коммутационного напряжения до поверхностного пробоя (100 мкс на деление шкалы)

Следует использовать как минимум три разряда каждой полярности для каждого положения испытуемого образца относительно противоположного электрода, и общее количество испытательных разрядов должно составлять 54.

Ток разряда высоковольтного генератора обычно составляет менее 2000 А, что охватывает большинство токов лидера. Испытания с целью определения влияния токов удара молнии на композитные элементы конструкции лопасти и молниеотвод должны выполняться согласно *С.3*.

С.2.2.5 Данные, которые должны быть зафиксированы и внесены в протокол испытаний

Должны быть зафиксированы и внесены в протокол испытаний:

- фотографии, описание каждой испытательной установки и/или описание каждой схемы испытаний;
- графики формы кривой испытательного напряжения;
- видеозаписи всех испытаний для определения точки удара молнии и точки соединения пробоя. Данные записи должны полностью охватить испытуемые области образца. Одна или две камеры должны быть способны выполнить быстрый предварительный анализ испытания и моментально выявить любые пробои. Дополнительная камера, направленная внутрь образца лопасти, может быть полезна для слежения за поведением стримера/лидера во время испытаний;
- фотографию каждого положения электрода;
- фотографии мест нахождения пробоев или других значительных воздействий;
- значения параметров окружающей среды в лаборатории (например, температура, давление и влажность);
- даты проведения испытаний, данные о персонале, выполняющем и наблюдающем за испытаниями, а также данные о месте проведения испытания;

- описание любых отклонений от процедуры испытания;

- описание проведения каждого испытания с указанием полярности электрода, амплитуды напряжения и форм кривой (показывая время нарастания импульса и длительность) и результаты испытаний.

С.2.2.6 Проведение испытаний

Процедура испытаний общая для обоих вариантов испытательных установок (А и В).

При проведении испытаний следует строго соблюдать правила техники безопасности.

Испытания проводят следующим образом.

Проверка параметров генератора:

a) измеряют параметры окружающей среды в лаборатории;

b) очищают и исследуют испытуемый образец с использованием соответствующей методики по удалению влаги, пыли, инородных частиц и других загрязнителей, которые могут повлиять на результаты испытаний. Внимательно осматривают испытуемый образец на наличие любых повреждений, которые впоследствии можно будет перепутать с последствиями испытания, и помечают их, чтобы не спутать с последующими результатами испытаний;

c) оборачивают переднюю и заднюю кромку лопасти алюминиевой фольгой и заземляют эту фольгу к концевой части молниеприемника и вертикальному молниеотводу в месте, где он выходит из лопасти (обертывание лопасти рекомендуется, но не обязательно);

d) помещают образец под минимальным углом по отношению к горизонтальной заземляющей платформе в испытательной установке А или В и устанавливают начальную положительную полярность испытуемого образца. Опыт показал, что это условие приводит к низкой вероятности пробоя непроводящих материалов, поскольку стримеры, образующиеся от защитных устройств испытуемого образца, продвигаются дальше в воздушный зазор до момента соединения с противоположными стримерами от отрицательного электрода;

e) корректируют параметры генератора или воздушный зазор между образцом и противоположным электродом для получения определенной формы кривой и дугового разряда и инициируют испытание лопасти, при этом измеряя приложенное напряжение;

f) прикладывают разряд к испытуемому образцу, измеряя при этом приложенное напряжение и фотографируя прохождение дугового разряда. Убеждаются, что дуговой разряд все еще возникает на фронте восходящей волны до момента образования гребня кривой напряжения;

g) если форма кривой неверна или дуговой разряд не возник на фронте восходящей волны перед образованием гребня кривой напряжения, необходимо откорректировать параметры генератора или воздушный зазор между образцом и противоположным электродом для получения определенной формы кривой и дугового разряда;

h) если форма кривой в допустимых пределах, убирают фольгу, если она использовалась.

Далее выполняют основное воздействие:

1) прикладывают разряд к испытуемому образцу, измеряя приложенное напряжение и фотографируя прохождение дугового разряда. Убеждаются, что дуговой разряд все еще возникает на фронте восходящей волны до момента образования гребня кривой напряжения;

2) если произошло попадание в конструкцию лопасти за пределами предназначенной СМЗ, например, если произошел неожиданный пробой покрытия слоя, делают оценку, чтобы определить, прошел ли испытание образец. Если образец не прошел испытание, то результаты испытаний аннулируют. Попадание в изолированные поверхности, за которым следует дуговой разряд на поверхности к молниеприемнику, не считается непрохождением испытания;

3) повторяют шаги 1) и 2), пока не будут проведены испытания при положительной полярности при одинаковых условиях;

4) переключают полярность высоковольтного генератора и убеждаются, что полярность испытуемого образца отрицательна относительно заземляющей платформы (испытательная установка А) или внешнего электрода (испытательная установка В);

5) повторяют шаги 1) и 2), пока не будут проведены испытания при отрицательной полярности при одинаковых условиях;

6) перемещают испытуемый образец (испытательная установка А) или внешний электрод (испытательная установка В) в соответствии с процедурой испытания;

7) повторяют шаги 1)—5), пока не будут испытаны все сочетания ориентаций лопасти и полярности с общим количеством разрядов пятьдесят четыре, как предусмотрено процедурой испытаний.

Примечание — Если нет дугового разряда, особенно при отрицательном заряде лопасти, следует провести дополнительное испытание, чтобы обеспечить пятьдесят четыре действительных разряда, документированных фотографиями каждого разряда.

С.2.2.7 Оценка результатов испытаний

Для прохождения испытания на начальное касание лидера все пятьдесят четыре разряда должны попасть в систему перехвата молний (дискретные приемники, проводящее покрытие, металлическая сетка и т. п.), документально оформленные с помощью пятидесяти четырех отдельных разрядов. Не допускается никаких пробоев через изоляцию конструкции лопасти, пробивные заряды, попадающие снаружи системы воздушного перехвата считаются не прохождением.

Все пятьдесят четыре разряда должны появиться в виде разрядов в воздухе или вдоль наружной поверхности лопасти от предназначенных устройств воздушного перехвата на лопасти до удаленной заземляющей платформы (испытательная установка А) или внешнего электрода (испытательная установка В).

Точки попадания всех разрядов должны быть зафиксированы. Если не все разряды попали в систему перехвата молний, в протоколе испытаний должна быть указана причина (приведен анализ причин) получения такого результата.

После испытания на попадания начального высоковольтного лидера участки, подверженные прямому попаданию, должны быть подвергнуты испытанию на последующее касание молнии согласно *С.2.3* и проверочному испытанию большим током согласно *С.3*, определяющему расчетную способность выдерживания тока молнии.

***С.2.3* Испытание на последующее касание молнии**

С.2.3.1 Цель испытания

После испытания на попадания начального высоковольтного лидера согласно *С.2.2* участки, подверженные прямому попаданию, должны быть подвергнуты испытанию на последующее касание молнии согласно *С.2.3* и проверочному испытанию большим током согласно *С.3*, определяющему расчетную способность выдерживания тока молнии.

Предназначение этого описания см. ниже:

1) как в случае нисходящего удара, так и в случае восходящего удара, когда первый перехват удара молнии выполнен правильно на предназначенной системе воздушного перехвата, за первым ударом нисходящего разряда молнии или начального длительного удара восходящей молнии может последовать темный период и затем повторное попадание лидера в систему воздушного перехвата. Испытание должно показать, что разрыв между лидером и воздушным перехватом происходит как поверхностный искровой разряд, вместо пробоя покрытия лопасти;

2) опыт показал, что недостаточно изолированные основания приемников или другие установки вместе с молниеприемниками могут привести к пробоям и неустранимым повреждениям в полевых условиях. В ходе этого испытания исследуется конструкция для таких дефектов, и если испытание пройдено успешно, то вероятность отказов в полевых условиях минимальная.

Во всех случаях в ходе испытания удастся определить, вызывает ли поле, необходимое для формирования разряда вблизи молниеприемников (боковые и конечные приемники), возникновение разрядов на наружной поверхности лопасти или пробивает лопасть и обеспечивает свечение вдоль внутренней поверхности.

Это испытание применимо к поверхностям лопасти ВЭУ вблизи молниеприемников.

С.2.3.2 Образец для испытаний

Образец для испытаний должен представлять собой часть полномасштабной лопасти, например, вершину лопасти или другую поверхность, в которой есть молниеприемник или другое защитное устройство.

Характерные образцы для испытаний — это вершина лопасти, также используемая для испытаний по касанию начального лидера из *С.2.2.3*, схемы А или В, или другой образец, который характерен для конструкции в месте вероятного попадания молнии, воздушного перехвата или аналогичной. Пример может быть секцией лопасти длиной 2 м, который вырезан из более длинного образца лопасти. Любые покрытия поверхности, включая грунт и краску, должны предоставляться для обеспечения реальных характеристик разряда поверхности.

С.2.3.3 Испытательная установка

Общий вид стандартной испытательной установки, показывающий испытуемый образец в поперечном разрезе и характерное положение электрода для испытаний, приведен на рисунке *С.8*. Испытания выполняют в одном или нескольких положениях электрода, представляющих возможные направления развертки лидера, как это изображено на рисунке *С.9*.

Испытуемый образец устанавливают на опору над заземляющей платформой на расстоянии не менее 1,5-кратного минимального расстояния искрового разряда, как это описано в *ГОСТ 1516.2* и [8], *пункт 4.2*.

Приемник(и), вертикальные молниеотводы и любые проводящие компоненты, прикрепленные к СМЗ лопасти как часть конструкции, должны иметь потенциал Земли;

После этого соединяют выходные зажимы высоковольтного генератора с высоковольтным электродом. Электрод должен иметь сферическую форму с радиусом (50 ± 5) мм. Поверхность высоковольтного электрода должна находиться на расстоянии (50 ± 5) мм от поверхности испытуемого образца для представления приложенного напряжения каналом молнии, перекатывающимся по поверхности испытуемого образца. Или СМЗ лопасти может быть подсоединена к высоковольтному генератору, и сферический электрод может быть заземлен.

Подготавливают оборудование для измерения и записи прикладываемого испытательного напряжения.

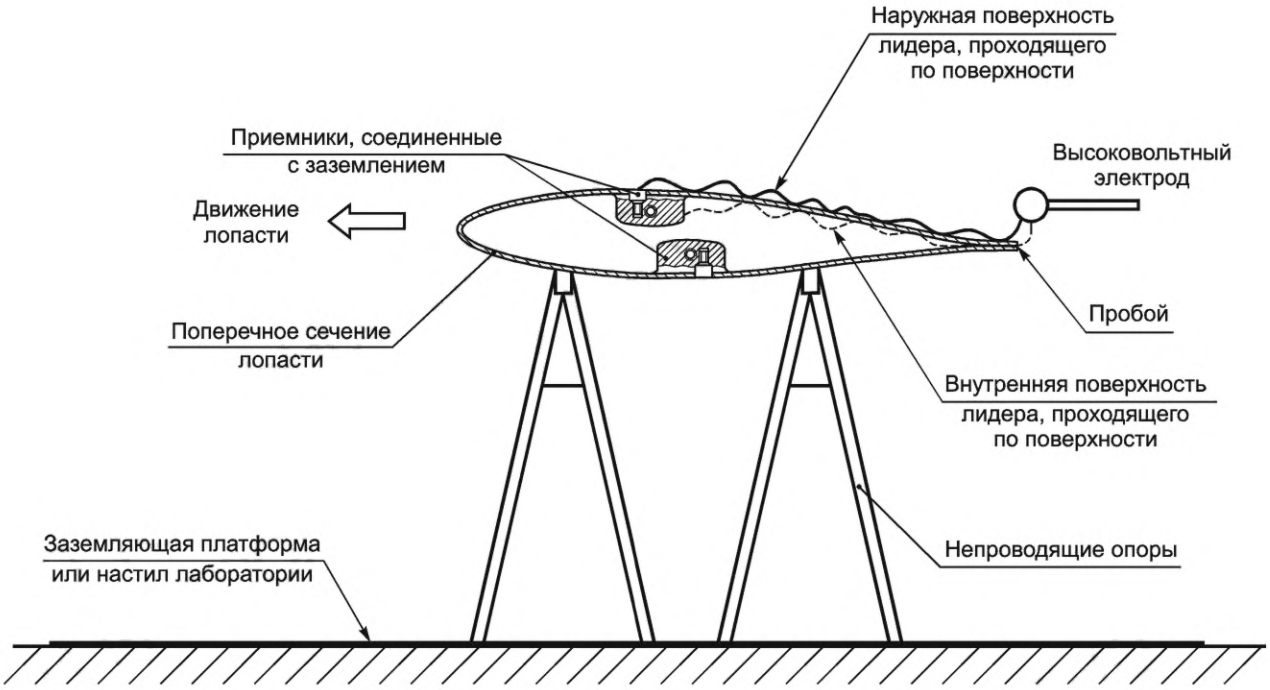


Рисунок *С.8* — Схема испытательной установки для испытания на последующее касание молнии

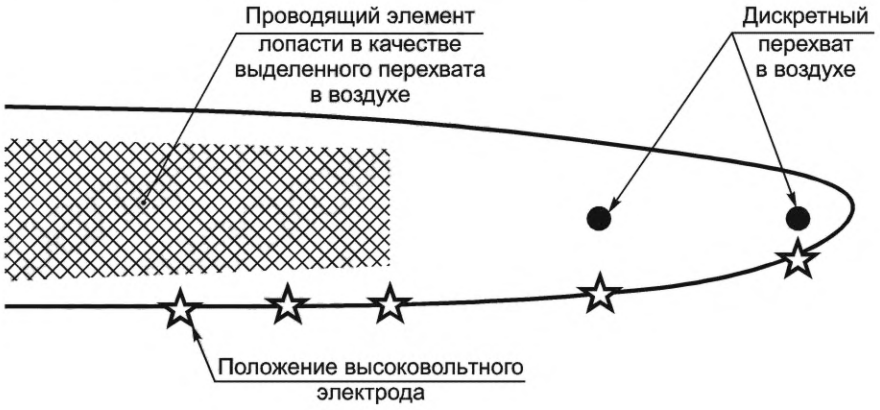
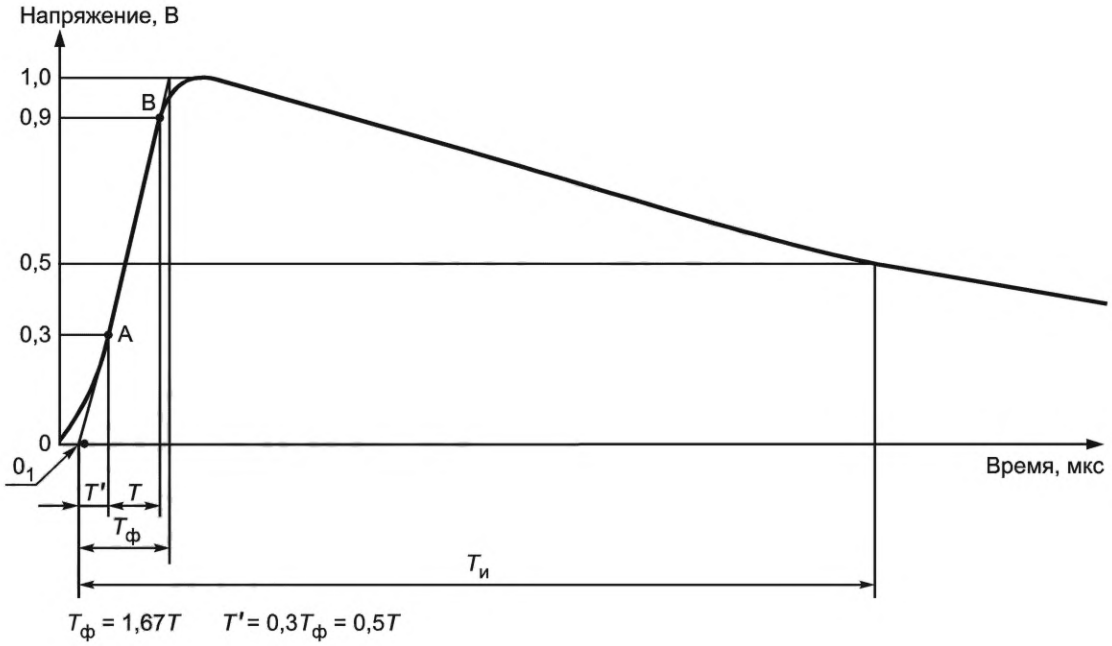


Рисунок *С.9* — Положения высоковольтного электрода для испытания на последующее касание удара молнии

С.2.3.4 Испытательное напряжение

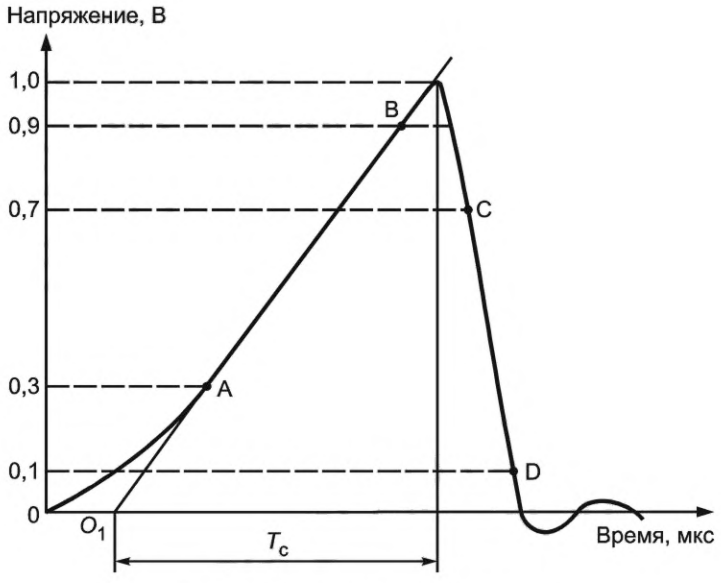
Электрическое поле, связанное с каналом скользящего разряда для нисходящих ударов молнии и повторного касания лидера, создают быстро увеличивающиеся электрические поля, которые представляют наиболее соответствующей кривой изменения напряжения грозового импульса и которые определены в *ГОСТ 1516.2—97, раздел 5* (см. также [8]). Полный грозовой импульс показан на рисунке *С.10*.



$T_ф$ — длительность фронта импульса, равная 1,2 мкс ± 30 %; $T_и$ — длительность импульса, равная 50 мкс ± 20 %; 0_1 — условное начало импульса. Для осциллограмм с линейной временной разверткой это будет точка пересечения с осью абсциссы прямой линии, проведенной через точки A и B на фронте импульса

Рисунок *C.10* — Полный грозовой импульс (стандартный грозовой импульс напряжения)

Форму импульса, показанную на рисунке *C.10*, применяют вместе с виртуальным пиковым напряжением, которое выше, чем необходимый искровой разряд в молниеприемник, поэтому разряд возникает на фронте волны, как это показано на рисунке *C.11*.



T_c — предразрядное время импульса

Рисунок *C.11* — Грозовой импульс, срезанный на фронте

Дуговой разряд на фронте волны, иллюстрируемый на рисунке *C.11*, представляет результат скорости повышения тока удара (d*i*/d*t*), умноженного на индуктивное сопротивление лидера молнии или канала нисходящего удара молнии или поля, связанного с повторным касанием лидера после первого обратного удара.

Примечание — Для длинных воздушных зазоров, превышающих 0,5 м, принято, что дуговой разряд наступает позже, чем гребень формы кривой 1,2/50 мкс.

С.2.3.5 Данные, которые должны быть зафиксированы и внесены в протокол испытаний

Должны быть зафиксированы и внесены в протокол испытаний:

- фотографии и описание каждой испытательной установки и положения электрода;
- видеозаписи или фотографии всех испытаний. Камеры должны обеспечить 360° охват испытуемого образца. Одна камера должна быть способна выполнить быстрый предварительный анализ испытания и моментально выявить любые пробои. Дополнительная камера, направленная внутрь образца лопасти, может быть полезна для слежения за поведением стримера/лидера во время испытаний;
- фотографии мест нахождения пробоев или других значительных воздействий;
- значения параметров окружающей среды в лаборатории (например, температура, давление и влажность);
- даты проведения испытаний, данные о персонале, выполняющем и наблюдающем за испытаниями, а также данные о месте проведения испытания;
- описание любых отклонений от процедуры испытания;
- описание проведения каждого испытания с указанием полярности электрода, амплитуды напряжения и форм кривой (показывая время нарастания импульса и длительность) и результаты испытаний.

С.2.3.6 Проведение испытаний

При проведении испытаний следует строго соблюдать правила техники безопасности.

Испытания проводят следующим образом:

1) измеряют параметры окружающей среды в лаборатории;

2) изучают и соблюдают правила техники безопасности;

3) внимательно осматривают испытуемый образец на наличие любых повреждений, которые впоследствии можно будет перепутать с последствиями испытания, и отмечают их, чтобы не спутать с последующими результатами испытаний;

4) калибруют генератор и измерительные устройства, чтобы обеспечить правильную форму кривой и пиковое напряжение, более высокое, чем требуется для создания дугового разряда между испытательным электродом и молниеприемником;

5) очищают и исследуют испытуемый образец с использованием соответствующей методики по удалению влаги, пыли, инородных частиц и других загрязнителей, которые могут повлиять на результаты испытаний;

6) подают разряд на испытуемый образец, при измерении приложенного напряжения и фотографировании прохождения дугового разряда;

7) осматривают испытуемый образец и документируют результаты. Отмечают и фотографируют любые пробои или другие воздействия на испытуемом образце;

8) если произошел пробой, делают оценку, чтобы определить, прошел ли испытание образец. Если образец не прошел испытание, то испытание аннулируют;

9) повторяют шаги 6) — 8) для трех разрядов каждой полярности и для положений электрода, показанных на рисунке *С.9*. Электрод располагают на заднем фронте 50 мм выше покрытия лопасти на том же радиусе, что и боковой приемник;

10) в случае использования других конструкций молниеприемников, включая «проводящие элементы», такие как металлическая сетка, композитный материал из углеродного волокна или другие проводящие части конструкции лопасти, которые могут служить в качестве молниеприемника. Они должны быть испытаны, как показано на рисунке *С.9*, т. е. должно быть приложено по три разряда каждой полярности при наихудшем положении электрода (определяются изготовителем) на заднем фронте 50 мм над покрытием лопасти.

С.2.3.7 Оценка результатов испытаний

Для успешного прохождения испытания на последующее касание удара молнии не должно быть никаких пробоев изолирующих конструкций лопасти. Все дуговые разряды должны появляться в виде поверхностных разрядов или воздушных разрядов над поверхностью испытательных электродов, предназначенных выполнять функции молниеприемника на лопасти.

С.3 Испытания на физическое повреждение большим током

С.3.1 Общие положения

Данные испытания проводят для определения влияния попадания молнии в поверхность лопасти или гондолы, а также тока, уходящего от места попадания. Данное влияние можно оценить в точках попадания молнии и вдоль пути тока молнии.

С.3.2 Испытание на вхождение дуги

С.3.2.1 Цель испытания

После испытания на попадание начального высоковольтного лидера согласно *С.2.2*, участки, подверженные прямому попаданию, должны подвергнуться испытанию на последующее касание молнии согласно *С.2.3* и проверочному испытанию большим током согласно *С.3*, определяющему расчетную способность выдерживания тока молнии.

Данное испытание применяется для таких конструкций, как лопасти и гондолы ВЭУ, которые подвергаются воздействию прямого попадания молнии.

Испытание проводят для определения прямого (физическое повреждение) воздействия, которое может возникнуть в точках возможного приложения канала молнии к лопасти или где большой ток и плотности энергии могут уходить от точки вхождения во время приложения молнии. Примерами являются молниеприемники для лопасти и соответствующие токоотводы, металлическая фольга, ленты молниеуловителя, крепежные и соединительные элементы на пути тока молнии вблизи точки попадания.

Испытание допускается использовать для оценки:

- повреждения от попадания дуги;
- создания мест локального перегрева;
- эрозии металла в молниеприемниках;
- характеристик сегментированных и неразрывных лент молниеуловителя;
- соответствия защитных материалов и устройств;
- воздействия магнитной силы;
- воздействия взрывной и ударной волны;
- поведения стыков и узлов аппаратуры.

С.3.2.2 Образцы для испытаний

Данные испытания допускается проводить на полномасштабных серийных изделиях или на опытных образцах. Данные испытания допускается также проводить на панелях, вырезанных образцах или частях лопасти, или других сборках ВЭУ. Панели, вырезанные образцы или части должны быть изготовлены с применением технологических процессов, красок и других покрытий, соединений и материалов, репрезентативных для серийного производства. Что касается защитных устройств, для которых требуется определенное напряжение для ионизации, например, таких как сегментированные ленты молниеуловителя, длина ионизируемого испытуемого образца должна быть достаточно короткой для ионизации во время испытания большим током, т. к. генераторы большого тока обычно не вырабатывают более 100 кВ.

С.3.2.3 Испытательная установка

Испытательную установку и испытуемый образец подготавливают к испытаниям следующим образом:

- устанавливают испытуемый образец в креплении, которое должно прочно его удерживать и обеспечивать расстояние до других проводящих поверхностей не менее 1,5-кратного минимального расстояния дугового разряда, как это описано в *ГОСТ 1516.2*, а также [8], *пункт 4.2* (может быть уместно поместить образец для испытаний вертикально, а не горизонтально, например в случае расплавления метала и его нахождения на лопасти, что создает риск пожара);
- заземляют всю аппаратуру на корпус испытуемого образца, который обычно заземлен;
- подсоединяют обратный привод генератора к сборке так, чтобы испытательные токи отводились от образца таким же образом, как если бы в лопасть или гондолу попала молния. Убеждаются, что контролируются магнитные силы и другие взаимодействия, имеющие отношение к току, протекающему внутри установки, таким образом, они будут отображать реальную ситуацию и не будут сильно влиять на результаты испытания;
- размещают испытательный электрод на 50 мм выше области на образце, которая будет оцениваться. Для большинства испытаний на вхождение дуги электрод должен быть с «отведением струи», как показано на рисунке *С.12*, т. к. такой электрод наилучшим образом отображает воздействия ударной волны при ударах реальной молнии и уменьшает количество электродного материала, наносимого на поверхность испытуемого образца. Этот тип электрода продемонстрировал наилучшее представление воздействия ударной волны естественных попаданий молнии без воздействия на поверхность испытуемого образца в нереалистичной манере. Положение электрода должно быть не менее чем на 50 мм направлено вдоль хорды от границы молниеприемника в направлении заднего фронта. Точка ввода должна представлять наиболее вероятные точки износа. Точка ввода в испытании должна быть определена положением провода цепи зажигания, как указано на рисунке *С.13*.

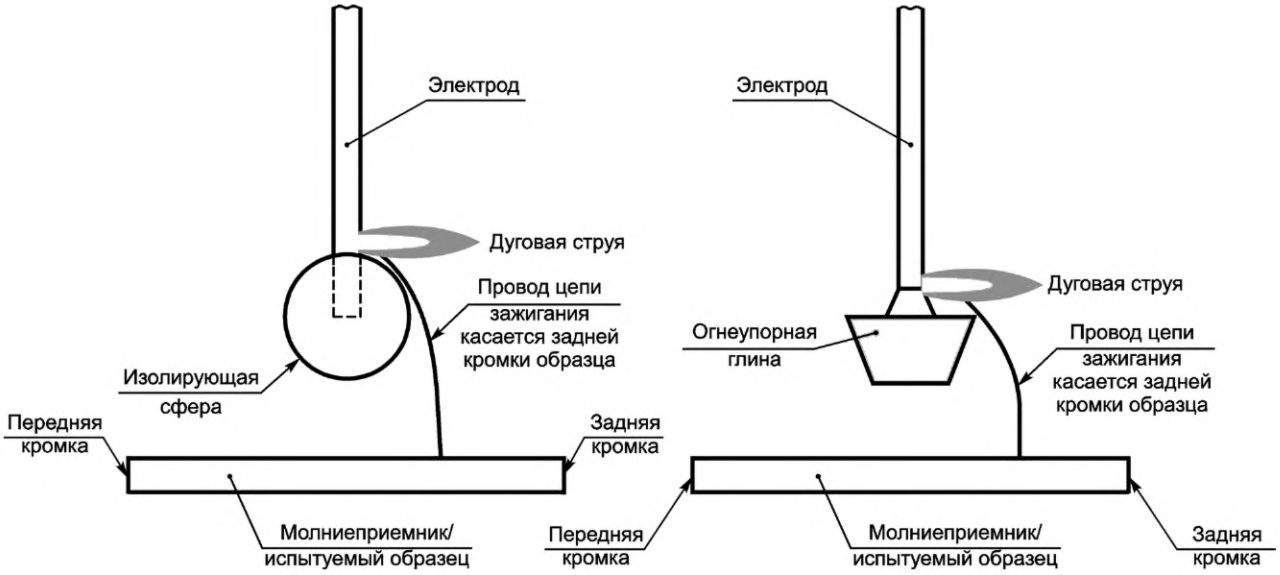


Рисунок *С.12* — Стандартные испытательные электроды с отведением струи

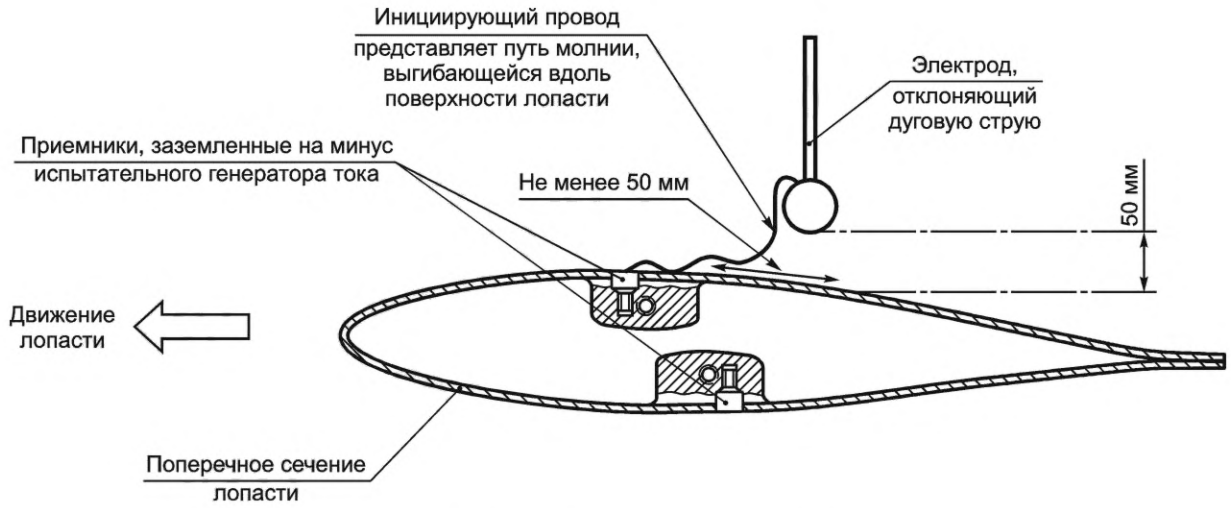


Рисунок *С.13* — Схема воздействия большим током для испытания на вхождение дуги

Примечание — Боковое смещение электрода относительно молниеприемника позволяет верифицировать воздействие ударной волны от канала молнии;

- устанавливают отрицательную полярность испытательного электрода для создания максимального повреждения, если испытуемый образец чувствителен к полярности, полярность испытательного электрода должна быть отрицательной (полярность испытуемого образца — положительной).

Примечание — Опыт показал, что физическое воздействие при попадании молнии в молниеприемник на лопастях не зависит от полярности;

- если необходимо, для направления дуги на конкретную интересующую точку на испытуемом образце используют тонкий металлический провод диаметром не более 0,5 мм, для чего, например, просверливают через изоляционный слой небольшое отверстие, не превышающее диаметром 2 мм. Прежде всего такой провод используют, если проводящая часть ниже изоляционного барьера (например, тонкий слой стекловолокна над конструкцией из углепластика). Такой подход полезен для генераторов, работающих при низком напряжении. Использование такого провода не влияет отрицательно на результаты испытания, т. к. он испаряется, как только начинает протекать ток;
- устанавливают измерительное и записывающее оборудование.

С.3.2.4 Испытательный ток

Испытательные токи включают первый короткий удар и длительный удар молнии с амплитудами, уровнями заряда и удельными энергиями, как это определено в таблице *С.1* для УМЗ I, зона ОА1. Удары обычно накладываются в одном разряде. Параметры данных испытательных токов представлены в таблице *С.1*. Как определено в молниевой обстановке для интересующей реальной конструкции (часть лопасти), эти уровни испытаний масштабированы согласно фактическому воздействию при размещении точки попадания. Два компонента тока могут применяться в одном разряде, если это возможно, или применяться в отдельных разрядах, как предложено в таблице *С.3*. Параметры этих испытательных токов показаны в таблицах *С.1* и *С.2*.

Предоставление параметров тока в пределах их допусков *I* (±10 %), *W/R* (−10 % /+45 %) и Q_{flash} (±20 %) в том же самом импульсе, может достигаться с помощью приблизительно экспоненциально затухающего тока с T_2 в диапазоне 350 мкс, или колебательного импульса тока с аналогичной удельной энергией, сопровождаемой непрерывным током, питающим оставшийся заряд. Компонент постоянного тока, питающий оставшуюся часть заряда, демонстрирует пиковый ток в диапазоне 200—1200 А ±10 %, и время разряда протекания тока составляет 0,5 с допуском ±10 %, регулируемое для ввода необходимой величины заряда с допусками согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-1*.

С.3.2.5 Данные, которые должны быть зафиксированы и внесены в протокол испытаний

Должны быть зафиксированы и внесены в протокол испытаний:

- фотографии, описание испытательной установки и/или описание схемы испытаний;
- фотографии испытуемого образца до, в течение и после проведения испытаний. Рекомендуется проводить съемку инфракрасными видеокамерами для определения мест локального перегрева в ходе испытаний;
- фотографии и описание повреждений испытуемого образца;
- значения параметров окружающей среды в лаборатории (например, температура, давление и влажность);
- даты проведения испытаний, данные о персонале, выполняющем и наблюдающем за испытаниями, а также данные о месте проведения испытания;
- описание любых отклонений от процедуры испытания;
- описание проведения каждого испытания с указанием полярности электрода, амплитуды напряжения и форм кривой (показывая время нарастания импульса и длительность) и результаты испытаний.

С.3.2.6 Проведение испытаний

При проведении испытаний следует строго соблюдать правила техники безопасности.

Испытания проводят следующим образом:

1) измеряют параметры окружающей среды в лаборатории;
2) калибруют генератор и средства измерения следующим образом:
   - устанавливают вместо испытуемого образца проводящую шину или панель со свойствами материала, аналогичными свойствам материала испытуемого образца;
   - соединяют шину или панель с обратным испытательным током генератора;
   - выполняют испытание, при этом измеряя форму кривой приложенного тока;
   - если уровень тока или форма кривой не находятся в пределах допусков [*I* (±10 %), *W/R* (−10 %/+45 %) и Q_{flash} (±20 %)], то регулируют параметры генератора и повторяют третий и четвертый шаги, пока не будет получена требуемая форма кривой;
   - убирают шину или панель и устанавливают испытуемый образец;
3) выполняют испытание на испытуемом образце;
4) проводят осмотр испытанного образца и документируют результаты;
5) если необходимо, помещают электрод в новое положение на испытуемом образце и повторяют шаги 3) и 4).

Чтобы продемонстрировать соответствие уровню УМЗ I, должны быть приложены следующие импульсы тока к системе на шаге 3). В зависимости от конкретной оценки воздействия молнии первый импульс обратного удара (испытания 1—3 в таблице *С.1*) масштабируется по амплитуде.

В программе испытаний должно быть обоснование для масштабирования импульсов первого обратного удара, используемых в терминах пикового тока, удельной энергии и уровней заряда. Содержание заряда в импульсе длительного удара является постоянным по длине лопасти, и изготовитель должен указать критерии успешного прохождения испытаний по отношению к прогнозируемому сроку службы и интервалам техобслуживания рассматриваемого элемента.

Первые три импульса (испытания 1—3 в таблице *С.1*) следует использовать для определения соответствия выбранного уровня молниезащиты конструкции лопасти или гондолы и ВЭУ в целом (критерии успешного прохождения испытаний), поскольку следующие импульсы (испытания 4—6 в таблице *С.1*) характеризуют износ за счет содержания заряда в длительном ударе.

Должен использоваться пригодный импульс тока достаточной величины для запуска столба дуги, чтобы создать необходимый дуговой разряд испытательного зазора, предшествующего току длительного удара в испытаниях 4—6.

Таблица *С.1* — Параметры испытательного тока, соответствующие уровню УМЗ I

Испытание	Пиковый ток, кА	Удельная энергия, МДж/Ом	Заряд Q_{flash}, Кл
1—3 (три испытания)	200 ± 10 %	10 (−10 % / +45 %)	100 ± 20 %
4—6 (три испытания)	—	—	200 ± 20 %
Накопленное содержание заряда			900 ± 20 %
Примечание — Диапазоны допустимых отклонений испытательных параметров определены в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 62305-1*.			

С учетом поверхностной эрозии молниеприемников за счет проводимого заряда повреждение является кумулятивным. Это означает, что накопленный заряд, проводимый во время испытания, поможет определить интервал обслуживания и частоту технического обслуживания, наиболее приближенных к реальным условиям.

Для встроенных в лопасти молниеприемников пиковый ток и поэтому удельная энергия должны быть масштабированы согласно воздействию молнии, как это определено в 8.2.2. Уровни заряда, тем не менее, поддерживаются, так что даже боковые приемники, встроенные в вершину лопасти, должны испытываться уровнями заряда, указанными в таблице *С.1*.

Для конструкций, в которых используют несколько молниеприемников, все устройства следует испытывать по полной программе испытаний. Если конструкция лопасти состоит из многочисленных молниеприемников, изготовленных аналогично, необходимо испытывать только одно изделие каждого типа как часть испытания этого типа.

Кроме того, для площадок с воздействием зимних молний должны использоваться следующие импульсы (испытание 7—*X* в таблице *С.2*, *X* должен быть не менее девяти [три дополнительных испытания] для одного отдельного элемента защиты) для характеристики износа точек молниеприемников, наиболее близких к вершине лопасти за счет содержания заряда длительного удара зимней молнии. Элементу может потребоваться замена после ряда испытаний из таблицы *С.2* (это означает, что допускается прерывать испытание после минимальных девяти и заменять элементы после каких-либо испытаний 10—*X* в том случае, если это надлежащим образом оформлено в отчете об испытании), и изготовитель должен затем сравнить износ СМЗ, обнаруженный в ходе испытаний, а также ожидаемый износ в соответствующем месте, и использовать полученную информацию для адаптации циклов техобслуживания на конкретной площадке.

Таблица *С.2* — Параметры испытательного тока для испытания на воздействие зимних молний (максимальная длительность 1 с)

Испытание	Пиковый ток, кА	Удельная энергия, МДж/Ом	Заряд Q_{flash}, Кл
7—*X* (*X* ≥ 9)	—	—	600 ± 20 %
Накопленное содержание заряда (зимняя молния)			минимум 3 раза по 600
Примечание — Диапазон допустимых отклонений испытательного заряда определен в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 62305-1*.			

Должен использоваться пригодный импульс тока достаточной величины для запуска столба дуги, чтобы создать необходимый дуговой разряд испытательного зазора, предшествующего току длительного удара молнии.

С.3.2.7 Оценка результатов испытаний

После испытаний следует выполнить тщательную оценку соответствия испытанных образцов критериям успешного прохождения испытаний. Критерии в том числе должны включать параметр шума, условия оценки поверхностной эрозии, простоты замены, другие условия, необходимые для оценки, указанной в *С.3.2.1*.

Для прохождения испытаний на вхождение дуги изготовитель должен определить предполагаемое воздействие на рассматриваемые части ВЭУ, сравнить предполагаемые интервалы обслуживания с результатами испытаний и подтвердить, что изношенные части конструкций могут быть заменены безопасно, а также как планировалось в конце срока службы.

***С.3.3* Испытание проводимым током**

С.3.3.1 Цель испытания

Испытание проводят с вертикальными молниеотводами, соединительными элементами и другими механически жесткими или гибкими соединениями, которые находятся на пути(ях) прохождения тока между молниеприемниками и системой заземления ВЭУ.

Это испытание используют для оценки:

- проводимости тока молнии;
- повышения температуры в проводниках, изоляции проводников, соединениях и остальных частей конструкции;

- дугообразования и искрения в соединениях уравнивания потенциалов, подшипниках, скользящих контактах, искровых разрядниках, щетках и общих соединительных элементах;

- влияния магнитных сил;

- соответствия электропроводности композитных материалов из углеродного волокна и приводов.

С.3.3.2 Образец для испытаний

Образец для испытаний должен представлять собой полномасштабное серийное изделие в виде частей или небольших участков молниеотводов или проводящих конструкций, в которые входят приводы между конструкционными частями или узлами, такими как клеевые металлизированные соединения, жесткие соединения, подшипники или щетки. Образцы конструкции должны быть достаточно большими для характерного распределения тока молнии, которое необходимо достичь.

Соединительные элементы внутри лопастей могут испытываться без полного встраивания в оболочку лопасти. Это позволяет тщательно оценить характеристики в ходе и после испытания.

С.3.3.3 Испытательная установка

Испытательную установку и испытуемый образец подготавливают к испытаниям следующим образом:

- устанавливают испытуемый образец в креплении, которое должно прочно его удерживать и обеспечивать расстояние до других проводящих поверхностей не менее 1,5-кратного минимального расстояния дугового разряда, как это описано в *ГОСТ 1516.2*, а также [8], *пункт 4.2*, таким образом, чтобы не влиять на результаты испытаний;

- заземляют всю аппаратуру на корпус испытуемого образца, который обычно заземлен;

- подсоединяют обратный привод генератора к сборке так, чтобы испытательные токи отводились от образца таким же образом, как если бы в лопасть или другую конструкцию попала молния. Полярность генератора обычно значения не имеет. Убеждаются, что контролируются магнитные силы и другие взаимодействия, имеющие отношение к току, протекающему внутри установки, таким образом, они будут отображать реальную ситуацию. На рисунке *С.14* показана типичная компоновка испытательного стенда;

- устанавливают датчики и измерительное оборудование.

Примечание — Полукоаксиальная компоновка проводников и испытуемых образцов может использоваться для минимизации магнитных сил за счет токов в проводниках, которые передают испытательный ток к образцу и от него, а также для достижения реалистичного распределения тока через образец. На рисунке *С.14* показана типичная компоновка для испытания секции лопасти ВЭУ. Измерения индуктированных напряжений в электропроводку, которая может быть смонтирована в лопасти, также может быть сделана в ходе испытания проводимым током, как это описано в разделе 8.

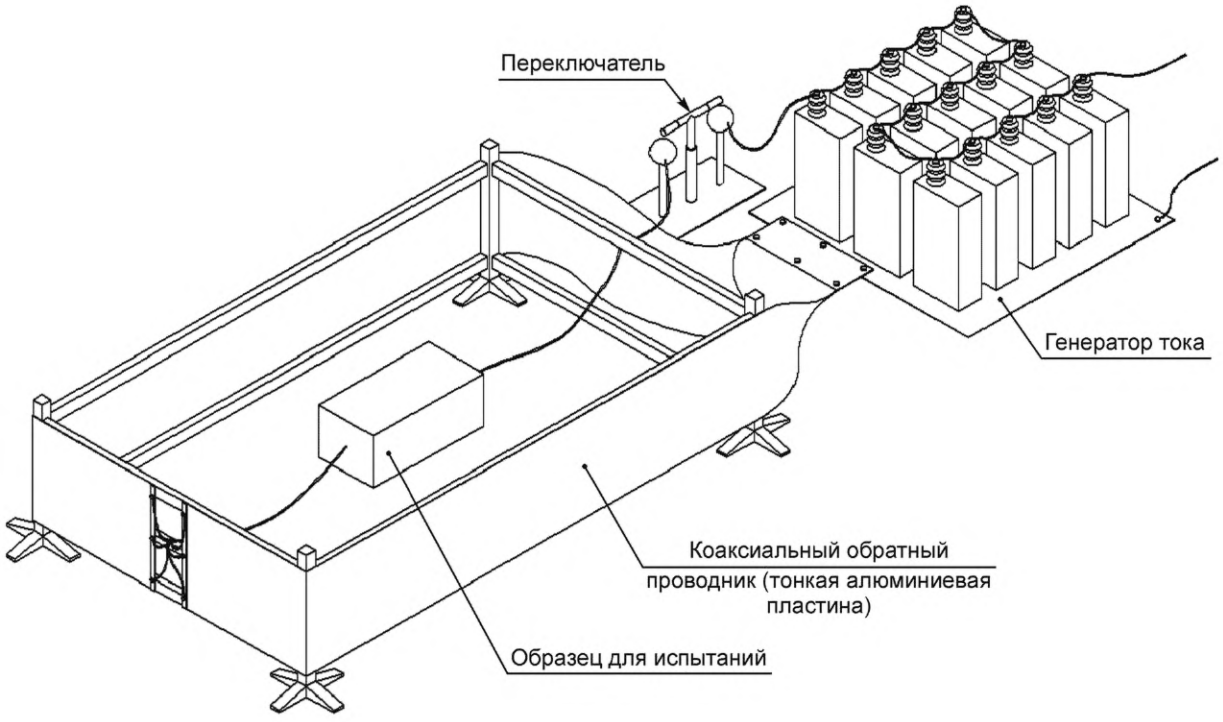


Рисунок *С.14* — Пример испытательного стенда для испытаний проводимым током

С.3.3.4 Испытательный ток

Прикладываемые испытательные токи включают первый короткий удар с амплитудами, уровни заряда и удельной энергии, как предполагается для молниевой обстановки, как это определено изготовителем для конкретной конструкции. Важные параметры этих испытательных токов показаны в таблицах *С.3* и *С.4*.

Конкретные испытательные токи, которые необходимо приложить, зависят от уровня защиты, который определен для испытуемой конструкции ВЭУ. Амплитуды испытательного тока, которые необходимо приложить к образцам, представляющим только часть проводящего поперечного сечения конструкции (например, два параллельных вертикальных молниеотвода в лопасти), должны быть рассчитаны согласно 8.2.2 для лопастей. Изготовитель должен определить параметры испытательного тока, отрицательно воздействующие на каждый путь тока и каждую поверхность раздела конструкции. Такой ток часто повышается до 50 %, что является причиной возможного дисбаланса в распределении тока по поперечному сечению конструкции.

Подробный анализ распределения тока и связанных элементов тока в различных путях конструкции может выявить, что параметры кривой не соответствуют линейному масштабу с пиковой величиной тока. В технических условиях испытания должны быть определены аргументы в пользу масштабированных параметров тока.

С.3.3.5 Данные, которые должны быть зафиксированы и внесены в протокол испытаний

Должны быть зафиксированы и внесены в протокол испытаний:

- фотографии, описание испытательной установки и/или описание схемы испытаний;
- фотографии точек ввода;
- фотографии испытуемого образца до, в течение и после проведения испытаний. Может быть полезна съемка инфракрасными видеокамерами для определения мест локального перегрева в ходе испытаний;
- фотографии и описание повреждений испытуемого образца;
- значения параметров окружающей среды в лаборатории (например, температура, давление и влажность);
- даты проведения испытаний, данные о персонале, выполняющем и наблюдающем за испытаниями, а также данные о месте проведения испытания;
- описание любых отклонений от процедуры испытания;
- описание проведения каждого испытания с указанием полярности электрода, амплитуды напряжения и форм кривой (показывая время нарастания импульса и длительность), удельные энергии и переносы заряда в применимых местах испытаний, результаты испытаний.

С.3.3.6 Проведение испытаний

При проведении испытаний следует строго соблюдать правила техники безопасности.

Испытания проводят следующим образом:

1) измеряют параметры окружающей среды в лаборатории;

2) калибруют генератор и средства измерений следующим образом:

   - отсоединяют генератор высокого и обратного тока от испытуемого образца и подсоединяют к токоведущей шине возле или вместо испытуемого образца. Шина должна иметь такие же свойства материала, как и у материала испытуемого образца;
   - выполняют испытание с шиной, измеряя форму(ы) кривой приложенного тока;
   - если уровень тока или форма кривой не находятся в пределах допусков [I (±10 %), W/R (−10 %/+45 %) и Q_{flash} (±20 %)], то регулируют параметры генератора и повторяют второй и третий шаги, пока не будет получена требуемая форма кривой;
   - убирают шину и снова подсоединяют генератор к испытуемому образцу;

3) очищают образец соответствующим способом, убирая пыль, инородные частицы и другие загрязнители, которые могут отрицательно влиять на результаты испытания;

4) измеряют последовательное сопротивление испытуемого образца с учетом критериев успешного прохождения испытаний;

5) проводят испытание образца;

6) выполняют осмотр испытанного образца и документируют результаты;

7) повторяют шаги 5) и 6), если в соответствии с планом испытаний необходимы дополнительные испытания.

Чтобы продемонстрировать соответствие УМЗ I, должны быть приложены следующие импульсы тока к системе на шаге 5). В зависимости от конкретной оценки воздействия молнии первый импульс обратного удара (испытания 1—3) масштабируется по амплитуде.

В плане испытаний должно быть обоснование для масштабирования импульсов первого обратного удара, используемых в терминах пикового тока, удельной энергии и уровней заряда. Содержание заряда в импульсе длительного удара является постоянным по длине лопасти. Изготовитель должен указать критерии успешного прохождения испытаний по отношению к прогнозируемому сроку службы и интервалам техобслуживания рассматриваемого элемента.

Для неподвижных элементов соединений (кабельных наконечников, болтовых соединений и других неподвижных частей) должна использоваться последовательность испытаний по таблице *С.3*. Первые три импульса (испытания 1—3 в таблице *С.1*) должны использоваться для определения соответствия выбранного УМЗ испытуемой конструкции (критерии успешного прохождения испытаний).

Таблица *С.3* — Параметры испытательного тока, соответствующие УМЗ I

Испытание	Пиковый ток, кА	Удельная энергия, МДж/Ом	Заряд Q_{flash}, Кл
1—3 (три испытания)	200 ± 10 %	10 (−10 %/+45 %)	100 ± 20 %
Примечание — Диапазоны допустимых отклонений испытательных параметров определены в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 62305-1*.			

Для гибких путей (искровых разрядников, скользящих контактов, щеток, подшипников, и т. д.) эрозия основания дуги за счет воздействия заряда удара с большой продолжительностью также должна быть включена, и должна использоваться последовательность испытаний по таблице *С.4*. Содержание заряда импульсов тока длительного удара является постоянным по длине лопасти, а изготовитель должен указать критерии успешного прохождения испытаний по отношению к предполагаемому сроку и интервалам технического обслуживания рассматриваемого компонента.

С учетом эрозии искровых разрядников, скользящих контактов, щеток, подшипников, и т. д. за счет проводимого заряда ущерб будет кумулятивным. Это означает, что накопленный заряд, проводимый в ходе испытания, поможет определить интервал между проверками, частоту замены, если будет приложена реалистичная общая величина заряда.

Таблица *С.4* — Параметры испытательного тока, соответствующие УМЗ I (для гибких путей)

Испытание	Пиковый ток, кА	Удельная энергия, МДж/Ом	Заряд Q_{flash}, Кл
1—3 (три испытания)	200 ± 10 %	10 (−10 %/+45 %)	100 ± 20 %
4—6 (три испытания)	—	—	200 ± 20 %
Накопленное содержание заряда			900 ± 20 %
Примечание — Диапазоны допустимых отклонений испытательных параметров определены в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 62305-1*.			

Кроме того, для площадок с воздействием зимних молний должны использоваться следующие импульсы [испытание 7—*X* в таблице *С.5*, *X* — должен быть не менее 9 (3 дополнительных испытания) для одного отдельного элемента защиты] для характеристики износа искровых разрядников, скользящих контактов, щеток, подшипников, и т. д. Элементу может потребоваться замена после ряда испытаний по таблице *С.5* (это означает, что допускается прерывать испытание и заменять изношенные элементы после любых испытаний 7—*X*, если это надлежащим образом оформлено в отчете об испытании), и изготовитель должен сравнить износ СМЗ, обнаруженный в ходе испытаний, а также ожидаемый износ в соответствующем месте, и использовать полученную информацию для адаптации циклов технического обслуживания на конкретной площадке.

Таблица *С.5* — Параметры испытательного тока для испытаний на воздействие зимних молний (максимальная длительность 1 с)

Испытание	Пиковый ток, кА	Удельная энергия, МДж/Ом	Заряд Q_{flash}, Кл
7—X (X ≥ 9)	—	—	600 ± 20 %
Накопленное содержание заряда (зимняя молния)			Кратное (минимально) 600
Примечание — Диапазоны допустимых отклонений испытательного заряда определены в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 62305-1*.			

С.3.3.7 Оценка результатов испытаний

Считается, что соединительный элемент или электрические интерфейсы прошли испытание, если предназначенная электромеханическая функциональность элемента является ненарушенной, включая следующее:

a) не образуется дуга, наносящая вред функциональности в ходе последовательности испытаний, кроме образования естественной дуги при соединении с движущимися частями, включая открытые дуги, как часть конструкции (искровые разрядники, щетки, скользящие контакты и т. п.);

b) контактное сопротивление для неподвижных металлических соединений, измеренное лабораторным микроомметром, подающим 10 А на малые образцы и измеряющим с использованием измерений сопротивления на четырех зажимах, как можно ближе к элементу соединения, с результатом менее 1 мОм. В случае когда элемент соединения или проводник(и) изготовлены из нержавеющей стали, допускается значение 2,5 мОм;

c) в ходе осмотра, измерения и/или испытаний не обнаружено вредного изменения функциональности соединений, включающих углепластик;

d) на неподвижном соединении не видно никаких трещин в результате осмотра лица с нормальным зрением, или носящего очки (без увеличения), нет ослабленных частей или деформации, ухудшающей ее нормальное использование;

e) для болтовых зажимных соединений крутящий момент при отвинчивании выше 0,25 и менее 1,5-кратного крутящего момента при затяжке. При наличии соединений с более чем одним поворотом испытывается только момент отвинчивания первого поворота;

f) для безвинтовых элементов, таких как сжатые соединительные элементы, каждый проводник образца должен испытываться независимо на механическое растягивающее усилие, равное (900 ± 20) Н в течение 1 мин. У соединений с многожильными проводниками каждый проводник испытывается по отдельности. Считается, что соединительный элемент прошел испытания, если движение проводника в ходе испытания составляет менее 1 мм и отсутствует повреждение соединителя или проводника;

g) конструктивная целостность лопасти или секции лопасти не нарушена под воздействием тока. Изготовитель конкретного компонента или системы обязан оценить, являются ли повреждения приемлемыми, и задокументировать, что ВЭУ может продолжать эксплуатироваться до следующей плановой проверки.

Для конструкций или элементов, которые предназначены для замены в ходе нормальной эксплуатации, изготовитель должен сравнить предполагаемые интервалы обслуживания с результатами испытаний и верифицировать, что изношенные детали конструкций могут быть заменены безопасно и, как планировалось, перед истечением их срока службы.

Приложение *D*
(справочное)

Оценка воздействия молнии

D.1 Общие положения

В разделе *D.2* описывается методология определения среднегодового количества ударов молнии, попадающих в ВЭУ в составе ВЭС. Методология содержит указания по оценке данного параметра при воздействии различных условий, которые были выявлены по всему миру.

В разделе *D.3* разъясняются термины.

В разделе *D.4* приведена оценка вероятности повреждения ВЭУ.

В разделе *D.5* приведена оценка величины ущерба L_X, нанесенного ВЭУ.

D.2 Методология определения среднегодового количества ударов молнии или ударов молнии в ВЭУ в составе ВЭС и молниевая активность восходящих молний

D.2.1 Общие положения

Данная методология не является точной в ее нынешней форме и необходимо определить значения или диапазон значений, а также соответствующие неопределенности различных параметров. Если необходимы результаты высокой точности, то необходимо определить значения и уменьшить неопределенности, связанные с каждым параметром. Это можно сделать с помощью полевого анализа и калибровки.

D.2.2 Определение среднегодового количества ударов молнии в ВЭУ за счет оценки увеличения коэффициента местонахождения для учета восходящих молний

Как сказано в разделе 7, коэффициент размещения C_D может использоваться для учета местного увеличения частоты молний (например, горная местность) и количественно определять увеличение восходящих молний, инициируемых при определенных условиях, которые благоприятствуют перехвату инициированных от ВЭУ молний.

N_{SG}, которое определено в 7.2.2, используется для нисходящих молний и практически не имеет отношения к частоте восходящих молний от высоких конструкций; однако для оценки годового количества N_D рекомендуется в 7.2.2.4 использовать коэффициент размещения C_D с целью регулирования вычисленного N_D t, чтобы оно совпадало с фактической частотой ударов молнии, касающихся ВЭУ, увеличенное на количество восходящих молний. В результате коэффициент размещения за счет молниевой активности в зимний период C_{DWL} становится сравнительно высоким в местах со сравнительно высокой молниевой активностью в зимний период (т. е. когда молниевая активность зимой высокая по сравнению с молниевой активностью летом/в теплое время года).

Среднегодовое количество ударов молнии определяют по формуле

$$N_D = N_{SG} \cdot A_D \cdot C_D \cdot 10^{-6}. \qquad (D.1)$$

Параметры уравнения (*D.1*), за исключением коэффициента размещения, C_D, можно вычислить, как это описано в разделе 7. Увеличение среднегодового количества ударов молнии в ВЭС происходит за счет объема молниевой активности зимой, сложности горного или холмистого рельефа, а также высоты над уровнем моря места расположения ВЭС.

Для количественной оценки влияния размещения ВЭУ, коэффициент размещения C_D определяют как сумму коэффициентов факторов, характеризующих местонахождение:

$$C_D = C_{DWL} + C_{DC} + C_{DH}, \qquad (D.2)$$

где C_{DWL} — коэффициент зимней молниевой активности на месте размещения ВЭУ;

C_{DC} — коэффициент сложности рельефа на месте размещения ВЭУ;

C_{DH} — коэффициент высоты над уровнем моря на месте размещения ВЭУ.

C_{DWL}, C_{DC} и C_{DH} могут определяться различным способом в зависимости от местных условий.

Рекомендуемые значения коэффициентов размещения в обобщенной форме для использования в различных местах приведены в таблице *D.1*.

Таблица *D.1* — Рекомендуемые значения отдельных коэффициентов размещения

Зимние молнии C_{DWL}		Сложность рельефа C_{DC}			Высота над уровнем моря C_{DH}	
Уровень активности	Значение[1] C_{DWL}	Описание	Коэффициент сложности[2]	Значение C_{DC}	Описание	Значение C_{DH}
Активность отсутствует	0	Равнинный или спокойный	< 0,3	1	< 800 м	0
Низкая активность	2	Холмистый	0,3—0,4	3	800—1000 м	1
Средняя активность	4	Гористый	> 0,4	4	> 1000 м	2
Высокая активность	6[3]					

[1] Степень зимних молний можно найти с помощью общих среднемноголетних карт грозовой активности (см. например рисунок *D.1*) или с помощью анализа грозовой активности в интересующем регионе.

[2] Вычисляется на основе рисунка *D.2*.

[3] В некоторых местах может быть даже выше.

Сложность рельефа учитывает воздействие окружающих элементов рельефа на увеличение молниевой активности (для нисходящих и восходящих молний). Это может быть сделано путем оценки уклона вокруг ВЭУ. Уклоны можно вычислять как отношение между разностью высот h и горизонтальным расстоянием d от ВЭУ в диапазоне от 300 до 1000 м. Рекомендуется получить профиль гор и выбрать уклон в направлении самого высокого уклона. В диапазоне от 300 до 1000 м выбирают значение расстояния, которое ведет к самому высокому уклону. Этот метод уклонов может не подходить для всех сложностей рельефа. Определение рельефа в таблице *D.1* также может использоваться для определения сложности (равнинного или спокойного рельефа, холмистого или гористого).

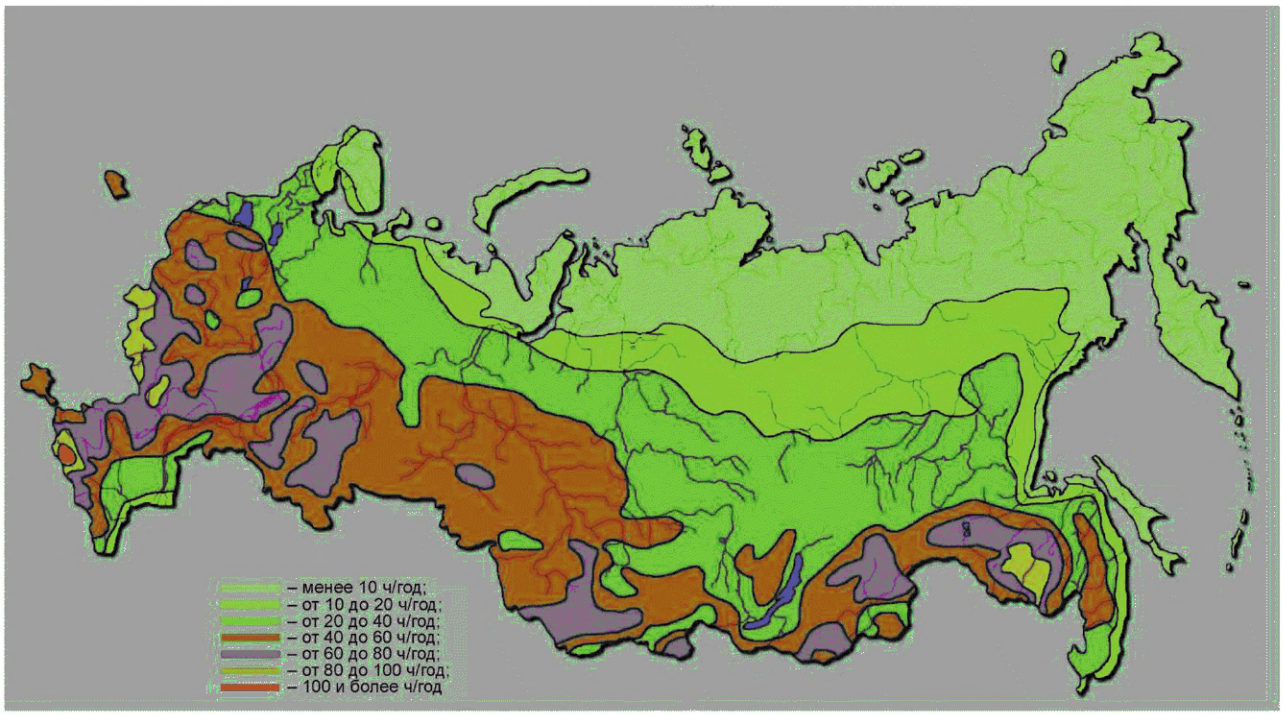


Рисунок *D.1* — Среднемноголетняя карта годовой грозовой активности на территории РФ (ч/год)

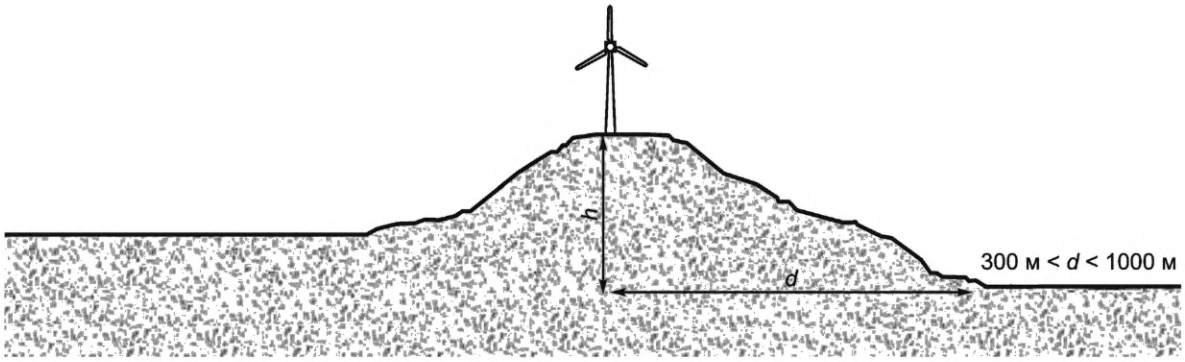


Рисунок *D.2* — Описание отношения *h/d*

***D.2.3* Процент восходящих молний на ВЭС**

Восходящую молниевую активность следует ожидать в отношении высоких конструкций, таких как ВЭУ, описанные в приложении *B*. Опыт показал, что даже ВЭУ, расположенные в равнинной местности, без зимней молниевой активности могут быть подвержены значительному проценту восходящих молний. На восходящую молниевую активность согласно механизмам, описанным в приложении *B*, может оказывать влияние зимняя молниевая активность, а также местный рельеф в месте размещения ВЭС. В таблице *D.2* представлен процент восходящих молний в условиях зимней молниевой активности для ВЭУ стандартной высоты в равнинной местности. Процент восходящих молний, представленный в таблице *D.2*, может быть выше для ВЭС, размещающихся в горной местности или на большой высоте над уровнем моря.

Таблица *D.2* — Диапазон восходящей молниевой активности как функция зимней молниевой активности для ВЭС, расположенной в равнинной местности

Уровень зимней молниевой активности	Процент восходящих молний, %
Высокая активность	80—99
Средняя активность	40—90
Низкая активность	20—50
Отсутствие активности	10—40

***D.3* Разъяснение терминов**

***D.3.1* Повреждение и ущерб**

Термины, используемые для описания повреждений и ущерба, определены в *ГОСТ Р МЭК 62305-2*.

Первичным источником повреждения ВЭУ является ток, возникший в результате удара молнии. В зависимости от точки, в которую попала молния, удары молнии в ВЭУ разделяют на следующие четыре типа:

S1 — удары молнии в ВЭУ (удары молнии в конструкцию);

S2 — удары молнии вблизи ВЭУ (удары молнии вблизи конструкции);

S3 — удары молнии в линию коммуникаций, соединенную с ВЭУ;

S4 — удары молнии вблизи линии коммуникаций, соединенной с ВЭУ.

Примечания

1 Удары молнии вблизи ВЭУ не считают угрозой, если есть защита от прямых ударов молнии в ВЭУ.

2 Удары молнии S4 вблизи линии коммуникаций не считают угрозой, если есть защита от прямых ударов молнии в ВЭУ.

Повреждения из-за удара молнии разделяют на четыре типа:

D_{1D} — поражение электрическим током живых существ в результате прямого попадания молнии в этих живых существ;

D_{1T} — поражение электрическим током живых существ в результате резистивной или индуктивной связи;

D_2 — опасное искрение, вызывающее пожар или взрыв и/или приводящее к механическим или химическим воздействиям, которые также могут представлять опасность для окружающей среды;

D_3 — импульсные перенапряжения за счет всех источников повреждений.

Повреждение ВЭУ молнией может быть ограничено частью ВЭУ или может распространяться на всю ВЭУ.

Молния, попавшая в линию коммуникаций, может вызвать повреждение самой линии (например, кабеля) или электрической и электронной систем, связанных с линией коммуникаций.

Каждый тип повреждения, одиночного или в сочетании с другими, может вызвать последующий ущерб ВЭУ. Типы ущерба, которые возможны на ВЭУ:

L_1 — травмирование живых существ. Это последствие D_{1D}, D_{1T}, D_2 и даже D_3;

L_2 — физическое повреждение (тепловое, механическое, химическое или от взрыва и т. п.) ВЭУ. Это последствие D_2 и даже D_3 в конструкциях с риском взрыва;

L_3 — повреждение электрических и электронных систем. Это последствие D_3.

Тип повреждения L_3 может на неприемлемом уровне ухудшить доступность внутренних систем ВЭУ (например, системы управления).

Риск R — это относительное значение вероятного среднегодового ущерба. Для каждого типа повреждения, которое может возникнуть в ВЭУ, должен быть оценен соответствующий риск.

Для оценки рисков R должны быть определены и вычислены соответствующие компоненты риска (частичные риски в зависимости от источника и типа повреждения).

Каждый риск R представляет собой сумму компонентов риска. При вычислении риска компоненты риска могут быть сгруппированы в соответствии с источником и типом повреждения.

Риски, связанные с ударами молнии в ВЭУ (источник S1):

R_{AD} — риск, связанный с типом повреждения L_1 (травмирование живых существ), вызванного разрядом молнии, ослепляющим живые существа на ВЭУ;

R_{AT} — риск, связанный с типом повреждения L_1 (травмирование живых существ) вследствие поражения электрическим током из-за возникновения опасного уровня напряжения прикосновения и шагового напряжения внутри и снаружи ВЭУ в зоне на расстоянии до 3 м от башни;

R_B — риск, связанный с типами повреждений L_1 и L_2 (физическое повреждение), вызванный опасным искрением внутри ВЭУ, вызывающем пожар или взрыв, которые также могут представлять опасность для окружающей среды;

R_C — риск, связанный с типами повреждений L_1 и L_2, вызванных отказом внутренних систем из-за импульсного перенапряжения от грозовых разрядов.

Риски, связанные с ударами молнии вблизи ВЭУ (источник S2), включают:

R_M — риск, связанный с типами повреждений L_1 и L_2, вызванных отказом внутренних систем из-за импульсного перенапряжения от грозовых разрядов.

Риски, связанные с ударом молнии в линии коммуникаций, соединенные с ВЭУ (источник S3):

R_U — риск, связанный с типом повреждения L_1, вследствие поражения электрическим током из-за возникновения опасного уровня напряжения прикосновения и шагового напряжения внутри конструкции;

R_V — риск, связанный с типами повреждений L_1 и L_2, вызванных пожаром или взрывом (из-за опасного искрения между внутренней установкой и металлическими частями, обычно в точке входа линии в ВЭУ), вызванных током молнии, который был передан по входящим линиям или вдоль них;

R_W — риск, связанный с типами повреждений L_1 и L_2, вызванных отказом внутренних систем за счет перенапряжений, индуцированных на внутренних линиях и переданных в ВЭУ.

Риски для ВЭУ, оцениваемые на основе удара молнии вблизи линий коммуникаций, соединенных с ВЭУ (источник S4), включают компонент R_Z, относящийся к типам повреждений L_1 и L_2, вызванных отказом внутренних систем за счет перенапряжений, индуцированных на внутренних линиях и переданных на конструкцию.

***D.3.2* Состав риска**

Риск R является суммой компонентов риска по типу повреждения или по источнику повреждения.

Риск как сумма компонентов риска по типу повреждения определяют по формуле

$$R = R_{AT} + R_{AD} + R_B + R_C^2 + R_M^2 + R_U + R_V + R_W^2 + R_Z^2. \quad (D.3)$$

Или риск как сумма компонентов риска по источнику повреждения определяют по формуле

$$R = R_{S1} + R_{S2} + R_{S3} + R_{S4}. \quad (D.4)$$

В уравнении *D.4* в случае отказа внутренних систем, представляющих угрозу для жизни человека, компоненты риска определяют по следующим формулам:

- компонент риска в связи с ударами молнии в ВЭУ (ударами молнии в конструкцию)

$$R_{S1} = R_{AT} + R_{AD} + R_B + R_C^2; \quad (D.5)$$

- компонент риска в связи с ударами молнии вблизи ВЭУ (ударами молнии вблизи конструкции)

$$R_{S2} = R_M^2; \quad (D.6)$$

- компонент риска в связи с ударами молнии в линию коммуникаций, соединенную с ВЭУ

$$R_{S3} = R_U + R_V + R_W^2; \quad (D.7)$$

- компонент риска в связи с ударами молнии вблизи линии коммуникаций, соединенной с ВЭУ

$$R_{S4} = R_Z^2. \quad (D.8)$$

D.3.3 **Оценка компонентов риска**

Каждый компонент риска R_{AT}, R_{AD}, R_B, R_C, R_M, R_U, R_V, R_W и R_Z может быть определен по формуле (9).

Формулу (9) используют для оценки риска повреждения с учетом вероятности повреждения различных типов и последствий.

Риски, связанные с ударами молнии в ВЭУ (тип удара молнии S1), определяют по формулам:

$$R_{AT} = N_D \cdot P_{AT} \cdot P_P \cdot L_{AT}; \quad (D.9)$$

$$R_{AD} = N_D \cdot P_{AD} \cdot P_P \cdot L_{AD}; \quad (D.10)$$

$$R_B = N_D \cdot P_B \cdot L_B; \quad (D.11)$$

$$R_C = N_D \cdot P_C \cdot P_P \cdot L_C. \quad (D.12)$$

Риски, связанные с ударами молнии вблизи ВЭУ (тип удара молнии S2), определяют по формуле

$$R_M = N_M \cdot P_M \cdot P_P \cdot L_M. \quad (D.13)$$

Риски, связанные с ударами молнии в линии коммутации, соединенные с ВЭУ (тип удара молнии S3), определяют по формулам:

$$R_U = (N_L + N_{DJ}) \cdot P_U \cdot P_P \cdot L_{UT}; \quad (D.14)$$

$$R_V = (N_L + N_{DJ}) \cdot P_V \cdot L_V; \quad (D.15)$$

$$R_W = (N_L + N_{DJ}) \cdot P_W \cdot P_P \cdot L_W. \quad (D.16)$$

Риски из-за ударов молнии вблизи линий коммутации, соединенных с ВЭУ (тип удара молнии S4), определяют по формуле

$$R_Z = N_I \cdot P_Z \cdot P_P \cdot L_Z. \quad (D.17)$$

Если в линии более одной секции, то значения R_U, R_V, R_W и R_Z являются суммой значений R_U, R_V, R_W и R_Z, относящихся к данной секции. Учитывают секции, находящиеся между ВЭУ и первым узлом. В любом случае, должно делаться допущение, что максимальная длина линии 5 км для высоковольтных линий электропередач и 1 км для низковольтных линий электропередач и линий связи.

В случае подсоединения нескольких линий к ВЭУ с различной разводкой электропитания для той же внутренней системы вычисления следует выполнять для каждой линии.

В случае, если к конструкции подсоединено несколько линий с одинаковой разводкой к той же самой установке, вычисления следует выполнять только для линии с наихудшими характеристиками, т. е. линий с наивысшими значениями N_L и N_I, соответственно (неэкранированная линия по сравнению с экранированной линией, низковольтная линия электропитания по сравнению с высоковольтной линией питания с высоковольтным/низковольтным трансформатором и т. д.).

D.3.4 **Частота повреждений**

Частота повреждений F представляет собой количество причинений ущерба, вызванных источниками повреждения S во внутренних системах ВЭУ, которая должна быть защищена. Для каждого источника повреждений, который может отрицательно воздействовать на ВЭУ, соответствующая частота повреждения может быть оценена следующим образом:

F_1 — частота повреждений из-за ударов молнии в конструкцию;

F_2 — частота повреждений из-за ударов молнии вблизи конструкции;

F_3 — частота повреждений из-за ударов молнии в линию коммуникаций;

F_4 — частота повреждений из-за ударов молнии вблизи линии коммуникаций.

Частоты повреждений F_1 и F_2 включают отказ внутренних систем, вызванный импульсным перенапряжением из-за ударов молнии в конструкцию или в землю вблизи конструкции. Частоты повреждений F_3 и F_4 включают отказ внутренних систем, вызванный перенапряжением, переданным через соединенные с конструкцией линии коммутации.

Частоту повреждений F определяют по формуле

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4. \quad (D.18)$$

Примечание — Значение частоты повреждений F, полученное путем добавления двух элементов риска F_2 и F_4, является завышенным. Более правильная оценка частоты может быть сделана с учетом того, что удар в землю одновременно оказывает воздействие на внутренние системы за счет прямой индуктивной связи и индуцированного на подсоединенные линии напряжения, и поэтому их воздействие может перекрываться (компонент F_2 и компонент F_4).

Каждая частичная частота повреждений, F_1, F_2, F_3 и F_4, может быть определена исходя из общей формулы

$$F_X = N_X \cdot P_X, \quad (D.19)$$

где N_X — число опасных событий в год (см. также приложение *B*);

P_X — вероятность повреждения.

Частоту повреждений из-за ударов молнии в ВЭУ определяют по формуле

$$F_1 = N_D \cdot P_C. \quad (D.20)$$

Частоту повреждений из-за ударов молнии вблизи ВЭУ определяют по формуле

$$F_2 = N_M \cdot P_M. \quad (D.21)$$

Частоту повреждений из-за ударов молнии в линию коммутации, соединенную с ВЭУ, определяют по формуле

$$F_3 = (N_L + N_{DJ}) \cdot P_W. \quad (D.22)$$

Частоту повреждений из-за ударов молнии вблизи линии коммутации, соединенной с ВЭУ, определяют по формуле

$$F_4 = N_I \cdot P_Z. \quad (D.23)$$

Согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-1*, частота повреждений F должна учитываться в оценке необходимости молниезащиты.

Должны быть предприняты следующие шаги:

- расчет частичной частоты повреждений F_X;
- расчет общей частоты повреждений F;
- определение допустимой частоты повреждений F_T;
- сравнение частоты повреждений F с допустимым значением F_T.

***D.3.5* Оценка вероятности P_X повреждения**

Вероятности, указанные в этом приложении и соответствующие *ГОСТ Р МЭК 62305-2*, действительны, если меры защиты соответствуют:

- *ГОСТ Р 59789* в отношении мер защиты для снижения травматизма живых существ и в отношении мер защиты для снижения физического ущерба;
- *ГОСТ Р МЭК 62305-4* в отношении мер защиты для снижения повреждения внутренних систем. Могут быть выбраны другие значения, если это обосновано.

***D.4* Оценка вероятности повреждения ВЭУ**

***D.4.1* Вероятность P_{AT}, что удар молнии в ВЭУ вызовет опасный уровень напряжения прикосновения и шаговое напряжение**

Вероятность P_{AT} повреждений из-за опасного уровня напряжения прикосновения и шагового напряжения, вызванного ударом молнии в ВЭУ, зависит от используемых мер защиты следующим образом:

$$P_{AT} = P_{TWS} \cdot P_{am} \cdot r_t, \quad (D.24)$$

где P_{TWS} — вероятность того, что система грозового оповещения (TWS) не обнаружит молнию;

P_{am} — вероятность того, что попадание удара в ВЭУ вызовет повреждение из-за опасного уровня напряжения прикосновения или шагового напряжения при данной мере защиты. Значения P_{am} приведены в таблице *D.3*;

r_t — коэффициент снижения потерь как функция типа поверхности грунта или настила. Значения r_t приведены в таблице *D.4*.

Примечание — P_{AT}, равное нулю, может быть взято в качестве допущения, когда ВЭУ:

- имеет мощную металлическую раму (см. *ГОСТ Р 59789—2021, подразделы 8.1 и 8.2*);
- сделана из армированного бетона, отлитая на площадке с арматурными стержнями, хорошо изготовленными в здании (см. *ГОСТ Р 59789—2021, подраздел Е.4.3*);
- защищена СМЗ, соответствующей требованиям настоящего стандарта;
- снабжена сетчатой системой заземления и отсутствуют металлические части, которые могут стать частью пути тока молнии.

Если применяют более одной меры защиты, значение P_{am} определяют умножением значений P_{am} для соответствующих мер защиты.

Таблица *D.3* — Вероятность того, что удар молнии в ВЭУ приведет к поражению электрическим током живых существ вследствие опасного уровня напряжения прикосновения и шагового напряжения P_{am} при разных мерах защиты (по *ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, таблица В.1*)

Мера защиты	P_{am}	Примечания
Меры защиты отсутствуют	1	—
Предупредительные надписи	10^{-1}	—
Электрическая изоляция подвергающегося воздействию вертикального молниеотвода (например, с помощью сшитого полиэтилена толщиной не менее 3 мм)	10^{-2}	Не относится к ВЭУ, использующим в качестве вертикального молниеотвода башню
Эффективное выравнивание потенциалов с землей	10^{-2}	Обязательно для ВЭУ, имеющих высоковольтное оборудование

Таблица *D.4* — Значения коэффициента снижения потерь r_t в зависимости от типа грунта или настила (по *ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, таблица С.3*)

Тип поверхности	Сопротивление при контакте, кОм[1)]	r_t
Земля, бетон	≤ 1	10^{-2}
Мрамор, керамика	1—10	10^{-3}
Гравий, гумус	10—100	10^{-4}
Асфальт, дерево	≥ 100	10^{-5}

[1)] Значения, измеренные с помощью электрода площадью 400 см^2, при равномерном сжатии с силой 500 Н в точке измерения.

***D.4.2* Вероятность P_{AD} того, что удар молнии в ВЭУ нанесет вред человеку, находящемуся на ВЭУ**

Значения вероятности P_{AD} того, что молния попадет в лицо, находящееся на ВЭУ, зависит от положения людей в зоне, подвергающейся воздействию, от уровня УМЗ, принятых мер по защите частей ВЭУ, подвергающихся прямому воздействию ударов молнии, и дополнительных мер защиты:

$$P_{AD} = P_{TWS} \cdot P_o \cdot P_{СМЗ}, \qquad (D.25)$$

где P_o — коэффициент вероятности, определяемый положением лица в зоне, подвергающейся воздействию. Значения P_o приведены в таблице *D.5*;

$P_{СМЗ}$ — вероятность, зависящая от УМЗ частей ВЭУ, подвергающихся прямому воздействию ударов молнии. Значения $P_{СМЗ}$ приведены в таблице *D.6*.

Примечания

1 Возможны значения $P_{СМЗ}$ иные, чем значения в таблице *D.6*, если основаны на подробном исследовании (см. *ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, раздел В.2*).

2 Также в документах и литературе используют обозначение этой вероятности P_{LPS}.

Если система TWS выдает предупреждение, то должна быть обеспечена немедленная и полная эвакуация из зон, подвергающихся воздействию. Если эвакуация не обеспечивается или нет TWS, то принимают, что $P_{TWS} = 1$.

Таблица *D.5* — Коэффициент P_o в зависимости от положения человека в зоне, подвергающейся воздействию

Положение человека	P_o
Близко к границе площади, подвергающейся воздействию[1)]	0,9
Далеко от границы площади, подвергающейся воздействию	0,1
[1)] В пределах 3 м от границы площади, подвергающейся воздействию.	

Таблица *D.6* — Вероятность $P_{СМЗ}$ в зависимости от мер защиты площадей ВЭУ, подвергающихся воздействию, от прямого удара молнии и для уменьшения физического ущерба

Характеристики ВЭУ	Класс СМЗ	$P_{СМЗ}$
ВЭУ, не защищенная СМЗ	—	1
ВЭУ, защищенная СМЗ	IV	0,2
	III	0,1
	II	0,05
	I	0,02
ВЭУ с молниезащитой лопастей и гондолы, соответствующей СМЗ I с полной защитой любых установок на крыше гондолы от прямого касания молнией, и башня, выступающая в качестве естественного вертикального молниеотвода		0,01

***D.4.3* Вероятность P_B того, что удар молнии в ВЭУ вызовет физическое повреждение**

Вероятность P_B того, что удар молнии в ВЭУ вызовет физическое повреждение, определяют по формуле

$$P_B = P_S \cdot P_{СМЗ} \cdot r_f \cdot r_P, \qquad (D.26)$$

где P_S — вероятность того, что удар молнии в ВЭУ вызовет опасное искрение. Значения P_S приведены в таблице *D.7*;

r_P — коэффициент снижения ущерба вследствие физического повреждения в зависимости от принимаемых мер предосторожности по предотвращению и уменьшению последствий пожара. Значения r_P приведены в таблице *D.8*;

r_f — коэффициент снижения ущерба вследствие физического повреждения в зависимости от риска возникновения пожара или взрыва ВЭУ. Значения r_f приведены в таблице *D.9*.

Таблица *D.7* — Вероятность того, что удар молнии в ВЭУ вызовет опасное искрение

Тип конструкции	P_S
Композитные материалы	1
Железобетон или взаимосвязанные металлические конструкции	0,5

Таблица *D.8* — Значения коэффициента r_P в зависимости от мер предосторожности по уменьшению последствий пожара (*ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, таблица С.4*)

Предпринимаемые противопожарные меры	r_P
Меры отсутствуют	1
Применена одна из следующих противопожарных мер: огнетушители; стационарные установки пожаротушения с ручным управлением[1)]; ручное оборудование для подачи сигнала тревоги; гидранты; огнеупорные перегородки; защищенные маршруты эвакуации	0,5
Применена одна из следующих противопожарных мер: стационарные автоматические системы и установки пожаротушения; автоматическая сигнализация[2)]	0,2
[1)] Меры эффективны только, если выполняются специально обученными людьми. [2)] Только если установлена защита от скачков напряжений и других опасностей и если пожарные могут быть менее чем за 10 мин.	

Если предпринято несколько мер предосторожности, то значение r_P должно быть наименьшим из соответствующих значений.

Примечание — Риск взрыва не считается уместным для ВЭУ.

Таблица *D.9* — Значения коэффициента снижения потерь r_f как функция риска пожара на ВЭУ (по *ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, таблица С.5*)

Риск пожара	r_f
Высокий	10^{-1}
Средний	10^{-2}
Низкий	10^{-3}
Отсутствует	0

Примечания

1 Считается, что конструкция имеет высокий риск пожара, если материалы ее поверхности (лопасти и крышки гондолы) выполнены из горючих материалов со специальной пожарной нагрузкой более 800 МДж/м^2.

2 Считается, что конструкция имеет средний риск пожара, если материалы ее поверхности (лопасти и крышки гондолы) выполнены из горючих материалов со специальной пожарной нагрузкой 400—800 МДж/м^2.

3 Считается, что конструкция имеет низкий риск пожара, если материалы ее поверхности (лопасти и крышки гондолы) выполнены из горючих материалов со специальной пожарной нагрузкой менее 400 МДж/м^2.

4 Специальная пожарная нагрузка — это отношение энергии всего количества горючего материала конструкции к общей поверхности конструкции.

***D.4.4* Вероятность P_C того, что удар молнии в ВЭУ вызовет отказ внутренних систем**

В качестве меры защиты для снижения P_C допускается использовать систему защиты от импульсных перенапряжений.

Вероятность P_C того, что удар молнии в ВЭУ вызовет отказ внутренних систем, определяют по формуле

$$P_C = P_e \cdot P_{SPD} \cdot C_{LD}, \qquad (D.27)$$

где P_{SPD} — коэффициент, зависящий от исполнения системы защиты от импульсных перенапряжений в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 62305-4*, и характеристик внутренних систем. В отношении значений P_{SPD} для низковольтных систем и телекоммуникационных систем — по *ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, приложение В*;

P_e — вероятность того, что оборудование подвергается разрушению;

C_{LD} — коэффициент снижения потерь, зависящий от экранирования, заземления и изоляции линии, к которой подсоединена внутренняя система. Значения C_{LD} приведены в *ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, приложение В*.

Значения P_{SPD} зависят от уровня молниезащиты, для которого сконструированы УЗИП.

Примечания

1 Не только система защиты от импульсных перенапряжений приемлема в качестве меры защиты для снижения P_C. Система защиты от импульсных перенапряжений эффективна для снижения P_C лишь в том случае, если ступица, гондола и башня ВЭУ защищены СМЗ или если конструкции с непрерывным металлическим или силовым железобетонным каркасом служат естественным СМЗ при выполнении требований *ГОСТ Р 59789* по соединению уравнивания потенциалов и заземлению.

2 Экранирование внутренних систем, соединенных с внешними линиями, имеющим молниезащитные кабель или системы, провода которых проложены в молниезащищенных кабель-каналах, металлических трубопроводах или трубах, может не потребовать использования системы защиты от импульсных перенапряжений.

***D.4.5* Вероятность P_M того, что удар молнии вблизи ВЭУ вызовет отказ внутренних систем**

Из-за высоты ВЭУ большинство ударов молнии попадает непосредственно в установку, а не в зоны вблизи ВЭУ. Более того, большие металлические конструкции будут экранировать внутренние системы. Таким образом, вероятность того, что удар молнии вызовет отказ внутренних систем, можно считать несущественной, если ступица, гондола и башня ВЭУ защищены СМЗ, или если конструкции с непрерывным металлическим или силовым железобетонным каркасом служат естественным СМЗ при выполнении требований *ГОСТ Р 59789* по соединениям уравнивания потенциалов и заземлению.

Примечание — R_M можно не учитывать для ВЭУ с общей высотой более 100 м. В этом случае прямыми ударами молнии обычно охватывается расстояние в 350 м.

D.4.6 **Вероятность P_U того, что удар молнии в линию коммуникаций вызовет травмирование живых существ за счет напряжения прикосновения**

Значения вероятности P_U травмирования живых существ напряжением прикосновения от удара молнии в линию коммуникаций (силовой кабель или кабель телекоммуникации), соединенной с ВЭУ, зависит от характеристик защитного экрана линии коммуникаций, выдерживаемого импульсного напряжения внутренних систем, подключенных к линии коммуникаций, стандартных мер защиты (физические ограничения, предупреждения и т. д.) (*таблица D.8*) и УЗИП, находящихся в начале линии коммуникаций согласно *ГОСТ Р 59789*.

Примечание — Система защиты от импульсных перенапряжений согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-4* не требуется для снижения P_U в этом случае. Согласно *ГОСТ Р 59789*, достаточно УЗИП.

Значение P_U определяют по формуле:

$$P_U = P_{am} \cdot P_{EB} \cdot P_{LD} \cdot P_{TWS} \cdot C_{LD} \cdot r_t, \qquad (D.28)$$

где P_{am} — зависит от мер защиты от напряжения прикосновения, таких как физические ограничения или предупреждения. Значения P_{am} приведены в *ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, приложение В*;

P_{TWS} — вероятность того, что система грозового оповещения (TWS) не обнаружит молнию на затрагиваемой области;

P_{LD} — вероятность отказа внутренних систем из-за удара молнии в линию коммутаций в зависимости от характеристик линии. Значения P_{LD} приведены в *ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, приложение В*;

P_{EB} — зависит от соединения уравнивания потенциалов, соответствующего *ГОСТ Р 59789*. Значения P_{EB} приведены в *ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, приложение В*.

D.4.7 **Вероятность P_V того, что удар молнии в линию коммуникаций вызовет физическое повреждение**

Значения вероятности P_V физического повреждения от удара молнии, попавшей в линию коммуникаций, входящую в ВЭУ, зависят от характеристик защитного экрана линии коммуникаций, выдерживаемого импульсного напряжения внутренних систем, подключенных к линии коммуникаций и имеющихся УЗИП, при условии уравнивания потенциалов на входе линии согласно *ГОСТ Р 59789*.

Примечание — В этом случае согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-4—2016* для снижения P_V система защиты от импульсных напряжений не требуется. Наличие УЗИП согласно *ГОСТ Р 59789* вполне достаточно.

Значение P_V определяют по формуле

$$P_V = P_{EB} \cdot P_{LD} \cdot P_{TWS} \cdot C_{LD} \cdot r_f \cdot r_p. \qquad (D.29)$$

D.4.8 **Вероятность P_W того, что удар молнии в линию коммуникаций вызовет отказ внутренних систем**

Значения вероятности P_W отказа внутренних систем вследствие попадания молнии в линию коммуникаций, соединенную с ВЭУ, зависят от характеристик экранирования линии, выдерживаемого импульсного напряжения внутренних систем, подключенных к этой линии и имеющих систему защиты от импульсных перенапряжений.

Значение P_W определяют по формуле

$$P_W = P_e \cdot P_{SPD} \cdot P_{TWS} \cdot P_{LD} \cdot C_{LD}, \qquad (D.30)$$

где P_e — вероятность того, что оборудование подвергается опасному событию.

D.4.9 **Вероятность P_Z того, что удар молнии вблизи линии коммуникаций, соединенной с ВЭУ, вызовет отказ внутренних систем**

Значения вероятности P_Z отказа внутренних систем из-за удара молнии вблизи линии коммуникаций, соединенной с конструкцией, зависят от характеристик защитного экрана линии, выдерживаемого импульсного напряжения систем, подключенных к линии коммуникаций, и обеспечиваемых мер защиты.

Значение P_Z определяют по формуле

$$P_Z = P_e \cdot P_{SPD} \cdot P_{TWS} \cdot P_{LI} \cdot C_{LI}, \qquad (D.31)$$

где P_{LI} — вероятность отказа внутренних систем за счет попадания удара молнии вблизи подсоединенной линии коммуникаций в зависимости от характеристик линии и оборудования. Значения P_{LI} приведены в таблице *D.10* и в *ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, приложение В*;

C_{LI} — коэффициент, зависящий от экранирования, заземления и изоляции линии. Значения C_{LI} приведены в *ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, приложение В*.

Таблица *D.10* — Значения вероятности P_{LI}, зависящие от типа линии коммуникаций и номинального выдерживаемого импульсного напряжения защищаемого оборудования U_W (*ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, таблица В.9*)

Тип линии	U_W, кВ				
	1	1,5	2,5	4	6
Линии электропитания	1	0,6	0,3	0,16	0,1
Линии связи	1	0,5	0,2	0,08	0,04

***D.4.10* Вероятность P_P того, что лицо окажется в опасном месте**

Вероятность P_P того, что лицо будет находиться в опасном месте, зависит от времени t_z в часах в год, в течение которого люди находятся в опасном месте:

$$P_P = t_Z/8760. \quad (D.32)$$

Примечание — Когда значение t_z неизвестно, отношение t_z/8760 должно быть равно 1.

***D.4.11* Вероятность P_e того, что оборудование подвергнется воздействию опасного события**

Вероятность P_e того, что неповрежденное оборудование подвергается воздействию опасного события, зависит от времени t_e в часах в год воздействия опасного события на оборудование:

$$P_e = t_e/8760. \quad (D.33)$$

Примечание — Когда значение t_e неизвестно, отношение t_e/8760 должно быть равно 1.

***D.5* Оценка средней величины ущерба указанного типа из-за опасных событий L_X**

***D.5.1* Общие положения**

L_X — это средняя величина ущерба указанного типа из-за опасных событий, относительно максимального размера ущерба в защищаемой ВЭУ.

Значения размера ущерба, L_X, оценивает и устанавливает разработчик молниезащиты или владелец ВЭУ. В данном разделе приведены рекомендуемые стандартные средние значения, которые считаются характерными значениями.

***D.5.2* Среднее относительное значение ущерба из-за опасного события**

Ущерб L_X относится к относительному значению указанного типа повреждения для одного опасного события, вызванного ударом молнии, с учетом ее мощности и воздействия.

Ущерб L_X варьируется в зависимости от причины ущерба (D_{1D}, D_{1T}, D_2 и D_3).

Ущерб L_X следует определять для каждой зоны ВЭУ, на которые она разделена. Типичные ущербы L_X для каждой зоны определяют, используя таблицу *D.11*, по следующим формулам:

$$L_{AT} = L_{UT} = L_T; \quad (D.34)$$

$$L_{AD} = L_D; \quad (D.35)$$

$$L_B = L_V = L_F = L_{F1} = L_{F2}, \quad (D.36)$$

где L_T — типичное среднее отношение лиц, травмированных напряжением прикосновения и шаговым напряжением, к общему количеству лиц в зоне, относящееся к одному опасному событию;

L_D — типичное среднее отношение лиц, травмированных прямым ударом молнии, к общему количеству лиц, подвергшихся воздействию в зоне, за счет одного опасного события;

L_{F1} — типичное среднее отношение лиц, травмированных в результате пожара или взрыва, к общему количеству лиц в зоне, за счет одного опасного события;

L_{F2} — типичное среднее отношение физического ущерба социальной значимости за счет пожара или взрыва к максимальному размеру ущерба социальной значимости в зоне, за счет одного опасного события;

L_O — типичное среднее отношение лиц, травмированных в результате отказа внутренних систем, к общему количеству лиц в зоне, за счет одного опасного события.

Значения таблицы *D.11* относятся к непрерывному присутствию людей на конструкции.

Примечания

1 Риск взрыва не считается уместным для ВЭУ.

2 Согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-2*, ущербом социальной значимости является ущерб, включающий травмирование живых существ, недоступность услуг для населения, повреждение объектов культурного населения и общие затраты, которые будет вынуждено оплатить население.

Таблица *D.11* — Типичные средние значения L_T, L_D, L_F и L_O

Тип зон	L_T	L_D	L_{F1}	L_{F2}	L_O
Критичные зоны[1)]	0,01	0,1	0,01	0,1	0,0001
Нормальные зоны[2)]	0,01	0,1	0,01	0,05	0,00001

[1)] Зоны с основным оборудованием для выполнения процесса (управление, связь).

[2)] Зоны, открытые для свободного посещения.

Приложение *Е*
(справочное)

Классификация повреждений молнией на основе менеджмента риска

Е.1 Общие положения

Молниезащиту ВЭУ, включая конструирование изготовителем и техобслуживание операторами, следует выполнять с точки зрения менеджмента риска. Нецелесообразно предпринимать одиночные меры для защиты ото всех повреждений молнией, поскольку уровни и аспекты повреждений молнией охватывают диапазон от катастрофических до незначительных. Важно понять аспекты повреждений, возможные причины и соответствующие меры для выполнения требований по технике безопасности, а также экономические требования.

ВЭУ сделана из большого количества элементов, однако наиболее критичными элементами с точки зрения повреждения молнией являются лопасти, из-за того, что:

- лопасти устанавливаются в самой высокой точке ВЭУ;
- лопасти изготовлены из достаточно хрупкого материала, такого, как клееный и армированный стекловолокном пластик;
- лопасти являются одним из самых дорогих одиночных элементов ВЭУ и могут быть одним из самых дорогих элементов на замену;
- в случае попадания ударов молнии в лопасти, могут возникнуть вопросы безопасности людей из-за падающих инородных частей.

Поэтому учет повреждений лопастей очень важен для менеджмента риска ВЭУ.

Другие элементы внутри гондолы или башни могут доставлять меньше проблем с точки зрения безопасности людей, если только не утрачен контроль за механизмами из-за молнии. Меры по защите этих элементов можно рассматривать с точки зрения «затраты — выгоды».

Е.2 Повреждение молнией лопасти

Е.2.1 Классификация повреждений лопасти из-за удара молнии

Повреждения подразделяют на четыре уровня в зависимости от уровня и вида повреждений. Наивысший уровень повреждения лопасти — это уровень IV — катастрофическое происшествие, которое может привести к травме и/или смерти живых существ. Уровень III — серьезное происшествие, предусматривающее незамедлительный ремонт, чтобы предотвратить усиление повреждения до уровня IV. Уровень II — умеренное повреждение, предусматривающее проведение ремонта в самые короткие сроки. Наименьший уровень — это уровень I — незначительное повреждение, не предусматривающее выполнение ремонта до следующего планового техобслуживания.

В таблице *Е.1* приведена классификация повреждений лопастей ВЭУ молнией с видами повреждения лопастей, характеризующих каждый уровень повреждений.

Таблица *Е.1* — Классификация повреждения лопасти молнией

(IV) Катастрофическое происшествие, вызывающее возможное травмирование и/или смерть	
	(IV-a) Разрыв и падение лопасти
	(IV-b) Прогорание и падение лопасти
	(IV-c) Расплавление и/или обрыв провода управления
	(IV-d) Падение молниеуловителя или другого элемента лопасти[1)]
(III) Серьезное происшествие, требующее немедленного ремонта	
	(III-a) Трещина вдоль сварного шва
	(III-b) Отрыв на кромке лопасти
	(III-c) Расплавление и/или отрыв вертикального молниеотвода
(II) Умеренное происшествие, требующее проведения ремонта при первой возможности	
	(II-a) Вскрытие поверхности
	(II-b) Утрата небольшой части молниеуловителя
(I) Незначительное происшествие, не требующее незамедлительного ремонта	
	(I-a) Расплавление молниеуловителя
	(I-b) Обгорание поверхности
	(I-c) Другие незначительные повреждения
[1)] Это происшествие/повреждение считают происшествием/повреждением уровня (II-b) в случае, если никто из постоянных лиц или прохожих вероятно не будет поблизости от ВЭУ.	

Виды повреждений, указанные в таблице *E.1*, заключаются в следующем:

- разрыв — внезапное или немедленное разделение лопасти на две или более частей, отслаивание сварного шва между двумя оболочками лопасти и/или большие трещины на оболочках лопастей;
- падение — падение любых элементов лопасти на землю, включая всю лопасть, часть оболочки лопасти, вершину лопасти, молниеприемники и т. п.;
- прогорание — утрата целиком или части лопасти за счет пожара при попадании молнии;
- расплавление провода управления воздушным тормозом — расплавление и отрыв управляющего провода воздушного тормоза на концевой части (см. *G.1.1*) из-за большого выделения тепла при прохождении через него тока молнии;
- расплавление вертикального молниеотвода — расплавление и падение вниз вертикального молниеотвода из-за большого выделения тепла при прохождении через него тока молнии;
- искрение между концами оборванного провода — электрический разряд из-за молнии между зазором оборванных проводов;
- растрескивание — трещина вдоль сварного шва, соединяющего две оболочки лопасти вместе, когда частичное соединение продолжает удерживать части вместе;
- отрыв — часть оболочки лопасти оторвана, но остается вместе с неоторванной частью;
- вскрытие поверхности — небольшой разрыв волокон на поверхности лопасти;
- утрата небольшой части молниеуловителя (например, приемника) — отрыв части молниеуловителя, состоящего из частей. Если оторванная часть существенная и падает на землю, то происшествие следует считать происшествием категории (IV-d) в зависимости от обстоятельств вокруг ВЭУ;
- расплавление — эрозия молниеуловителя из-за расплавления после попадания молнии с высокой энергией;
- обгорание — изменение цвета задней поверхности лопасти.

Если ВЭУ расположена на море или в необитаемой местности, происшествия/повреждения уровня (IV-d) можно считать происшествиями/повреждениями уровня (II-b), поскольку нет угрозы безопасности населения. В противном случае должен присваиваться наивысший уровень IV, катастрофическое происшествие, даже если упавший элемент маленького размера.

E.2.2 **Возможные причины повреждения лопасти молнией**

Возможные причины повреждений лопастей ВЭУ молнией определены опытным путем по анализу происшествий с ВЭУ в результате ударов молнии. Большинство происшествий являются происшествиями уровня IV, катастрофические происшествия, которые произошли на плохих лопастях, как если бы:

- они были лопастями старых конструкций с проводами воздушного тормоза в концевой части;
- лопастями неудачной конструкции, такой как лопасти с недостаточным механическим соединением молниеуловителей/молниеприемников с основной оболочкой лопастей;
- лопасти с плохим качеством изготовления, как лопасти с плохим склеиванием пластин лопасти;
- плохо обслуживаемые лопасти, такие, где обнаружен недосмотр, небрежность или недооценка прошлых повреждений.

Причиной разрыва и трещин на лопасти обычно считается повреждение в результате избыточного давления за счет дуги при длительном спадании тока, распространяющейся как ударная волна внутри пустот лопасти или внутри слоистых структур лопасти.

E.2.3 **Меры противодействия повреждению лопастей молнией**

Необходимы меры противодействия, которые соответствуют повреждениям лопасти. Чтобы избежать происшествий уровня IV, которые могут отрицательно сказаться на безопасности населения, все задействованные лица должны обращать внимание на несовершенные условия; для изготовителя лопасти несовершенная конструкция и/или монтаж должны быть улучшены и испытаны согласно настоящему стандарту; изготовители ВЭУ должны составить адекватные процедуры проверок и технического обслуживания, которые будут реализованы операторами ВЭС.

На рисунке *E.1* показаны рекомендованные меры противодействия согласно классификации повреждений лопасти молнией. Схема А — меры противодействия, чтобы не допустить происшествий уровня IV. Даже после реализации соответствующих мер происшествий невозможно избежать полностью, но можно ограничить до определенного допустимого предела. Не стоит стремиться предотвратить происшествия всех уровней, поскольку это нецелесообразно.

Временная остановка поврежденной установки, как показано на рисунке *E.1*, может быть полезной контрмерой для уменьшения риска от повреждения вследствие удара молнии. Немедленная проверка квалифицированной сервисной бригадой, или автоматическая или удаленная проверка, если это возможно, рекомендуется до рестарта ВЭУ.

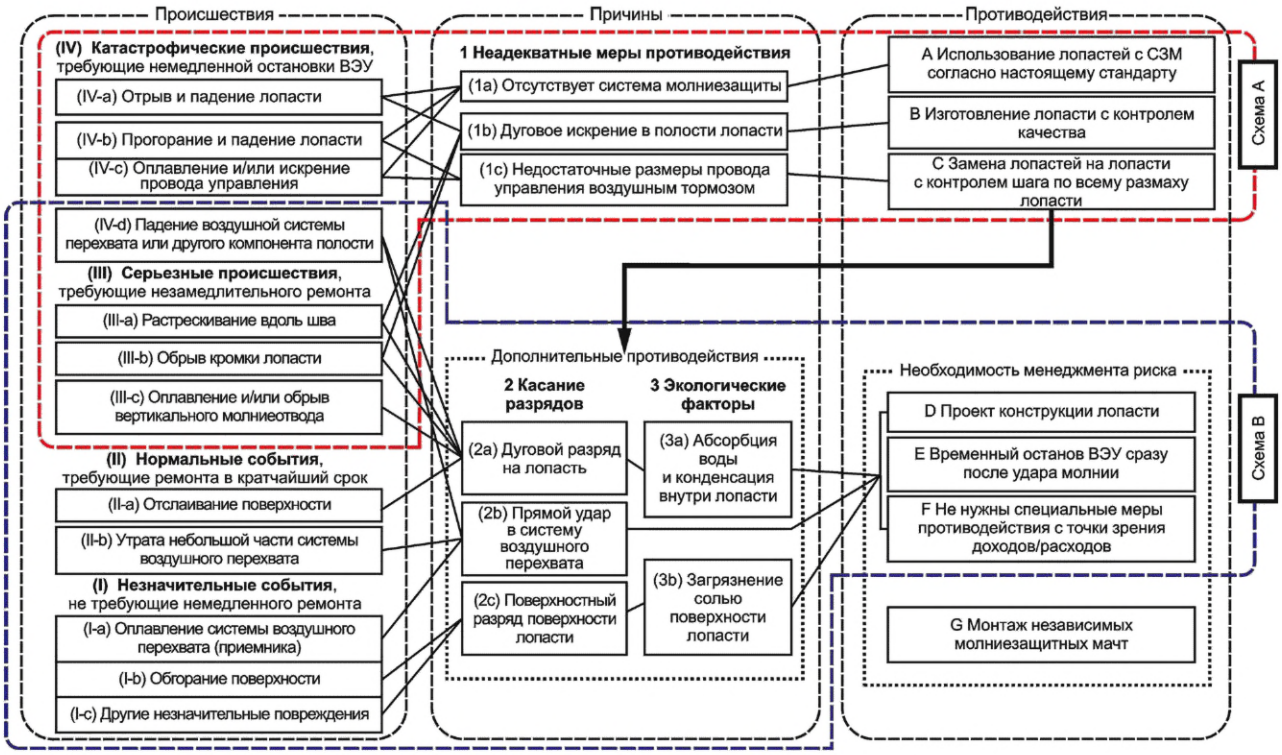


Рисунок *E.1* — Схемы рекомендованных мер согласно классификации происшествий

Таблица *E.2* также показывает матрицу рисков и соотношение контрмер при повреждении лопасти из-за попадания молнии, с учетом менеджмента риска. В таблице приведены риски повреждения лопасти и риски потери прибыли из-за приостановки нормальной работы ВЭУ. Следует помнить, что продолжительность останова не всегда зависит от уровня повреждения, но также зависит от таких аспектов схемы техобслуживания, как:

- наличие обслуживающего персонала, являющихся специалистами по обслуживанию ВЭУ;
- наличие запасных частей;
- наличие соответствующей техники, лифтов, кранов, самоподъемных судов и т. п., которые необходимы для ремонта или замены поврежденных частей.

Сервисные соглашения и соглашения по техническому обслуживанию с поставщиками и/или провайдерами по техническому обслуживанию.

Таблица *E.2* — Матрица повреждений лопасти молнией с учетом менеджмента риска

		Уровень повреждений											
		(IV) Катастрофическое происшествие				(III) Серьезное происшествие			(II) Умеренное происшествие		(I) Незначительное происшествие		
		(a)	(b)	(c)	(d)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(a)	(b)	(c)
Аспект повреждения		Разрыв и падение частей лопасти	Прогорание и падение частей лопасти	Расплавление и/или обрыв провода управления воздушного тормоза	Падение молниеуловителя другого элемента лопасти component	Трещина вдоль сварного шва	Отрыв от кромки лопасти	Расплавление и/или отрыв вертикального молниеотвода	Вскрытие поверхности	Утрата небольшой части молниеуловителя	Расплавление молниеуловителя	Обгорание поверхности	Другие небольшие повреждения
Менеджмент риска (качественное предложение)	Возможность травмирования живых существ	Высокая				Средняя			Практически отсутствует		Нет		
	Социальное воздействие	Очень высокое				Низкое			Практически отсутствует		Нет		
	Необходимость замены лопасти	Да			Нет	Иногда да			Почти всегда нет		Нет		
	Предполагаемый способ ремонта	Специальный кран для замены лопасти			Кран	Корзина или кран			Технические средства для работы на высоте		Сервис лифта, использование строительных лесов или каната		
	Сторона, отвечающая за ремонт	Зависит от страхования/обслуживания/контракта/возраста лопасти							Организация, осуществляющая обслуживание и ремонт		Организация, осуществляющая обслуживание и ремонт		
	Оценочная стоимость ремонта	Очень высокая			Низкая высокая	Высокая			Средняя		Низкая		
	Продолжительность ремонта	Несколько месяцев			Несколько дней	Несколько недель			Несколько дней		Почти нисколько (ремонт в ходе периодического техобслуживания)		
	Неполученная прибыль	Очень высокая			Низкая, высокая	Высокая			Низкая		Почти нисколько		
	Вероятность	Очень низкая (зависит от местности)			Низкая	Довольно низкая			Довольно высокая		Высокая		
	Стоимость мер противодействия	Очень высокая			Средняя	Средняя — высокая			Низкая — средняя		0 — средняя		

E.3 Повреждение молнией других компонентов

E.3.1 Классификация повреждения других компонентов молнией

Повреждения молнией других компонентов ВЭУ можно классифицировать таким же образом, как и повреждения лопасти, разделив на четыре уровня. В таблице *E.3* показаны четыре уровня повреждений с примерами видов повреждений.

Таблица *E.3* — Классификация повреждения молнией других компонентов ВЭУ

(IV) Катастрофическое происшествие, например травмирование и/или смерть людей внутри/вблизи установки, прогорание гондолы
(III) Серьезное происшествие, например нарушение изоляции генератора или трансформатора, поломка подшипников
(II) Умеренное происшествие, например поломка системы заземления, нарушение изоляции преобразователя и других силовых-электронных устройств
(I) Незначительное происшествие, например пробой изоляции устройства мониторинга, контроля или связи

***E.3.2* Меры противодействия повреждению молнией других компонентов**

Меры противодействия повреждению молнией других компонентов также могут быть аналогичны, мерам противодействия повреждениям лопастей. Однако следует помнить, что уровень I, незначительное происшествие, для других компонентов не всегда означает, что событие не предусматривает немедленного ремонта, как в классификации для лопастей, где необходима точка зрения безопасности населения. Не учитывая небольшие события для мониторинга, устройства управления и связи могут представлять риск катастрофического происшествия в случае, если повреждение вызовет потерю управления ВЭУ.

Для уменьшения времени останова и размера неполученной прибыли также рекомендуется использовать соответствующую схему технического обслуживания с адекватной подготовкой к неожиданным событиям.

***E.4* Стандартный опросный лист по повреждениям молнией**

В таблице E.4 приведен пример опросного листа по повреждениям молнией, который может помочь собрать данные о повреждении ВЭУ молнией. Важно собрать как минимум аналогичные статистические данные.

Таблица E.4 — Пример опросного листа по повреждениям молнией

1	Изготовитель ВЭУ:	Оператор ВЭУ:
2	Тип ВЭУ (общее описание):	
3	Специальные данные по ВЭУ:	
	Мощность …….кВт Высота ступицы ……..м Диаметр ветроколеса ……м Дата монтажа ……. Другие комментарии …….	
4	Местонахождение ВЭУ:	
	Точное положение (например, координаты GPS): Отдельная ВЭУ — ВЭУ в составе ВЭС с…….(кол-во) ВЭУ Береговая зона — Вблизи береговой зоны — В море — На суше Возвышение (высота над уровнем моря) ..... м Другие комментарии ……	
5	Погодные условия:	
	Грозовые дни — Ветер ..... м/с Температура .....°С — Другое: Дождь (интенсивность, если известно): Другие комментарии ……..	

Продолжение таблицы Е.4

6	Время происшествия:						
	Дата ..... Время ..... Другие комментарии …….				Приблизительная точность времени:		
7	Уровень повреждения молнией (в случае повреждения лопасти также проверить подкатегорию)						
	(IV) Катастрофическое происшествие						
	(IV-a) Отрыв и падение лопасти						
	(IV-b) Прогорание и падение лопасти						
	(IV-c) Расплавление и /или обрыв провода управления						
	(IV-d) Падение молниеуловителя (приемника) или другого элемента лопасти (см. также сноску к таблице *Е.1*)						
	(III) Серьезное происшествие						
	(III-a) Трещина вдоль сварного шва						
	(III-b) Отрыв от кромки лопасти						
	(III-c) Расплавление и/или обрыв вертикального молниеотвода						
	(II) Умеренное происшествие						
	(II-a) Вскрытие поверхности						
	(II-b) Утрата небольшой части молниеприемника (см. также сноску к таблице *Е.1*)						
	(I) Незначительное происшествие						
	(I-a) Расплавление воздушной молниезащиты (приемника)						
	(I-b) Обгорание поверхности						
	(I-c) Другие незначительные повреждения						
8	Предполагаемые точки попадания молнии:						
	Лопасти Гондола Метеорологическое оборудование Башня Молниеотвод гондолы Другое: ……. Другие комментарии:						
9	Поврежденные элементы:						
	Ступица		Ветроколесо/ротор		Подшипник главного вала		Подшипник изменения угла наклона
	Подшипник поворота		Подшипник генератора		Подшипник передаточного вала		Редукторы
	Генератор		Система управления		Система SCADA		Система питания
	Другое: …….. Другие комментарии ……..						

Продолжение таблицы Е.4

10	Последствия повреждения молнией:							
	Потери производственного времени ..... Стоимость ремонта …… руб. Стоимость не произведенной из-за повреждения электроэнергии..... руб. Другие комментарии ……							
11	Элементы системы молниезащиты установки (за исключением лопастей):							
	Отсутствуют		Кольцевой заземляющий электрод		Заземляющий электрод фундамента			
	Молниеприемники (тип/местонахождение): Вертикальные молниеотводы (тип/местонахождение): Перенапряжение/защита от перенапряжения:							
	Отсутствует				Входящее соединение с сетью			
	Генератор				Внешние линии данных			
	Внешние линии управления				Телефонные линии			
	Другие комментарии ……							
12	Лопасти и молниезащита лопастей:							
	Изготовитель лопастей: ..... Тип лопасти (наклонные/с регулированием срыва потока):							
	Одна лопасть		Две лопасти		Три лопасти		Иное:	
	Оснащены концевыми тормозами							
	Движение ветроколеса в момент удара:							
	В состоянии покоя		Вращался		Неизвестно			
	Материал лопасти ветроколеса							
	GFRP		CFRP		GFRP/CFRP		Слоистая древесина	
	Плотная древесина				Иное:			
	Тип молниезащиты:							
	Приемник на конце (материал): Нет молниезащиты				Приемник на конце (материал): Иное:			
	Вертикальный молниеотвод лопасти:							
	Внешний				Внутренний			
	Площадь поперечного сечения ..... мм Материал: Другие комментарии ……							
	Наблюдаемое повреждение:							
	Нет повреждения лопасти				Отверстие в лопасти, Ø..... мм			
	Трещина на поверхности лопасти (длина):				Трещина на кромке лопасти (длина):			
	Иное:							
	Другие комментарии:							

Окончание таблицы Е.4

13	Простой и стоимость ремонта:
	Простой: ..... дней Сметная стоимость ремонта:..... руб. Причина длительного простоя или/и высокой стоимости ремонта (если применимо):
14	На рисунке отмечают места, где наблюдалось повреждение на лопасти:

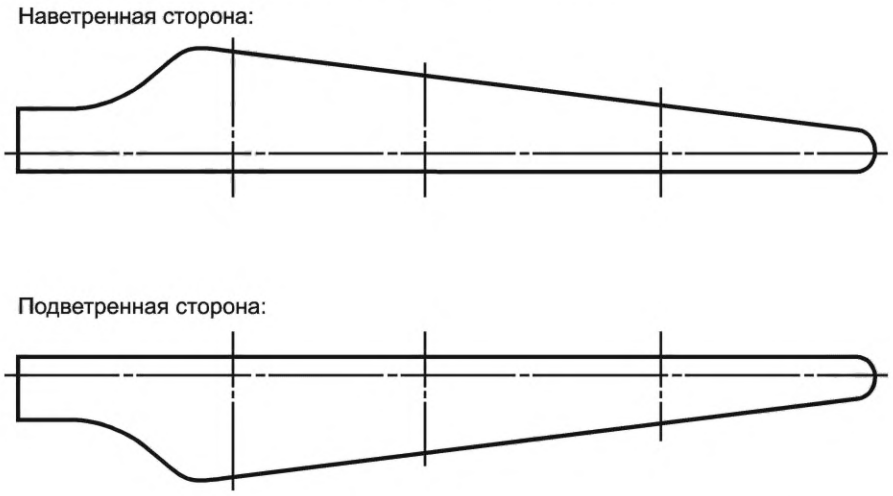


Рисунок *Е.2* — Контуры лопасти для отметки мест повреждений

Приложение *F*
(справочное)

Молниевая обстановка и зоны молниезащиты

F.1 Молниевая обстановка для лопастей

F.1.1 Применение

Задача концепции молниевой обстановки лопасти заключается в документальном оформлении того, как воздействие молнии распределяется по длине лопасти. Она не учитывает метод принятия решения о том, где поместить молниеприемники или обеспечить согласование молниезащиты. Выбранная концепция молниевой обстановки лопасти должна основываться на отраслевом опыте (внутреннем или открытом, как это представлено в *G.8*), а также вероятности попадания в лопасть в различных местах по размаху лопасти, вследствие чего более высокая вероятность удара оказывается в вершине лопасти.

Требования по конкретным угрозам пикового тока, удельной энергии и полного заряда (для выбранного уровня молниезащиты заряд остается тем же самым для всех участков лопасти) определяются для каждого участка поверхности лопасти. Эти требования по угрозам затем используются для определения конструкции и уровней испытаний для компонентов СМЗ, которая установлена в указанной части лопасти. В определении требований для различных участков следует учитывать, что ток из более высоких участков (участок 1) будет проводиться через более низкие участки, поэтому проектные требования для испытаний проводимого тока для более низких участков приняты с более высоких участков.

Изготовитель имеет право определить конкретное воздействие молнии для конкретной рассматриваемой лопасти, при условии, что воздействие документально оформлено на основе анализа или полевых данных. Альтернативным образом, может быть принята концепция молниевой обстановки, представленная в этом разделе.

F.1.2 Примеры упрощенных участков молниевой обстановки

В этом подразделе в качестве методических указаний представлены два подхода по упрощенной концепции молниевой обстановки, хотя особые свойства лопасти или внешние условия могут предложить другое деление поверхности лопасти. Заключительной обязанностью изготовителя является демонстрация соответствия выбранной молниевой обстановки с уровнем УМЗ для лопасти ВЭУ. Молниевая обстановка достигается за счет разделения лопасти на различные участки, определяя конкретную молниевую обстановку для каждого участка.

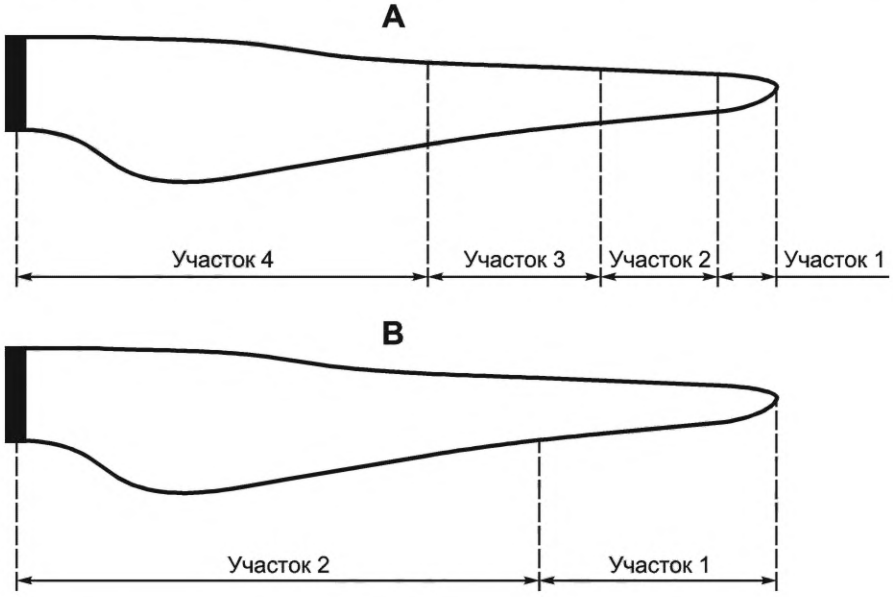


Рисунок *F.1* — Примеры общих определений молниевой обстановки лопасти

На рисунке *F.1* показаны два возможных варианта определения молниевой обстановки лопасти: тип А, делящий лопасть на четыре участка с различной подверженностью прямым ударам, и тип В, делящий лопасть на два участка. На основе проведенного анализа, в соответствии с вариантом определения молниевой обстановки лопасти для разных участков лопасти на рисунке *F.1* могут быть определены различные уровни УМЗ. Например в концепции типа А участок 1 лопасти может быть защищен для охвата токов молнии УМЗ I для прямых ударов, а другие участки 2, 3 и 4 с УМЗ II, III и IV соответственно. Во втором типе В, УМЗ I и более низкие могут быть выбраны для участков 1 и 2. Для любого подхода требуется, чтобы участок 1, представляющий вершину лопасти, соответ-

ствовал УМЗ I, альтернативным способом, оценка общего риска должна показать, что УМЗ II или меньше применим для наиболее серьезных частей лопасти. Без учета воздействия, выбранного для каждого участка, изготовитель должен обеспечить, чтобы участок перехвата прямых ударов 1 мог бы безопасно проводить через лопасть и оставшиеся участки, даже если подверженность прямым ударам меньше во встроенных участках.

В любом случае изготовитель должен гарантировать, что в качестве целого элемента лопасть соответствует необходимому уровню молниезащиты посредством сочетания возможности попадания ударов молнии и суровости токов молнии.

Молниевая обстановка определяется для каждого участка, примеры концепции А и В на рисунке *F.1* показаны в таблице *F.1* — для концепции А и таблице *F.2* — для концепции В.

Таблица *F.1* — Определение площади лопасти для примера в концепции А

Площадь лопасти		Стандартные размеры площади, м			Ток I, кА
Участок	Длина, м, или % длины лопасти	Лопасть 40 м	Лопасть 60 м	Лопасть 80 м	
1	5 %	2	3	4	200
2	10 %	4	6	8	150
3	15 %	6	9	12	100
4	Остаток лопасти	28	42	56	10

Таблица *F.2* — Определение площади лопасти для примера в концепции В

Площадь лопасти		Стандартные размеры площади, м			Ток I, (элемент тока 10/350 мкс), кА
Участок	Длина, м, или % длины лопасти	Лопасть 40 м	Лопасть 60 м	Лопасть 80 м	
1	40 %	16	24	32	200
2	60 %	24	36	48	150, 100, 50, 10, как определено для конкретной лопасти

Величина последующего короткого удара, перехватываемого различными участками, масштабируется линейно с масштабированием первого короткого удара, при этом заряд, связанный с длительным ударом, сохраняется постоянным на участках.

Характеристики любой части СМЗ лопасти или проводящих компонентов, принимающих участие в согласовании молниезащиты, должны быть подтверждены, как описано в 8.2.2, — с конкретным воздействием, как определено для молниевой обстановки.

***F.1.3* Переходы участков**

Процесс молниевой обстановки является примером того, как подверженность воздействию молнии может быть описана для конкретной лопасти и площадки. При определении воздействия молнии на конкретную лопасть особое внимание должно быть уделено проводящим компонентам конструкции и/или внутренним электрическим системам, если осуществляется переход между участками в концевой области. При переходах между участками установленные подэлементы должны конструироваться, чтобы выдерживать параметры участка более высокого уровня для расстояния, равного 1 м от перехода участков.

F.2 Определение зон молниезащиты для ВЭУ (но не лопастей)

F.2.1 Общие положения

Чтобы сконструировать СМЗ для конструкции, удобно разделить ее на зоны молниезащиты (ЗМЗ), где определена молниевая электромагнитная обстановка. В таблице *F.3* перечислены определения ЗМЗ согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-1.*

Таблица *F.3* — Определение зон молниезащиты (*ГОСТ Р МЭК 62305-1*)

Внешние зоны молниезащиты	
ЗМЗ 0	Зона, в которой угроза появляется вследствие незатухающего электромагнитного поля молнии и в которой внутренние системы могут подвергаться воздействию полных или частичных выбросов тока молнии. ЗМЗ 0 подразделяют следующим образом:
ЗМЗ 0_A	зона, в которой угроза появляется вследствие прямого удара молнии и полного электромагнитного поля молнии. Внутренние системы могут подвергаться воздействию полных или частичных выбросов тока молнии
ЗМЗ 0_B	зона, защищенная от прямых ударов молнии, однако в ней угроза появляется вследствие полного электромагнитного поля молнии. Внутренние системы могут подвергаться воздействию частичных выбросов тока молнии
Внутренние зоны молниезащиты	
ЗМЗ 1	Зона, в которой выброс тока ограничивается перераспределением тока и УЗИП на границе. Пространственное экранирование может ослабить электромагнитное поле молнии
ЗМЗ 2,...*n*	Зона, в которой выброс тока может дополнительно ограничиваться перераспределением тока и дополнительным УЗИП на границе. Пространственное экранирование можно использовать дополнительно для дальнейшего ослабления электромагнитного поля молнии
Примечания 1 Как правило, чем выше номер отдельной зоны, тем ниже параметры электромагнитной среды. 2 Ограничение тока его перераспределением достигается путем уменьшения токовой нагрузки отдельных молниеотводов СМЗ вследствие распределения исходного тока молнии между несколькими молниеотводами.	

***F.2.2* Зона молниезащиты ЗМЗ 0**

Граница между зонами ЗМЗ 0_A и ЗМЗ 0_B для гондолы, ступицы и башни выше 80 % высоты ступицы, как показано на рисунке *F.2*, защита от прямого попадания молнии должна быть обеспечена по необходимости и может быть определена с помощью модели катящейся сферы, как показано на рисунке *F.1* (см. также *ГОСТ Р МЭК 62305-1* и *ГОСТ Р 59789*). Электронное оборудование на внешней стороне может потребовать защиты даже ниже 80 % высоты ступицы (дополнительную информацию см. в *ГОСТ Р 59789*). Поверхности ВЭУ ниже 80 % высоты ступицы являются ЗМЗ 0_B. Допускается использовать также компьютерные модели для количественного определения предполагаемой величины ударов в различные части ВЭУ. Внутренние системы зоны ЗМЗ 0_B могут подвергаться воздействию частичных выбросов тока молнии.

С помощью средств воздушного перехвата (например, стержень молниеотвода), расположенных на задней кромке оболочки гондолы, зона ЗМЗ 0_B может быть создана на вершине гондолы, что может защитить метеорологические инструменты от прямого попадания молнии.

Инструменты размещения воздушной системы перехвата разрядов (например, катящаяся сфера, защитный угол и т. д.) по *ГОСТ Р 59789* не применяются к лопастям ВЭУ. Поэтому конструкция воздушной системы перехвата разрядов молнии должна быть проверена в соответствии с 8.2.3.

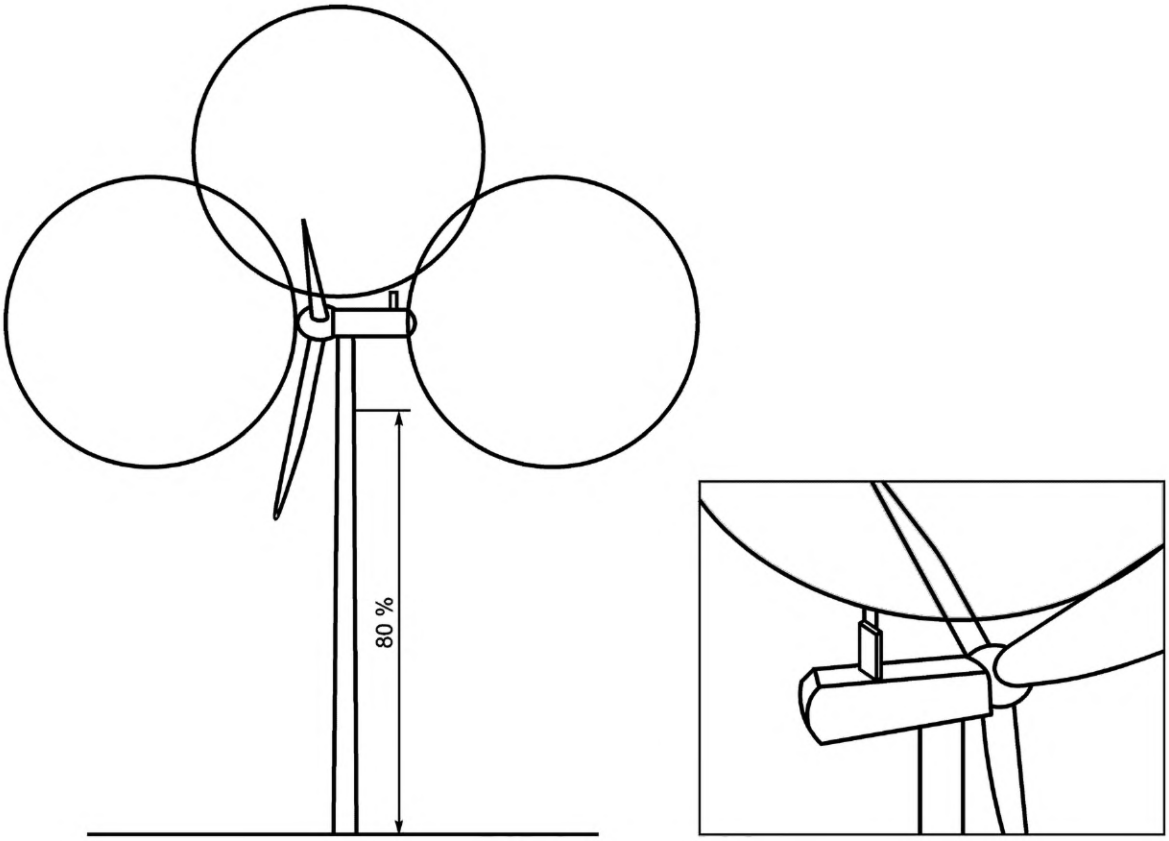


Рисунок *F.2* — Метод катящейся сферы, примененный к ВЭУ

***F.2.3* Другие зоны молниезащиты**

Граница между зонами ЗМЗ 0_A или ЗМЗ 0_B и ЗМЗ 1 может проходить по башне или вершине оболочки гондолы, если есть металлический кожух или металлическая экранирующая сетка, достаточная для защиты элементов внутри (оптимальной является клетка Фарадея вокруг гондолы). В случае, когда оболочка гондолы сделана из стеклопластика, рекомендуется, чтобы металлическая рама или обвязка была утоплена в оболочку гондолы с целью получить, как минимум, во внутренней области ЗМЗ 0_B для защиты элементов гондолы от прямого попадания молнии или тока лидера без обратного удара молнии (рисунки *F.3* и *F.4*). Она должна быть безупречно соединена с опорной плитой механического приводного механизма гондолы. В идеале металлическая сетка в кожухе из стеклопластика должна быть интегрирована в эту рамку для того, чтобы гондола определялась как зона ЗМЗ 1. Сетка с большим размером ячейки с размером отверстий до нескольких метров будет защищать гондолу от прямого попадания молнии и тока лидера без обратного удара молнии. Она будет лишь незначительно ослаблять магнитное и электрическое поля.

Сетка с маленьким размером ячеек будет также защищать от прямого попадания молнии и тока лидера без обратного удара молнии. В зависимости от размера ячейки и толщины сетки сетка может сильно ослаблять магнитное и электрическое поля. По правилу буравчика ослабление будет эффективным на расстоянии от сетки, равном размеру ячейки.

На рисунках *F.6* и *F.7* показано, как пространство ВЭУ может быть разделено на защитные зоны ЗМЗ 1 и ЗМЗ 2. Гондола (с сеткой в кожухе), башня и трансформаторный отсек являются защитными зонами ЗМЗ 1. Механизмы внутри металлических отсеков в областях ЗМЗ 1 находятся в защитной зоне ЗМЗ 2. Например, средства управления внутри отсека внутри металлической башни находятся в ЗМЗ 2, а средства управления внутри металлических отсеков вне башни расположены в ЗМЗ 1 или ЗМЗ 2.

Если башня сделана из металлической трубы и между частями башни существует электрическое соединение, ЗМЗ внутри башни может быть определена как ЗМЗ 2. Стальная полая башня является очень эффективной клеткой Фарадея при условии, что она закрыта с электромагнитной точки зрения сверху и снизу.

Очень чувствительное оборудование можно поместить в еще более защищенную зону ЗМЗ 3 на другом уровне металлических отсеков. Именно чувствительность элементов в данной зоне (т. е. выдерживаемые пределы) определяет уровень, до которого влияние молнии, такое как ток, напряжение, магнитное и электрическое поле должно быть уменьшено в этой зоне. Поэтому никакие конкретные значения тока, напряжения и электромагнит-

ного поля не рекомендуются в базовых стандартах по молниезащите *ГОСТ Р МЭК 62305-1, ГОСТ Р МЭК 62305-2, ГОСТ Р МЭК 62305-4* и *ГОСТ Р 59789*.

Примечание — Ослабление магнитного и электрического полей для металлических отсеков зависит от их конструкции. Для электромагнитно совместимых отсеков изготовитель может предоставить замеренные ослабления магнитного и электрического полей.

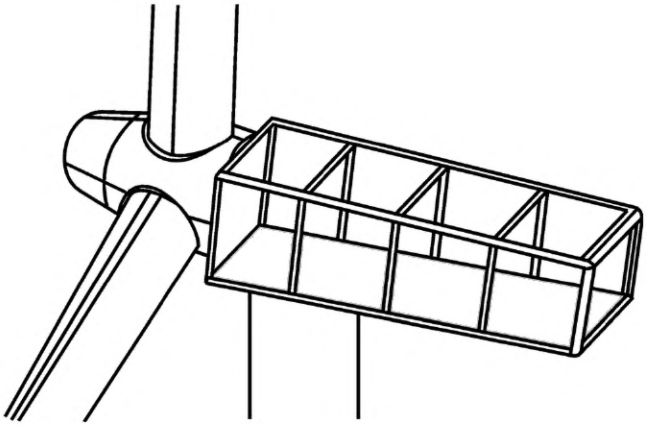


Рисунок *F.3* — Сетка с большими ячейками для гондолы с кожухом из стеклопластика

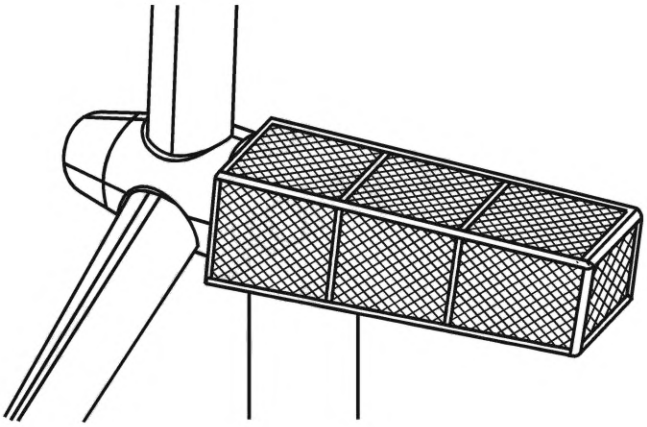


Рисунок *F.4* — Сетка с маленькими ячейками для гондолы с кожухом из стеклопластика

***F.2.4* Границы зон молниезащиты**

На границе каждой зоны необходимо гарантировать, чтобы кабели и провода, пересекающие границу, не проводили большое количество тока молнии или переходного напряжения в ЗМЗ с большим номером. Это достигается надлежащим уравниванием потенциалов и экранированием, а также защитой кабелей и проводов от перенапряжения на границе зон. Цель заключается в уменьшении тока и напряжения до уровня, приемлемого для оборудования, которое находится в зоне защиты с большим номером

Количество необходимых УЗИП можно уменьшить правильным разделением на зоны правильного расположения кабелей, использования экранированных кабелей и использования оптического волокна для передачи сигналов и данных.

Последующие зоны характеризуются значительными изменениями в интенсивности электромагнитного импульса от грозовых разрядов. Граница ЗМЗ определяется мерами защиты, применяемыми для ослабления магнитного и электрического полей.

В некоторых особых ситуациях может возникнуть необходимость перехода сразу из ЗМЗ 0_B в ЗМЗ 2. В этом случае к защитным элементам предъявляют более высокие требования на границах зон, которые должны ослаблять соответствующие параметры до необходимого уровня.

Зоны молниезащиты могут соединяться через экраны экранированных кабелей или экранированные кабельканалы, в результате, например, два отсека управления, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга, можно соединить без использования УЗИП на контуре сердечников (рисунок *F.5*). Подобным образом отсек, опре-

деленный как ЗМЗ 2, можно расширить экранированным кабелем для включения внешнего металлического корпуса датчика, также определенного как ЗМЗ 2.

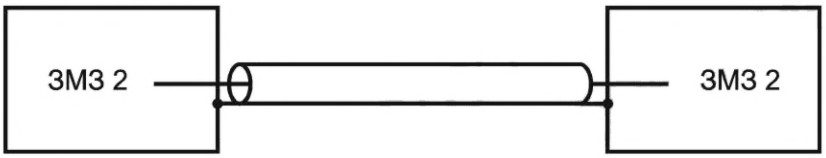


Рисунок *F.5* — Два отсека, определяемые как ЗМЗ 2, соединены через защитный экран экранированного кабеля

F.2.5 **Требования по зоне защиты**

Во избежание повреждений или недопустимых отказов необходимо гарантировать, что внутри данной зоны элементы не подвергаются частичному воздействию тока молнии, разности напряжений или электромагнитного и электрического полей, превышающих уровень их стойкости. Для выполнения этих требований необходимо выполнить испытания и проверку, и их результаты задокументировать.

Защиту можно обеспечить с помощью согласованных УЗИП, экранированных кабелей, экранирующих кабельных магистралей или их сочетания (при необходимости).

Пример документирования системы мер защиты от перенапряжения показан на рисунке *F.7*.

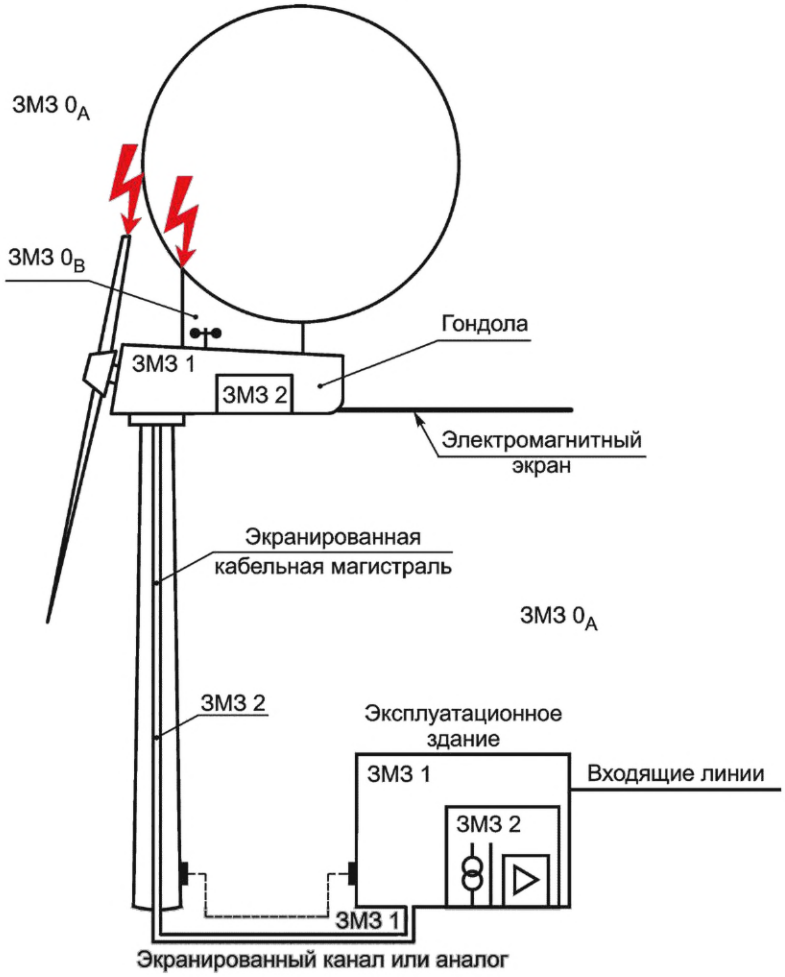


Рисунок *F.6* — Пример: деление ВЭУ на различные ЗМЗ

При применении ЗМЗ на ВЭУ должны учитываться специальные аспекты, как это определено в примерах ниже:

Пример 1 — Падение напряжения вдоль конструкции

Зона молниезащиты внутри корпуса, обеспечивающая тот же потенциал оборудования внутри, не требует защиты от перенапряжения внутренней проводки. Оборудование, которое не размещено в том же корпусе, даже в случае нахождения в той же ЗМЗ может потребовать защиты от перенапряже-

ния, если сделана оценка, что оборудование при воздействии молнии не достигает того же потенциала напряжения. Падение напряжения вдоль подсоединенной конструкции, на которой размещается оборудование, может быть достаточным, чтобы вызвать разность напряжений. Например, см. рисунок F.6, представьте себе потребителя электроэнергии на передней кромке гондолы в ЗМЗ 1. Этот энергопотребитель соединен с источником питания, установленным на задней кромке гондолы в ЗМЗ 1. При ударе молнии в лопасть ток молнии пройдет через переднюю часть конструкции гондолы, тем самым вызвав падение напряжения вдоль конструкции. Последствие будет заключаться в том, что энергопотребитель и источник питания будут находиться на разном уровне потенциалов, даже при том, что они находятся в той же самой ЗМЗ. Это следует учитывать.

Пример 2 — Изменчивость характеристик ЗМЗ

Как указано в примере 1, объекты в одной ЗМЗ могут подвергаться воздействию разного напряжения в зависимости от пути тока и конкретного места размещения в ЗМЗ. Поэтому допустимо в характеристиках ЗМЗ указывать диапазоны значений для пикового тока и электромагнитной характеристики. Например, от 5 до 10 кА и от 2 до 10 кА/м соответственно.

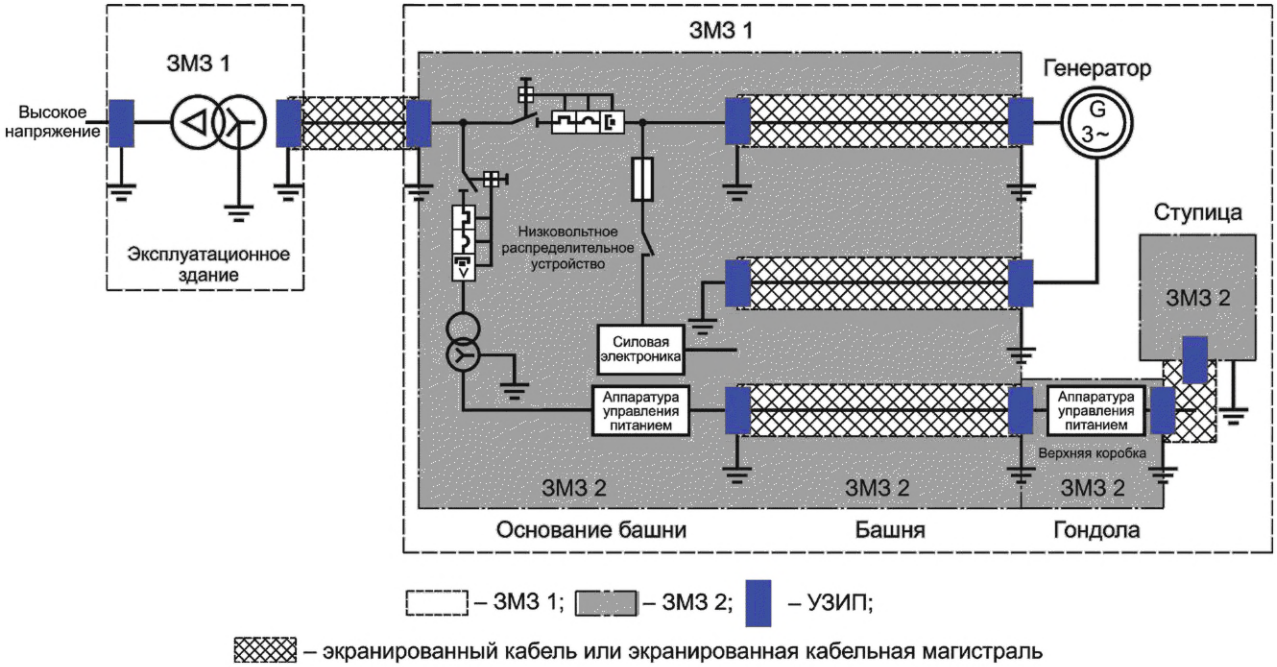


Рисунок *F.7* — Пример записи деления мер защиты электрической системы от электромагнитного импульса от грозовых разрядов на зоны защиты с указанием мест пересечения с электрической цепью границ ЗМЗ, показывающий, как длинные кабели проходят между основанием башни и гондолой

Приложение *G*
(справочное)

Защита лопастей

G.1 Общие положения

G.1.1 Типы лопастей и методы их защиты

Лопасти ВЭУ представляют собой большие полые конструкции, изготовленные из композитных материалов, таких как стеклопластик, дерево, древесно-слоистый пластик, армированный углеродным волокном пластик. Углепластик обычно используется для придания жесткости конструкции лопасти или специальных элементов, таких как концевой вал для лопастей с тормозами на концевой части (тормозной механизм с концевым срывом потока). Некоторые части и навесные элементы, такие как крепежные фланцы, противовесы, шарниры, сборные кронштейны для разделенных лопастей, подшипники, тросы, электрические провода, пружины и крепежные элементы сделаны из металла. Удары молнии будут касаться лопастей, даже не имеющих металлических элементов, и при формировании дуги молнии внутри лопасти возникнут серьезные повреждения.

Две стороны или покрытия поверхности лопасти обычно изготавливаются в виде отдельных листов из стекловолокна или других композитных материалов, склеенных вместе вдоль передних и задних кромок и приклеенных к внутренней несущей конструкции, также изготовленной из стекловолокна. Внутри лопасти есть большие воздухонаполненные полости, образованные покрытием поверхности и внутренней конструкцией и увеличивающие общую длину лопасти. Альтернативным образом поверхностный материал лопасти может поддерживать механическую прочность лопасти без силового лонжерона. Кроме того, лопасти могут быть изготовлены как цельные с помощью передовых технологий полимерного литья без использования клееных поверхностей.

Существует несколько типов лопастей в зависимости от применяемого механизма управления и тормозного устройства, а также использования изоляционного и проводящего композитного материала. Пять основных типов представлены на рисунке *G.1*.

В лопастях типа А для торможения используется щиток (элерон) на внешней стороне передней кромки. На лопастях типа А местами попадания молнии часто оказываются стальные шарниры щитка, и очень часто наблюдается серьезное повреждение, поскольку поперечное сечение стальных тросов, используемых для работы щитка, обычно является недостаточным для проведения тока молнии.

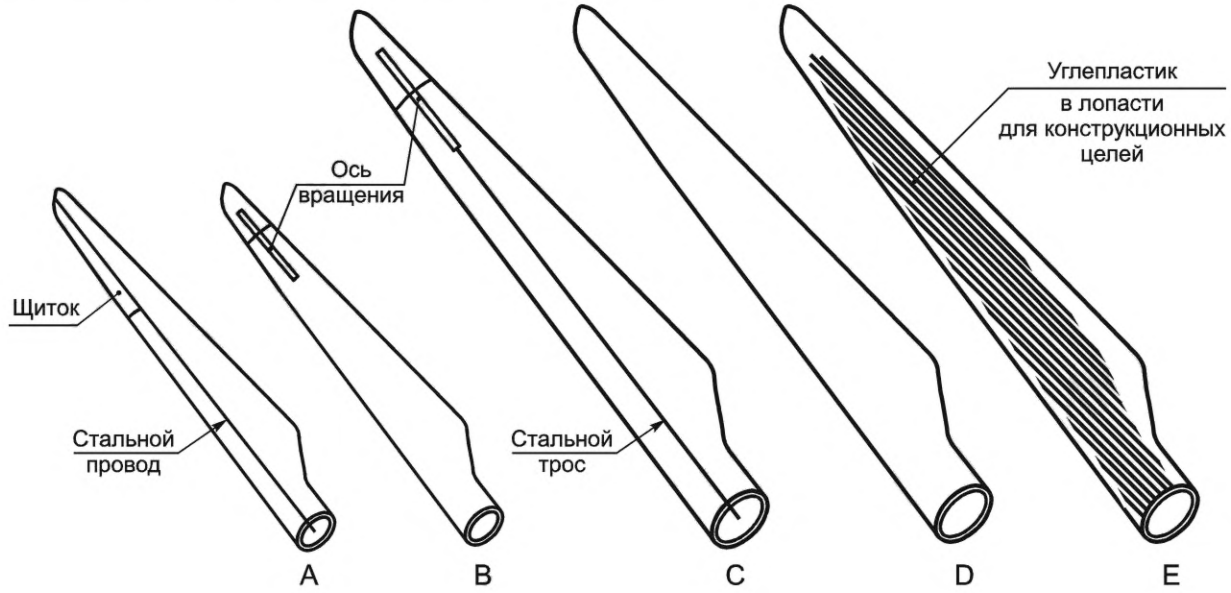


Рисунок *G.1* — Типы лопастей ВЭУ

В лопастях типа В используют тормоз на концевой части, который удерживается пружиной и отпускается при чрезмерной частоте вращения от центробежной силы. Что касается лопастей типа В, места попадания молнии особенно видны на протяжении нескольких десятков сантиметров от внешнего конца или по краям внешнего конца в месте нахождения внешнего края концевого вала. Начиная от точки попадания, дуга молнии образуется внутри конечной части к внешнему краю концевого вала, а с другого конца вала дуга образуется внутри основной лопасти вниз по направлению к стальному крепежному фланцу на основании лопасти. Такие внутренние дуги неизменно ведут к катастрофическому разрушению лопасти. Лопасти типа А и В широко применялись для ВЭУ предыдущего образца мощностью 100 кВт.

Лопасть типа С — это лопасть с концевым тормозом, который управляется стальным проводом. Что касается лопастей типа В, места попадания молнии преимущественно находятся на протяжении нескольких десятков сантиметров от внешнего конца или по краям внешнего конца в месте нахождения внешнего края концевого вала. Что касается лопастей типа С, так же, как и у типа В, дуга молнии, образованная внутри конечной части между точкой попадания и внешним краем вала, приводит к серьезным повреждениям. На лопастях типа В повреждение основной лопасти наиболее часто происходит, когда стальной провод не может провести ток молнии. Минимальный диаметр стальных проводов, используемых для этих целей, составляет 10 или 12 мм для лопастей длиной 17 м. Такие провода способны проводить большую часть токов молнии и, таким образом, защищать основную лопасть от повреждения (см. *D.6* с дополнительным описанием определения размеров систем защиты).

Лопасть типа D — это лопасть, полностью изготовленная из непроводящих материалов. Опыт с непроводящими лопастями показывает то же самое, что и с другими типами лопастей, точки попадания молнии обычно находятся близко к концу. По сравнению с другими типами лопастей точки попадания молнии также могут быть распределены беспорядочно в других местах по всей длине лопасти.

Лопасть типа Е — это лопасть, в которой некоторые элементы конструкции изготовлены из армированного углеродным волокном пластика (CFRP), так как он обладает высокой жесткостью при указанном весе. В зависимости от конкретной конструкции углепластик может использоваться для армирования покрытия лопасти, а также в качестве несущего элемента конструкции, как силовой лонжерон. Благодаря его электрическим свойствам, углепластик нужно тщательно согласовывать с СМЗ, чтобы обеспечить необходимые разделительные расстояния, электрическую изоляцию и/или электропроводность. Аспекты молниезащиты лопастей ВЭУ, содержащих углепластик, рассматривают в *G.3*.

Удары молнии, попадающие в непроводящие лопасти или изоляционные части лопастей, содержащие проводящие части, можно по меньшей мере объяснить тем, что загрязнения и вода со временем повышают электропроводность таких частей. Лабораторные испытания высоким напряжением показали, что дуговой разряд попадает в непроводящие лопасти, фактически обрызганные соленой водой, как если бы лопасть была металлической. Другое объяснение заключается в том, что лопасти просто находятся на пути удара молнии в ВЭУ. Кроме того, известно, что разряды на поверхности образуются легче, чем в воздухе, особенно если на поверхности есть соль и вода. В любом случае практический опыт показывает, что серьезное повреждение молнией как непроводящих лопастей (тип D), так и лопастей, содержащих углепластик (тип Е), возникает довольно часто, и поэтому необходима молниезащита.

***G.1.2* Механизм разрушения лопасти**

Типичными видами разрушений в точках попадания молнии являются отслоение и сжигание композитного материала поверхности, а также нагревание или плавление металлических элементов, служащих точками крепления.

Наиболее серьезные повреждения лопастей ВЭУ возникают, когда молния образует дуги с высокой энергией внутри лопасти из-за попадания в незащищенную часть поверхности лопасти. Дуги могут образовываться в воздушном пространстве внутри лопасти или вдоль внутренних поверхностей. Другой вид повреждения наблюдается, когда ток молнии или его часть проходит в или между слоями композитных материалов, или в клеевых трещинах применительно к системе вертикальных молниеотводов, возможно из-за того, что в этих слоях и трещинах накапливается вода. Ударная волна, вызванная такими внутренними дугами, может буквально взорвать лопасть, разорвав поверхность лопасти вдоль кромок и от внутреннего силового лонжерона. Рассматриваются все степени повреждения, начиная от трещин на поверхности до полного разрушения лопасти.

В некоторых случаях ударные волны распространяются от лопасти, в которую ударила волна, через ступицу в другие лопасти, вызывая их повреждение.

Внутренние дуги часто образуются между точкой попадания молнии на кончике лопасти и какой-либо проводящей частью внутри лопасти. Что касается типа С, повреждение часто сводится к повреждению концевой части, а основная часть лопасти не повреждается. Повреждение основных частей лопастей типа С обычно наблюдается, когда дуга образуется внутри основной части лопасти. Обычно это происходит в тех случаях, когда стальной провод, управляющий тормозом концевой части лопасти, имеет недостаточное поперечное сечение для того, чтобы проводить ток молнии из концевого вала в ступицу. Что касается лопастей типа А, основная часть лопасти разрушается.

Явление, вызывающее серьезные повреждения конструкции лопастей ВЭУ, является, следовательно, образованием ударной волны вокруг дуги молнии внутри лопасти. Незначительное повреждение может возникнуть, когда дуга молнии образуется на внешней поверхности или, когда ток молнии проводится с помощью металлических элементов с недостаточным поперечным сечением.

Не следует путать высокоэнергетическое внутреннее дугообразование, вызывающее повреждение конструкции, с низкоэнергетическими частичными разрядами, указанными в *G.2.4*.

***G.2* Методы защиты**

***G.2.1* Общие положения**

Общей проблемой молниезащиты лопастей ВЭУ является безопасное проведение тока молнии от точки попадания до ступицы или гондолы таким образом, чтобы избежать образования дуги молнии внутри лопасти. Этого

можно достичь путем увода тока молнии от точки попадания по поверхности к основанию лопасти, используя металлические проводники, прикрепленные как на поверхности лопасти, так и внутри нее. Другим методом является добавление проводящего материала к самому материалу поверхности лопасти, делая, таким образом, лопасть достаточно проводящей для безопасного прохода тока молнии к основанию лопасти. Варианты этих двух методов используют для лопастей ВЭУ (рисунок *G.2*).

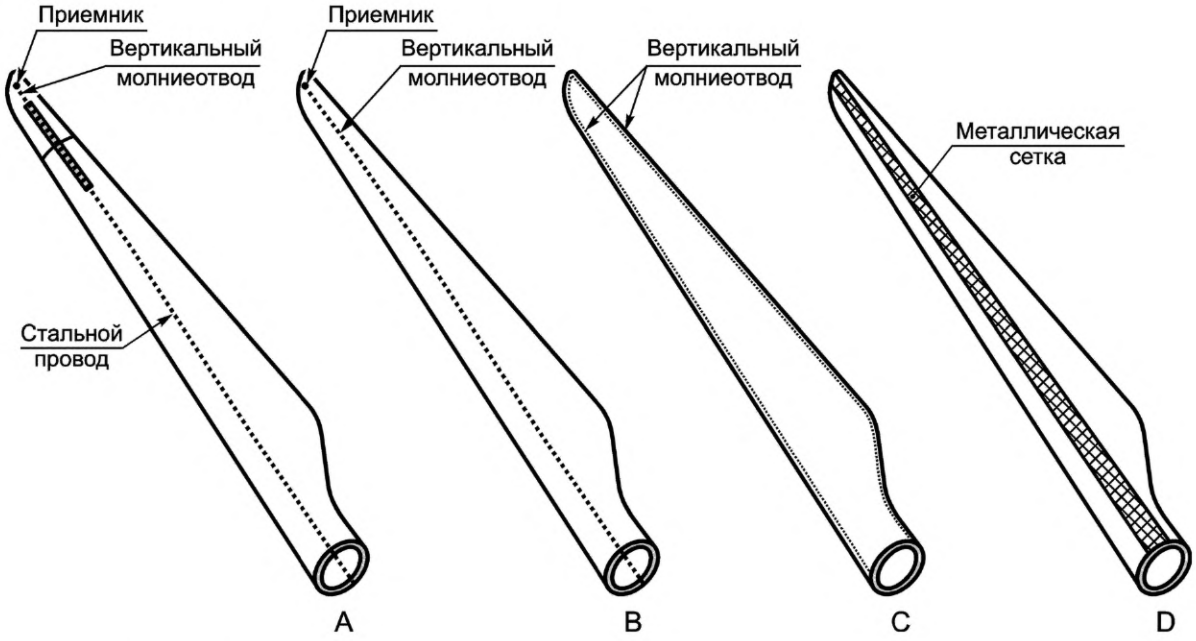


Рисунок *G.2* — Концепции молниезащиты для лопастей современных крупных ВЭУ

***G.2.2* Молниеприемники, расположенные на поверхности лопасти или помещенные внутри**

Металлические проводники на поверхности лопасти, служащие в качестве молниеприемников или системы вертикальных молниеотводов, должны иметь достаточное поперечное сечение, чтобы обладать способностью выдерживать прямое попадание молнии и проводить весь ток молнии. Кроме того, необходимы точные размеры, чтобы добиться надежной фиксации с поверхностью лопасти. Минимальное поперечное сечение для алюминия — 50 мм^2. При использовании металлических проводников с указанным минимальным поперечным сечением могут возникнуть проблемы в достижении их надежной фиксации. Более того, проводники, установленные на поверхности лопасти, могут подвергнуть риску аэродинамику лопасти или производить нежелательный шум.

Для молниеотводов, помещенных в лопасть, используются провода или оплетка кабелей как из алюминия, так и из меди. Существуют системы защиты, в которых металлический проводник, соединенный с основанием лопасти, находится или на поверхности лопасти вдоль ее задней кромки, или внутри задней кромки. Некоторые конструкции лопастей имеют металлические проводники, расположенные вдоль передних и задних кромок (тип С). Кроме того, некоторые конструкции имеют металлические молниеуловители, расположенные на поверхности вокруг лопасти в нескольких точках вдоль лопасти, каждый из которых соединен с проводниками, расположенными вдоль кромок лопасти.

***G.2.3* Клейкие металлические ленты и сегментные ленты молниеуловителя**

Клейкая алюминиевая лента, расположенная на поверхности лопасти, может использоваться в нескольких исследованиях. Однако такие ленты имеют тенденцию отклеиваться в течение нескольких месяцев. При условии, что проблема сохранения ленты на лопасти может быть решена, возможно, металлические ленты могут быть полезным методом защиты особенно в качестве модернизации для существующих незащищенных лопастей. Следует, однако, отметить, что большие ударные волны связаны с ведением разряда вблизи поверхности лопасти *[30]*. Это может привести к конструктивным повреждениям.

Некоторые эксперименты с сегментными лентами молниеуловителя проводились ранее. Такие сегментные ленты используются на обтекателях антенны летательного аппарата, поскольку они не влияют на сигнал радара.

Возможно, что металлическая лента может быть использована в качестве одноразовой защиты, которую необходимо заменять после удара молнии.

***G.2.4* Внутренние системы вертикальных молниеотводов**

Решение вопросов, связанных с проводниками, расположенными на поверхности лопасти, заключается в том, чтобы расположить молниеотводы внутри лопасти. Металлические крепления для проводника проходят

сквозь поверхность и служат в качестве отдельных молниеприемников. Такие системы защиты используются на летательных аппаратах *[30]*.

Система молниезащиты, используемая для многих лопастей и производимая в настоящее время, имеет отдельные молниеприемники, расположенные на вершине лопасти (типы А и В на рисунке *G.2*). Система вертикальных молниеотводов проводит ток молнии от приемников на кончике к основанию лопасти. Для лопастей с тормозами на концевой части стальной провод, управляющий кончиком, используется в качестве вертикального молниеотвода (тип А). Если лопасть не имеет тормозов на концевой части, то медный провод, расположенный вдоль внутреннего лонжерона, используется в качестве вертикального молниеотвода (тип В).

Было изготовлено несколько тысяч лопастей с такой СМЗ (типы А и В на рисунке *G.2*). Очень успешен опыт работы с данной СМЗ для лопастей длиной 20 м. Принцип использования одного или нескольких молниеприемников, соединенных с внутренним вертикальным молниеотводом, широко использовался многими изготовителями для лопастей до 60 м. Для таких длинных лопастей опыт показал, что существует риск прямого попадания молнии через слоистый материал во внутренний вертикальный молниеотвод, вызывая серьезное повреждение лопасти. Эти проблемы, по-видимому, связаны с неконтролируемыми частичными разрядами, образующимися от внутренних проводящих частей (вертикальный молниеотвод, элементы соединения и т. п.).

Когда такие низкоэнергетические частичные разряды образуются от внутренних металлических частей лопасти, они будут распространяться равномерно быстро, так же как разряды, образующиеся от приемников. Как только эти внутренние разряды ударяют во внутреннюю поверхность лопасти, они будут по отношению к частичным разрядам на внешней поверхности лопасти усиливать электрическое напряжение на слоистый материал. Увеличенное напряжение, возможно, не является проблемой для ограниченного числа частых изменений поля (приемники удара молнии или соседние конструкции), но, когда лопасть подвергается воздействию нескольких ударов во время всего срока службы, напряжение может со временем образовать целый электрический пробой. Физическое воздействие на лопасть с канала электрического пробоя такого высокого напряжения довольно ограничено, но повреждение, связанное со следующим током молнии, будет разрушительным, как указано в *G.1.2*.

Таким разрядам можно препятствовать или устранять их путем защиты внутреннего вертикального молниеотвода и других проводящих компонентов в лопасти при помощи электроизоляционного материала, таким образом, уменьшая проблему.

***G.2.5* Проводящие материалы поверхности**

Альтернативой молниеприемнику, расположенному на поверхности лопасти, является создание самой проводящей поверхности. В авиационной промышленности молниезащита стеклопластика и композитных материалов из углеводного волокна для крыльев и поверхностей, подвергающихся воздействию молнии, достигается путем добавления проводящего материала во внешние слои, таким образом снижая повреждение небольшой области в точке попадания молнии. Проводящим материалом может служить металл, напыленный на поверхность, волокна с металлическим покрытием во внешних слоях композитного материала, металлические провода, вплетенные во внешние слои композитного материала или металлические сетки, размещенные прямо под поверхностью. Молниезащита лопастей ВЭУ сделана из металлической сетки, помещенной вдоль сторон лопастей прямо под наружным отделочным слоем (D на рисунке *G.2*). Иногда самый кончик лопасти или сделан из металла или покрыт металлической пластиной.

Преимущество использования металлических сеток или других тонкостенных проводящих поверхностных элементов для вертикальных молниеотводов заключается в том, что возможные внутренние проводящие элементы (углеродный композитный материал) защищены от электрического поля и, следовательно, от прямого касания молнией. Индуктивное падение напряжения вдоль молниеотвода, связанное с большим перепадом тока, будет немного снижено, что крайне важно, учитывая риск боковых ударов. Однако необходимо учитывать также риск прямого попадания молнии в ребро таких тонкостенных элементов и возможность неравномерного распределения тока из-за поверхностных эффектов.

***G.3* Элементы конструкции из углепластика**

Армированный углеродным волокном пластик (CFRP) был использован для концевых валов для небольших лопастей и в настоящее время, как правило, используются как материал армирования больших лопастей. Благодаря своим превосходным механическим свойствам материал используется как для силового центрального лонжерона, так и прямо в поверхности лопасти. Предполагается использовать углеродный композитный материал для элементов конструкции и дальше, так как размер лопастей увеличивается.

Поэтому основной вопрос заключается в том, как углеродный композитный материал реагирует на воздействие током молнии, попадающим и протекающим внутри материала. В данном случае два электрических свойства углеродного композитного материала в значительной степени отличают его от изотропных проводящих материалов, таких как металлы, удельная электропроводность по постоянному току и степень анизотропии.

Для удельной электропроводности по постоянному току углеродного композитного материала обычно установлено значение, которое в 1000 раз ниже значения для алюминия. В зависимости от реальной конструкции и технологии прошивки электропроводность углеродного композитного материала имеет очень высокую степень анизотропии с более высоким сопротивлением материала в направлениях, перпендикулярных ориентации волокон. Например, есть данные по электропроводности образцов из углеродного композитного материала, используемых

для испытаний на удары молнии в авиационной промышленности. Электропроводность таких образцов меняется в пределах четырех порядков величин для разных направлений тока.

Поэтому резистивный нагрев углеродного композитного материала при подверженности высоким плотностям тока может быть критичным. Особенно в точках попадания молнии, где высокие токи входят в довольно замкнутую область, температура из-за потери джоулей может превышать температуру испарения матрицы. Когда матрица испаряется, давление от выделяющихся газов может вызвать разрушение и отслоение углеродного композитного материала. Углеродный композитный материал даже может сгореть, особенно в точке попадания молнии.

Если углеродный композитный материал используется в летательных аппаратах, считается обязательным использовать молниезащиту для элементов из углеродного композитного материала, которые могут быть поражены молнией или могут проводить ток молнии.

Для примера могут быть рассмотрены наконечники валов с покрытием из углеродного композитного материала для лопастей ВЭУ, которые повреждены молнией. Лабораторные испытания лопастей с покрытием из углеродного композитного материала показали отслоение и сжигание поверхности в точке попадания молнии. Поэтому в концепции защиты лопастей нужно учитывать воздействие прямых ударов по всей длине лопасти и документировать за счет испытаний и анализа, что прямые удары в вероятные точки попадания не вызовут никаких повреждений, ставящих под вопрос эксплуатационное требование 8.2.2.

Для каждой конкретной конструкции лопасти и стратегии молниезащиты, элементы конструкции из углепластика будут либо рассматриваться как неотъемлемые части пути тока молнии, или как электрически изолированные от СМЗ.

Важно обеспечить надлежащее согласование между элементами конструкции из углепластика, другими проводящими элементами и СМЗ. Для каждой конкретной конструкции лопасти и СМЗ согласование должно включать:

- электрическое соединение и/или
- электрическую изоляцию и/или
- физическое разделение.

Если используется гальваническое соединение, то необходимо определить является ли расстояние между точками уравнивания потенциалов достаточным, чтобы избежать развитие критических напряжений, которые могут вызвать неконтролируемый пробой.

G.4 Отдельные вопросы, касающиеся проводящих элементов

К проводящим элементам, рассмотренным в настоящем подразделе, относятся все проводящие части лопасти, кроме молниеприемников и системы вертикальных молниеотводов, приведенных в *G.2*, и возможного углеродного композитного материала, приведенного в *G.3*.

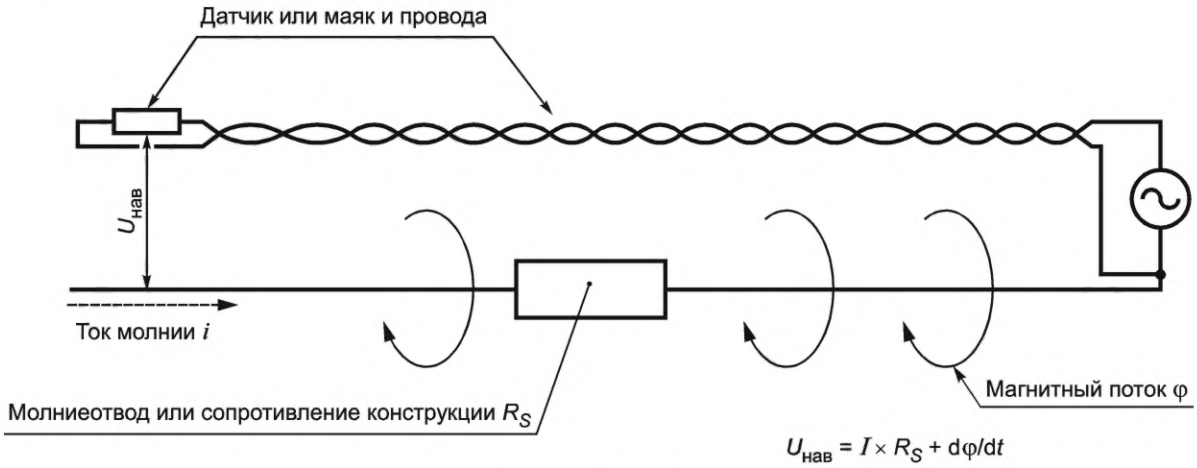


Рисунок *G.3* — Наведенное напряжение $U_{нав}$ между путем тока молнии и проводкой датчика за счет взаимной связи и полного сопротивления пути тока

Провода датчиков, помещенные на поверхности или внутри лопасти, могут подвергаться воздействию сильных магнитных полей, в результате которого между молниеотводом и другими проводами в лопасти появляется наведенное напряжение опасного уровня (см. рисунок *G.3*). Такие провода следует убрать, если возможно. Наведенное напряжение обычно значительно больше, чем резистивное, поэтому оценке наведенных напряжений и по возможности предотвращению их появления следует уделить особое внимание.

Защита лопасти ВЭУ должна быть тщательно согласована с СМЗ. Согласование должно включать:

- электрическое соединение и/или

- электрическую изоляцию и/или
- физическое разделение.

Открытые внешние молниеприемники прямо на наружной стороне внутренних проводящих элементов позволяют защищать внутренние конструкции от прямого попадания молнии. Более того, риск получения частичных разрядов от внутренних проводов уменьшается, если тщательно закрыть токоведущие проводники электроизоляционными материалами. Большой ток и высокое напряжение можно индуктировать в изолированных замкнутых цепях проводника вблизи системы вертикальных молниеотводов. Такие выбросы могут вызвать внутреннее искрение. Возможно, что конструкции, которые объединяют электрические провода, связанные с датчиками, световые сигналы и другие СМЗ, включая вертикальный молниеотвод, могут наиболее эффективно предотвращать повреждения данных систем. Для эффективной молниезащиты лопасти и функционирования систем, находящихся внутри нее необходимо тщательное согласование конструкций этих систем.

Подобным образом должны рассматриваться металлические элементы конструкции внутри лопасти, т. е. противовесы, амортизаторы, платформы и т. п. Все проводящие части в лопасти должны быть спроектированы таким образом, чтобы уменьшать усиление электрического поля и должны быть надлежащим образом согласованы с СМЗ лопасти для обеспечения необходимых разделительных расстояний, электрической изоляции и проведения тока так, чтобы уменьшить риск появления внутренних разрядов. Что касается электропроводки, важно, чтобы внешние устройства воздушного перехвата ударов молнии защищали внутренние проводящие элементы от электрического поля, т. е. от прямого попадания молнии.

Если в лопасти расположены другие проводящие элементы (такие как навигационный маяк на вершине лопасти, датчики молнии, аппаратура контроля текущего состояния и т. п.), они должны быть экранированы внешними молниеприемниками, уменьшая, таким образом, риск прямого попадания молнии в конструкцию. Риск появления внутренних разрядов, возможно приводящих к пробою покрытия лопасти, можно снизить путем тщательной защиты всех внутренних проводящих частей при помощи электроизоляционного материала.

G.5 Эффективность перехвата

Эффективность перехвата определяется, как количество ударов молнии в лопасти, правильно перехваченные молниеприемниками по отношению к общему количеству ударов молнии в лопасть. В этом смысле эффективность перехвата является параметром, описывающим способность СМЗ лопасти безопасно перехватывать удары молнии. На эффективность перехвата влияют следующие факторы:

- конструкция и подверженность воздействию молниеприемников (положение и геометрия);
- уровень изоляции внутренних проводящих частей;
- результат испытания попадания начального высоковольтного лидера по приложению *С* (эффективность перехвата).

Любые молниеприемники и удлинители устройств воздушного перехвата ударов молнии (сплошные проводники и сегментные молниеотводы на поверхности) необходимо разместить так, чтобы снизить вероятность пробоя непроводящей поверхности до допустимого уровня.

Расположение устройств воздушного перехвата ударов молнии должно быть таким, чтобы разрядное напряжение по непроводящей поверхности лопасти было меньше, чем напряжение пробоя покрытия лопасти. В действительности и напряжение пробоя покрытия лопасти, и разрядное напряжение поверхности будет трудно установить, так как ожидаются изменения из-за разных композитных материалов, а также влияния износа, трещин, влажности и загрязнения. Более того, на эффективность перехвата сегментных молниеотводов и отдельных приемников будет влиять присутствие проводящих материалов внутри лопасти *[31]*.

В недавних публикациях распределения попаданий молний в лопасти ВЭУ показывают, что большинство ударов молнии, попадают в участок наконечника лопасти, и вероятность попадания резко снижается в отношении основания лопасти. Дополнительная информация дана в *G.8*.

Высоковольтные испытания попадания молнии на испытательных образцах, представляющих конструкцию, полезны для определения эффективности перехвата, и поэтому следует выявить и решить все конструктивные аспекты до этапа изготовления.

В настоящее время разрабатываются методы численного расчета, используемые для определения возможных зон попадания молнии на лопастях и гондоле, и расчеты годового количества прямых попаданий ударов молнии в конкретные конструкции. Однако маловероятно, что методы численного моделирования могут точно спрогнозировать, будет ли пробита непроводящая конструкция лопасти, или установить количество и места расположения приемников, необходимых для предотвращения пробоев. Это может вызвать сложность большинства конструкций лопасти, а также динамику образования и роста многократных стримеров. Таким образом, методы численного расчета могут стать полезными средствами проектирования, а испытания подходящих конструкций высоким напряжением на попадание молнии, как рассмотрено в *С.2*, могут применяться для обеспечения дополнительной гарантии эффективности защиты.

G.6 Определение размеров систем молниезащиты

Материалы, используемые для молниезащиты лопастей ВЭУ, должны выдерживать совместные воздействия электрических, тепловых и электродинамических нагрузок, создаваемых током молнии. Номинальные раз-

меры для материалов, используемых для молниеприемников и вертикальных молниеотводов, представлены в таблице *G.1* (см. также *ГОСТ Р 59789*).

Таблица *G.1* — Материал, конфигурация и минимальная площадь поперечного сечения молниеприемников, стержней молниеприемников и вертикальных молниеотводов (*ГОСТ Р 59789*)

Материал	Конфигурация	Номинальная площадь поперечного сечения, мм^2
Медь Медь, покрытая оловом	Сплошной плоский Сплошной с круглым сечением Многожильный[2)] Сплошной с круглым сечением[3)]	50 50 50 176
Алюминий	Сплошной плоский Сплошной с круглым сечением Многожильный	70 50 50
Алюминиевый сплав	Сплошной плоский Сплошной с круглым сечением Многожильный Сплошной с круглым сечением[3)]	50 50 50 176
Медь, покрытая алюминиевым сплавом	Сплошной с круглым сечением	50
Оцинкованная горячим способом сталь[1)]	Сплошной плоский Сплошной с круглым сечением Многожильный Сплошной с круглым сечением[3)]	50 50 50 176
Сталь с медным покрытием	Сплошной с круглым сечением Сплошной плоский	50 50
Нержавеющая сталь	Сплошной плоский[4)] Сплошной с круглым сечением[4)] Многожильный Сплошной с круглым сечением[3)]	50 50 70 176

[1)] Механические и электрические характеристики, а также коррозионная устойчивость — см. стандарты *[31]*.
[2)] 50 мм^2 (диаметр 8 мм) может быть уменьшен до 25 мм^2 в определенных случаях, когда механическая прочность не является основным требованием. Необходимо рассмотреть возможность уменьшения расстояния между крепежными элементами.
[3)] Применяют только для стержней молниеприемников. Там, где механическое воздействие, такое как ветровая нагрузка, не является критическим, можно использовать стержни молниеприемников диаметром 9,5 мм, максимальной длиной 1 м.
[4)] Если тепловые и механические факторы являются важными, то эти значения можно увеличить до 75 мм^2.

Площади поперечного сечения, указанные выше, приводят в качестве ориентира, установленного для простых проводников. Для таких конфигураций повышение температуры, связанное с током молнии, можно определить аналитическим или цифровым способом. При рассмотрении элементов для конкретных применений, таких как гибкие вертикальные молниеотводы, и элементов с более сложной геометрией, таких как приемники, элементы соединений, расширенные проводники из фольги и т. п., принимают во внимание разные размеры.

Для таких элементов проверка конструкции должна проводиться на основе лабораторных испытаний. Когда отдельные элементы молниезащиты соединяются, образуя цельную конструкцию лопасти, рекомендуется провести испытание окончательной конструкции.

Элементы, на которые действует нагрузка, такие как стальные тросы для тормозов на концевой части лопасти, могут быть даже более твердыми, так как механическая прочность уменьшается при нагревании до высоких температур. Было несколько случаев со стальными тросами для контроля тормозов на концевой части лопасти, когда они сломались или расплавились из-за тока молнии даже при диаметре проводов 10 мм (площадь поперечного сечения 78 мм^2).

Повышение температуры проводников, проводящих ток молнии, можно рассчитать, как показано в уравнении (*G.1*) (см. также *ГОСТ Р МЭК 62305-1*). Конструктор должен учитывать повышение температуры всех компонентов, подвергаемых воздействию полного или частичного тока молнии, и гарантировать, что эти компоненты достаточно прочные для выполнения своей функции сразу после удара молнии.

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

где $\theta - \theta_0$ — повышение температуры проводников, K;

α — температурный коэффициент сопротивления, 1/K;

ρ_0 — удельное омическое сопротивление проводника при температуре окружающей среды, Ом · м;

q — площадь поперечного сечения проводника, м^2;

γ — плотность материала, кг/м^3;

C_w — теплоемкость, Дж/кг · K.

В таблице *G.2* представлены исходные данные к уравнению для стандартных материалов, и в таблице *G.3* представлены повышения температуры для нестандартных проводников. Следует отметить, что в случае использования проводов с предварительной нагрузкой температура не должна повышаться до точки плавления, чтобы не вызвать повреждение.

Что касается воздействия на молниеприемники, *ГОСТ Р МЭК 62305-1* предлагает использование модели падения напряжения на аноде или катоде. Было сделано несколько попыток коррелировать эту модель с испытаниями и опытом эксплуатации, но безуспешно. Необходимы дальнейшие исследования для получения полностью адекватной модели.

Таблица *G.2* — Физические характеристики характерных материалов, используемых в системах молниезащиты (см. *ГОСТ Р МЭК 62305-1*)

Количество	Материал			
	Алюминий	Мягкая сталь	Медь	Нержавеющая сталь[1)]
ρ_0, Ом · м	29×10^{-9}	120×10^{-9}	$17{,}8 \times 10^{-9}$	$0{,}7 \times 10^{-6}$
α, 1/K	$4{,}0 \times 10^{-3}$	$6{,}5 \times 10^{-3}$	$3{,}92 \times 10^{-3}$	$0{,}8 \times 10^{-3}$
γ, кг/м^3	2700	7700	8920	8,0 × 103
θ_s, °C	658	1530	1080	1500
c_s, Дж/кг	397 × 103	272 × 103	209 × 103	—
C_w, Дж/кгK	908	469	385	500

[1)] Аустенитная немагнитная.

Примечание — В таблице использованы следующие обозначения:
θ_s, °C — температура плавления;
c_s, Дж/кг — скрытая теплота плавления.

Таблица *G.3* — Повышение температуры, K, для различных проводников, как функция *W/R* (см. *ГОСТ Р МЭК 62305-1*)

Поперечное сечение, мм^2	Материал											
	Алюминий			Мягкая сталь			Медь			Нержавеющая сталь[1)]		
	W/R, МДж/Ом			W/R, МДж/Ом			W/R, МДж/Ом			W/R, МДж/Ом		
	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	566	—	—	—	—	—	169	541	—	—	—	—
16	147	454	—	1 114	—	—	56	143	309	—	—	—
25	52	132	283	211	912	—	22	51	98	938	—	—
50	12	28	52	37	96	211	5	12	22	188	460	938
100	3	7	12	9	20	37	1	3	5	45	102	188

[1)] Аустенитная немагнитная.

G.7 Соединение лопасть — ступица

В основании лопасти система вертикальных молниеотводов обычно подсоединяется либо к крепежному фланцу лопасти, либо к ступице, или непосредственно к гондоле (обходя подшипники изменения угла наклона и подшипники основного ветроколеса), используя специальную систему соединения.

Если лопасть имеет регулируемый угол наклона (тип D), ток молнии может либо пройти как через подшипник изменения угла наклона, так и вокруг подшипника через скользящий контакт, воздушный зазор или гибкий соединительный кабель с достаточным провисанием для винтового движения. Гибкое соединение через подшипник можно соединить с внутренней частью вертикального молниеотвода от лопасти.

В лопастях с тормозом на концевой части (тип C) должна быть защищена гидравлическая система, которая активирует провод управления. Стандартные гидравлические цилиндры, которые обычно используются, могут быть повреждены в результате искрения от стержня к корпусу цилиндра. Как правило, гидравлический цилиндр защищают путем увода молнии через гибкую соединительную перемычку с достаточным провисанием для обеспечения движения, или же используется скользящий воздушный зазор или щетка для увода тока молнии от гидравлического цилиндра. Необходимо уделить внимание уменьшению провисания в таких соединительных перемычках, так как индуктивное падение напряжения через провисающую часть может быть очень сильным, вызывая тем самым недостаточную защиту цилиндра.

Независимо от используемого типа интерфейса между лопастью и ступицей, элемент/конструкция должны быть верифицированы с использованием испытаний на физическое повреждение большим током в *C.3.3*.

G.8 Воздействие поля на лопасть ВЭУ

G.8.1 Общие положения

Лопасти ВЭУ наиболее подвержены воздействию прямых ударов молнии. Как это описано в *G.8.2*, вероятность попадания удара молнии не может быть определена посредством высоковольтных испытаний, описанных в приложении *C*, поэтому лучше всего определить указанную вероятность на основе анализа статистических данных для аналогичных лопастей в условиях эксплуатации.

Опыт эксплуатации различных конструкций лопастей различных производителей показал, что большая часть прямых ударов молнии приходится на внешнюю часть лопасти. Исследования указывают на то, что вероятность прямого удара молнии повышается ближе к вершине лопасти.

G.8.2 Применение

Цель представления полевых данных по распределению точек попадания молнии на ветроэлектрические генераторы — обеспечить, чтобы изготовители фокусировали конструирование и размещение СМЗ в эффективной манере, т. е. размещение основной защиты на участке в концевой части лопасти. Представленные полевые данные основаны на нескольких конструкциях лопастей, исследованных за прошедшее десятилетие, выявив четкое распределение попаданий молнии и повреждения в различных местах по размаху лопасти. Данные находятся в открытом доступе и однозначно демонстрируют тренд более высокой вероятности удара у концевого участка лопасти.

Распределение точек попадания молнии, представленное здесь, может отличаться от выводов в отношении специальных лопастей на специальных площадках, и при условии, что изготовители собрали такую информацию по их собственным конструкциям лопастей на соответствующих площадках, такие данные должны использоваться в качестве входных для конструирования.

G.8.3 Воздействие поля

В таблице *G.4* приведены обобщенные результаты натурных исследований различных ВЭУ, при которых точки попадания молнии выявлены за счет проверки лопастей и оценки успешной защиты от ударов молний, а также ударов, вызывающих повреждение лопастей. Проверка лопастей охватывает осмотр лопастей береговых и морских ВЭУ, лопастей, изготовленных из углепластика и армированного стеклопластика, а также лопастей с различными молниеприемниками и вертикальных молниеотводов. Рассматриваемые длины лопастей охватывали диапазон 39—45 м, со следующим распределением ударов молний на лопастях ветроэлектрических генераторов по сравнению с расстоянием от вершины лопасти.

Таблицу *G.4* можно использовать для ссылки, если отсутствует специальная информация.

Таблица *G.4* — Диапазон распределения прямых ударов молнии в результате полевых исследований по сбору данных в отношении распределения попадания в зависимости от расстояния от наконечников лопастей ВЭУ длиной 39—45 м с/без углепластика

Расстояния от наконечника, м	Диапазон распределения прямых ударов молнии, %
0—2	71—99
2—4	0—10
4—6	0—10
6—8	0—4
8—10	0—4
Остальные	0—4

Приложение *Н*
(справочное)

Проверка сходства конструкции лопастей с конструкциями лопастей, испытанными ранее

Н.1 Общие положения

Как указано в 8.2.3, должны быть проверены характеристики молниезащиты лопастей ВЭУ. Первое перечисление 8.2.3 описывает использование испытаний высоким напряжением и большим током, проводимых, как описано в приложении *С*, и как только конкретный тип лопасти пройдет эти испытания, требования документа будут выполнены. Часто сочетание численных методов по оценке распределения тока и напряжения используются в сочетаниях с лабораторными испытаниями на различных этапах создания ВЭУ, однако лишь полномасштабная экспериментальная проверка является окончательным подтверждением соответствия.

Для альтернативных конструкций лопастей или новых версий существующих конструкций, которые отличаются по длине лопастей, укладке слоев, и т. п., существует возможность заявления о прохождении проверки за счет сходства. Это возможно, если конструкция лопасти сильно не отличается от предшествующей проверенной конструкции, и, если функциональные параметры лопасти по отношению к молниевой обстановке остаются прежними. Конкретные оцениваемые аспекты для утверждения о сходстве лопастей согласуются между изготовителем лопастей, заказчиком и/или органом по сертификации. В настоящем приложении приводятся примеры тем, рассматриваемых при оценке.

Н.2 Ограничения по сходству

При проверке характеристик молниезащиты лопастей ВЭУ за счет сходства сравнивают исходную лопасть, «лопасть 1», которая до этого была успешно проверена на соответствие требованиям настоящего стандарта путем успешного прохождения всех испытаний высоким напряжением и большим током, описанных в приложении *С*, и новая, но похожая лопасть, «лопасть 2». При сравнении должно быть зафиксировано как сконструирована лопасть 2 и как определены ее размеры по отношению к лопасти 1.

В сравнении участвуют только лопасти без дополнительных электрических установок, т. е. лопасти, использующие стеклопластик и углепластик, а СМЗ состоит из молниеприемников и вертикального молниеотвода. Лопасти, имеющие дополнительные электрические установки (датчики, нагреватели, активный контроль потока, и т. п.), не могут быть верифицированы за счет заявления сходства, и поэтому оценка конструкции и характеристик молнии должна опираться на тщательный анализ и последовательность испытаний.

Для утверждения о сходстве двух различных конструкций лопастей по согласованию молниезащиты должны быть проверены и подтверждены аспекты, приведенные в таблице *Н.1*.

Таблица *Н.1* — Аспекты, которые необходимо проверить и подтвердить при оценке сходства лопастей

Сравнение лопасти 2 с лопастью 1		Да	Нет
1 Конструкция			
1.1	Отличается ли толщина слоистого материала на отрезке самых крайних 5 м лопасти 2 более чем на 30 % относительно лопасти 1?		
1.2	Отличается ли укладка по размаху лопасти (радиус, где заканчиваются слои) слоистого материала и заполняющих материалов более чем на 10 % в отношении крайних 5 м?		
1.3	Находится ли длина хорды лопасти 2 в пределах 20 % длины хорды лопасти 1 в отношении крайних 5 м лопасти?		
1.4	Находится ли толщина профиля лопасти 2 в пределах 25 % толщины профиля лопасти 1 для крайних 5 м лопасти?		
1.5	Является ли концепция СМЗ (тип молниеотводов, вертикальные молниеотводы, соединительные элементы, уравнивание потенциалов, количество элементов СМЗ, диэлектрическая прочность изоляционных материалов, толщина изоляции) одинаковой?		
1.6	Одинаково ли количество воздушных молниеотводов в отношении крайних 15 % длины лопасти?		
1.7	Находится ли отклонение положения молниеотводов, измеренное от концевой части лопасти в пределах 10 % в отношении крайних 15 % длины лопасти?		
1.8	Одинаково ли согласование изоляции в отношении изоляции вертикальных молниеотводов (толщина изоляции не отличается более чем на 10 %)?		

Окончание таблицы Н.1

Сравнение лопасти 2 с лопастью 1		Да	Нет
1.9	Одинаково ли определение площади лопасти согласно приложению *F.1*?		
2 Материалы			
2.1	Изготовлена ли лопасть 2 из тех же материалов, что и лопасть 1 применительно к основной геометрии конструкции?		
2.2	Одинакова ли связующая система?		
2.3	Является ли одинаковым материал воздушных молниеотводов концевой части (одинаковые материалы металлического основания в сплавах)?		
2.4	Является ли одинаковым материал бокового молниеотвода (одинаковые материалы металлического основания в сплавах)?		
2.5	Сделано ли уравнивание потенциалов между параллельными проводящими частями с той же длиной радиуса относительно общей длины конкретной лопасти ±10 %?		

Определение аэродинамических терминов лопасти показано на рисунке *Н.1*. В случае выявленных изменений, которые могут серьезно повлиять на устойчивость конструкции при ударе молнии, необходимы испытания.

Если на все вопросы дан ответ «Да», СМЗ в двух лопастях может быть объявлена сходной и верификация лопасти 2 может основываться на успешной оценке лопасти 1. Если один или несколько пунктов отклоняются, то следует тщательно оценить отличия для установления наличия функционального сходства.

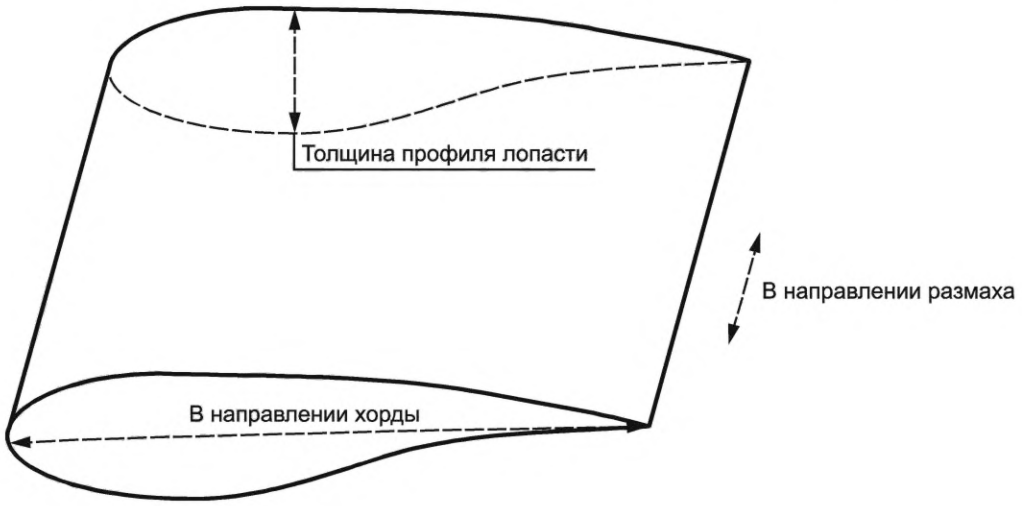


Рисунок *Н.1* — Определение аэродинамических характеристик лопасти

Приложение *I*
(справочное)

Проверка адекватности методов численного анализа, используемых при создании зон молниезащиты

I.1 Общие положения

Адекватность численных методов, использованных при разработке и проверке ЗМЗ ВЭУ, проверяют сравнением полученных результатов с результатами испытаний аналогичных геометрий. Настоящее приложение включает указания, как можно выполнить такую проверку с использованием общих предоставляемых геометрий. Разработчик инженерного анализа на основе аналитического или численного анализа должен документально оформить сравнение с результатами испытаний или полевыми данными, подтверждающие, что вычислительные процедуры адекватны для целей разработки и проверки ЗМЗ ВЭУ.

I.2 Распределение напряжения и тока лопасти

После перехвата удара молнии молниеотводами лопасти ток молнии будет протекать через лопасть по направлению к концевому молниеотводу на комеле к ступице или гондоле. Для лопастей, содержащих проводящие элементы вне ЗМЗ, согласование молниезащиты должно быть выполнено таким образом, чтобы обеспечить либо достаточное изолирование, разделительные расстояния или адекватное уравнивание потенциалов. Для этой цели часто используется численный анализ, и проверку путем сравнения результатов моделирования с результатами испытаний геометрий, воспроизводя подробности конструкции лопасти.

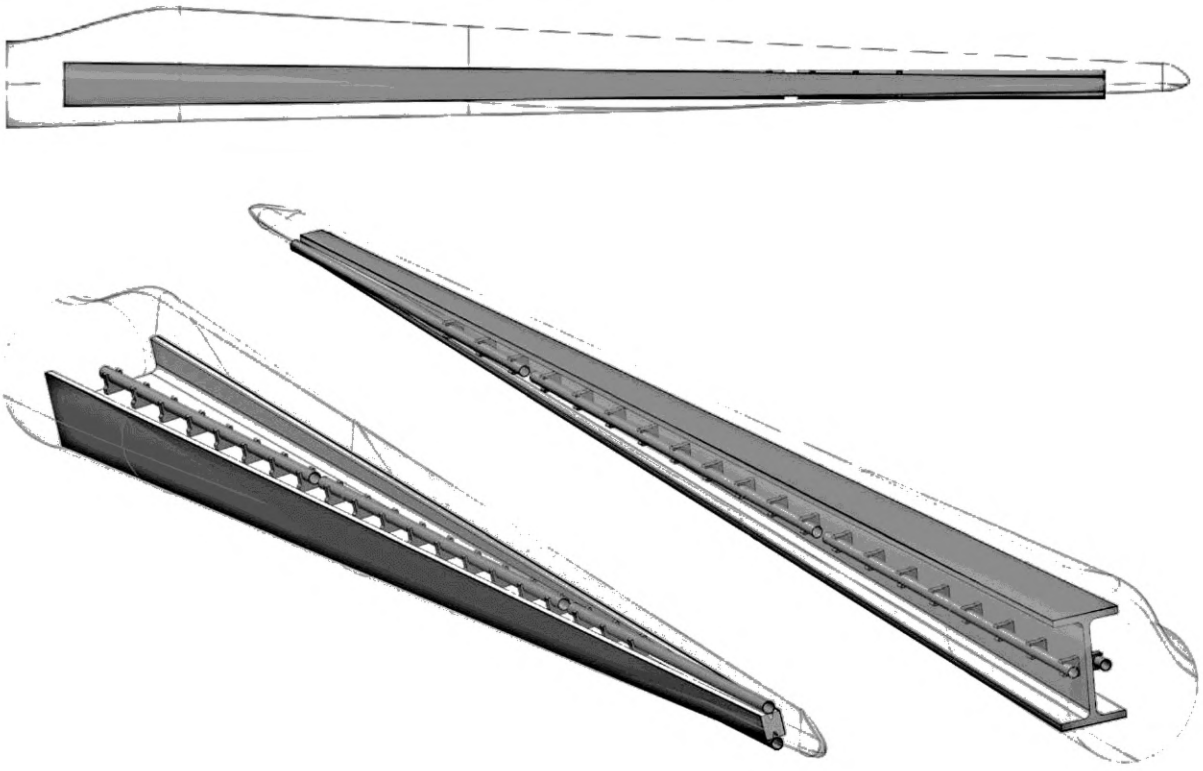


Рисунок *I.1* — Пример геометрии для имитации распределения напряжения и тока в лопасти (покрытие лопасти добавлено для улучшения понимания)

Геометрия на рисунке *I.1* демонстрирует следующее:

- простая уменьшенная по размеру лопасть с балками длиной 5 и 10 м (воспроизводящими индуктивность и сопротивление реальных материалов лопасти),
- вертикальный молниеотвод на одной стороне внутренней перегородки, укороченный с каждого конца,
- сигнальный кабель на другой стороне внутренней перегородки, все укорочено в комеле, и выведено на зажимы полного сопротивления на полпути к выходу.

Последовательность проведения испытания должна отражать весь диапазон времен повышения для естественно возникающих форм кривой тока молнии, а допуски при сравнении имитируемых и измеренных пиковых токов должны быть в пределах ±20 %. Эти испытания могут проводиться согласно С.3.3.

***I.3* Анализ косвенных влияний**

Для тока молнии, протекающего в ступице, гондоле или башне, будет полезно оценить косвенные влияния на основе анализа или численного моделирования. В этом случае может использоваться следующая геометрия, когда подход предусматривает ввести ток молнии, демонстрируя различные характеристики (пиковый ток, частотное содержание, и т. п.), и сравнить результаты испытаний с имитируемыми значениями. Допускается использовать геометрию, приведенную на рисунке *I.2*.

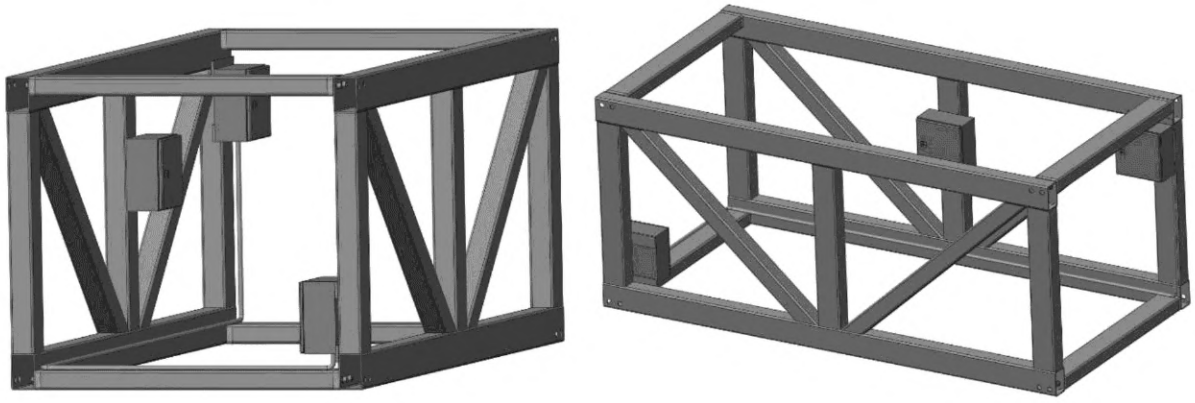


Рисунок *I.2* — Пример геометрии для имитации косвенных влияний на гондолу

Геометрия на рисунке *I.2* демонстрирует следующее:

- упрощенная конструкция гондолы (3 × 1,5 × 1,5 м), которая определена в стандартных стальных профилях, двусторонние рамы, сваренные вместе, и четыре балки, соединяющие две рамы;
- две панели смонтированы на конструкции, а кабелепровод протянут между двумя панелями;
- внутри кабелепровода можно проложить сигнальный кабель, с выводом на заземление с одного конца, и между концами полного сопротивления на другом;
- подать ток и измерить значение тока в различных путях, а также напряжение между концами штырьков сигнальных кабелей.

Последовательность проведения испытаний должна отражать весь диапазон времени повышения для естественно возникающих форм кривой тока молнии, а допуски при сравнении имитируемых и измеренных пиковых токов должны быть в пределах ±20 %. Эти испытания могут проводиться согласно *С.3.3.*

Приложение *J*
(справочное)

Испытание вращающихся элементов

J.1 Общие положения

Испытание применяют к подшипникам лопастей ветроколеса ВЭУ. Основной целью испытания является определение способности подшипника проводить ток.

Требования к испытаниям, в частности, к испытуемым образцам и испытательной схемы, различаются для подшипников, которые могут считаться неподвижными или квазистационарными в случае удара молнии, например подшипник осевого шарнира, и подшипников, которые могут считаться вращающимися также и в случае удара молнии, такие как основные подшипники.

Испытание не вращающегося и не несущего нагрузку подшипника может представлять наихудший сценарий, который используют, если изготовитель не предоставляет дополнительной информации.

J.2 Образцы для испытаний

J.2.1 Образцы для испытаний неподвижных/квазистационарных подшипников

Испытания проводят с полномасштабными образцами подшипников, которые установлены в серийных ВЭУ.

J.2.2 Образцы для испытаний вращающихся подшипников

Испытания проводят как с полномасштабными образцами подшипников, которые установлены в серийных ВЭУ, так и с замещающими образцами.

Подшипник должен быть указан изготовителем ВЭУ. Если испытания проводят с замещающими образцами, должны быть предоставлены вычисления для демонстрации коэффициентов масштабирования и влияний. В протоколе испытаний должны быть определены обоснования для масштабированных параметров.

J.3 Испытательная схема

J.3.1 Испытательная схема для испытаний неподвижных/квазистационарных подшипников

В ходе испытаний подшипник должен лежать на изолирующем материале, как это показано на рисунке *J.1* (плоскость основания направлена к полу). Ток удара молнии должен подаваться на кольцо подшипника, соединенного с лопастью. Другое кольцо должно быть заземлено на генератор.

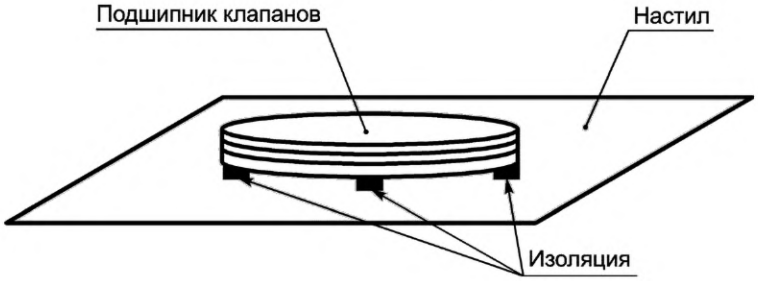


Рисунок *J.1* — Пример испытательной схемы для подшипника осевого шарнира

Подачу испытательного тока осуществляют по крайней мере в одной точке ввода, см. рисунок *J.2*. Точку(и) ввода определяют в зависимости от того, как подшипник подсоединен к СМЗ ВЭУ. Параметры узлов подвода тока должны соответствовать току короткого удара, а также току длительного удара.

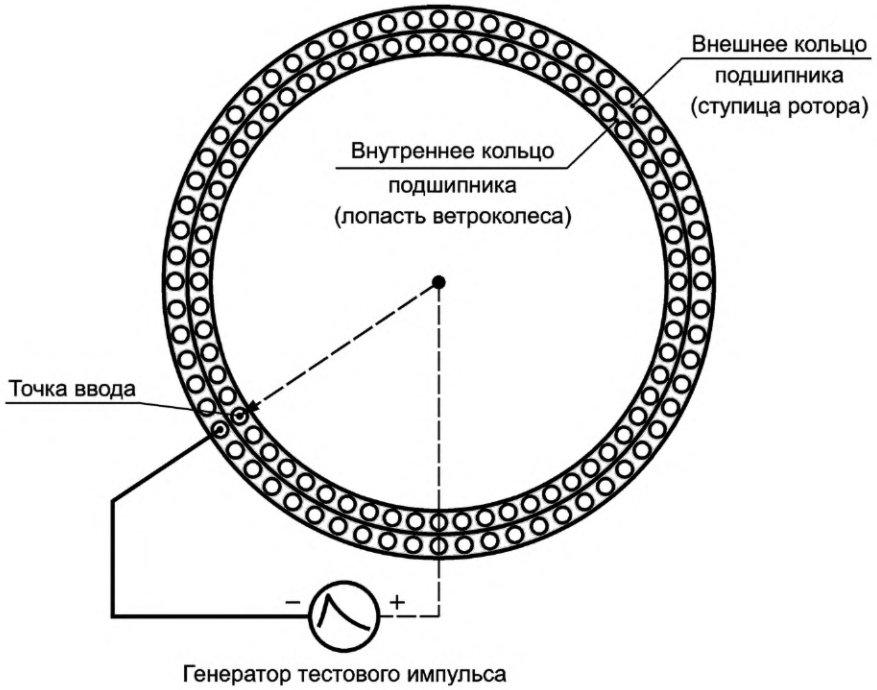


Рисунок *J.2* — Пример ввода испытательного тока в подшипник осевого шарнира

J.3.2 **Испытательная схема для испытаний вращающихся подшипников**

Испытательный генератор должен быть подсоединен к валу ветроколеса (точная копия), а секция корпуса подшипника ветроколеса там, где она указана, подсоединяется к заземлению генератора (см. рисунок *J.3*). Схема заключительного испытания должна быть указана подробно изготовителем. Все точки ввода должны быть в состоянии проводить полный ток молнии.

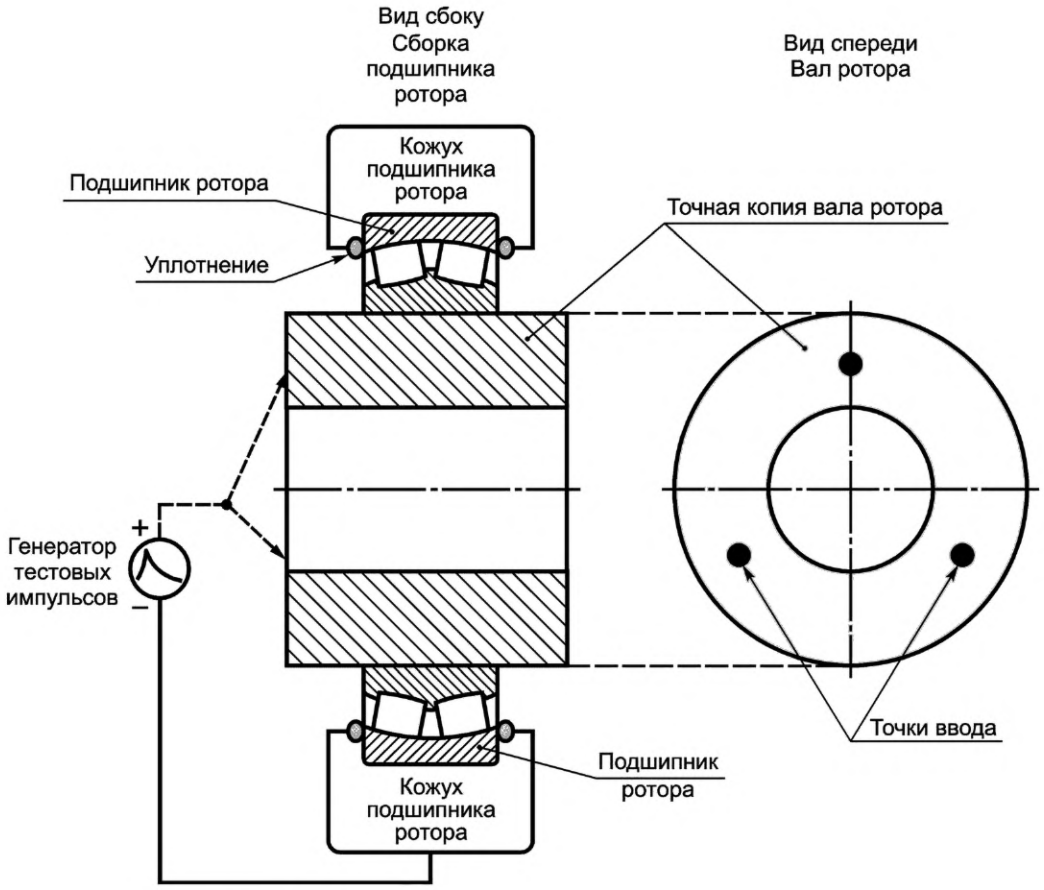


Рисунок *J.3* — Пример схемы испытаний основного подшипника

***J.4* Проведение испытаний**

Испытание вращающихся элементов следует выполнять с соблюдением общих правил испытаний на проводимый ток согласно *C.3.3*. Для испытания вращающихся элементов применяют следующие дополнительные правила.

В испытании подшипника изменения угла наклона необходимо использовать параметры УМЗ, выбранной на основе анализа риска или объявленной изготовителем, и использовать не менее трех импульсов молнии.

Испытания следует проводить с первым коротким ударом и длительным ударом в комбинированном импульсе или также в отдельных импульсах. Для отдельных импульсов испытание длительной токовой нагрузкой следует выполнять после каждого импульса первого короткого удара. После испытания коротким и длительным током подшипник должен быть испытан на низкое полное сопротивление между внутренним и внешним кольцом подшипника за счет использования измерительного тока 10 А. Последовательное сопротивление испытуемого образца для каждого испытания и после проведения испытания должно регистрироваться.

В таблице *J.1* описывается последовательность испытаний для испытания большим током вращающихся элементов.

В ходе проведения испытаний подшипник не должен вращаться или находиться под нагрузкой, если только изготовителем не указано иное.

Кроме того, рекомендуется выполнить измерение температуры вблизи точки ввода тока.

Таблица *J.1* — Последовательность испытаний большим током вращающихся элементов

Номер	Название	Параметр (значение)
1	Измерение последовательного сопротивления	—
2	Первый короткий удар	I_{imp} (10/350 мкс)
3	Длительный удар	I_{long} (0,5 с)
4	Измерение низкого полного сопротивления	—

Окончание таблицы J.1

Номер	Название	Параметр (значение)
5	Первый короткий удар	I_{imp} (10/350 мкс)
6	Длительный удар	I_{long} (0,5 с)
7	Измерение последовательного сопротивления	—
8	Первый короткий удар	I_{imp} (10/350 мкс)
9	Длительный удар	I_{long} (0,5 с)
10	Измерение последовательного сопротивления	—

J.5 Заключительные испытания и оценка результатов испытаний

После испытания импульса согласно *J.3* проводят визуальный осмотр подшипника и осуществляют измерение последовательного сопротивления испытуемого образца между внутренним и внешним кольцом подшипника (см. рисунок *J.4*). Для измерения следует использовать источник тока с минимальным током 10 А.

Заключительная оценка испытания подшипника должна быть сделана изготовителем подшипника, и она должна включать оценку оставшегося эксплуатационного ресурса подшипника после испытания.

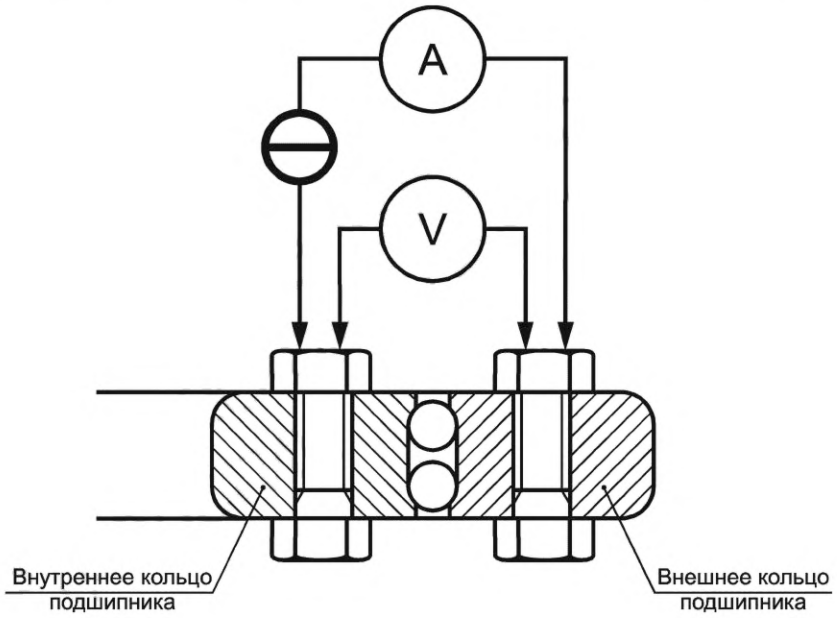


Рисунок *J.4* — Пример измерения последовательного сопротивления испытуемого образца

Приложение *К*
(справочное)

Уменьшение влияния магнитных полей, возникающих при ударе молнии

К.1 Проводящие соединения СМЗ

Из-за неустойчивой природы тока молнии падение пикового напряжения в молниеотводе может быть выражено как

$$U = L\frac{di}{dt}, \qquad (K.1)$$

где L — индуктивность молниеотвода, Гн/м;

di/dt — максимальная скорость изменения тока молнии, А/с.

Индуктивность молниеотвода, как правило, можно считать на уровне 1 мкГн/м, максимальная величина di/dt может изменяться от 0,2 до 200 кА/мкс в зависимости от удара молнии и уровня тока между отдельными молниеотводами. Таким образом, вдоль проводящих соединительных перемычек СМЗ разность потенциалов может достигать 200 кВ/м и вызвать повреждение компонентов ВЭУ.

Например на схеме, показанной на рисунке *К.1*, два блока управления внутри гондолы ВЭУ находятся на разных металлических плоскостях, которые соединены между собой металлической перемычкой. Когда ток молнии проходит соединительную перемычку, потенциал блока 1 повышается по отношению к потенциалу блока 2. Такое изменение потенциала может привести к повреждению обоих блоков. Ситуацию можно улучшить хорошим соединением, надлежащей прокладкой кабелей и/или защитой УЗИП с сигнальным проводом или использованием экранированного сигнального кабеля с защитным экраном, присоединенным на обоих концах к СМЗ.

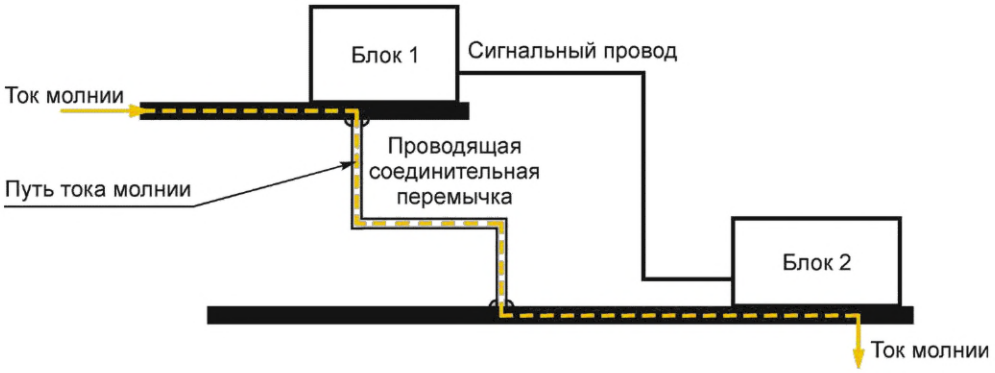


Рисунок *К.1* — Два блока управления, находящиеся на разных металлических плоскостях внутри гондолы ВЭУ

Использование множества соединительных перемычек минимально возможной длины, когда перемычки и места их присоединения к металлическим плоскостям обладают максимальной прочностью и проводимостью, обеспечивает самую низкую из возможных разность потенциалов между двумя металлическими плоскостями.

Поэтому СМЗ внутри ВЭУ должна включать множество молниеотводов, которые:

- способны выдержать прогнозируемую предельную часть протекающего через них тока молнии;
- по возможности являются короткими и прямыми.

Электропроводка ВЭУ также может быть защищена прокладкой проводов в кабельных каналах/кабелепроводах или использованием экранированного кабеля, как описано в *[13]*.

К.2 Экранирование

Когда токи молнии проходят через ВЭУ, образуются большие магнитные поля. Если такие изменяющиеся магнитные поля проходят через контур, они индуцируют в них напряжение. На схеме на рисунке *К.2* показан замкнутый контур проводников, находящийся рядом с токоведущим молниеотводом. Величина напряжения $U_{нав}$, наведенного в замкнутом контуре, пропорциональна скорости изменения магнитного поля и площади контура. При проектировании ВЭУ и ее СМЗ необходимо учитывать величину возможных предельных наводимых напряжений и убедиться, что подобные напряжения не превышают допустимый уровень кабельной сети и подключенного оборудования.

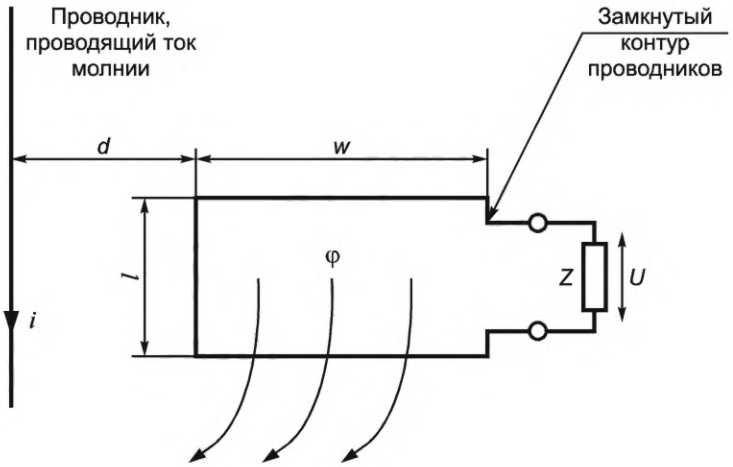


Рисунок *К.2* — Механизм магнитного взаимодействия

Значение напряжения $U_{нав}$ определяют по формуле

$$U_{нав} = -\frac{d\varphi}{dt}, \qquad (К.2)$$

где φ — поток, проходящий через контур, Вб.

Общий поток, проходящий через контур, равен:

$$\varphi = \frac{\mu_0 l \cdot i}{2\pi}\left[\ln\left(\frac{d+w}{d}\right)\right]. \qquad (К.3)$$

Таким образом, напряжение, наведенное в замкнутом контуре, равно:

$$U_{нав} = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\ln\left(\frac{d+w}{d}\right)\cdot\frac{di}{dt} = L\cdot\frac{di}{dt}, \qquad (К.4)$$

где μ_0 — проницаемость воздуха;

L — коэффициент взаимной индукции между контуром и токоведущим проводником, Гн/м;

другие параметры в формуле (*К.4*) — см. рисунок *К.2*.

Ток, наведенный в контуре, равен:

$$I_к = \frac{\int u dt}{L_к}, \qquad (К.5)$$

где $L_к$ — коэффициент самоиндукции контура;

u — напряжение разомкнутого контура.

Примечание — Подробно вопросы молниезащиты и наведенного напряжения рассмотрены в *ГОСТ Р МЭК 62305-4*.

Для снижения опасности повреждений из-за больших значений напряжения U необходимо обеспечить уменьшение пикового изменения магнитного поля, проходящего через контур и уменьшение площади контура. Это может быть достигнуто следующими способами:

- увеличением расстояния между молниеотводом и электрическим контуром. Этот способ, как правило, не приемлем для ВЭУ. Однако если предпочтительный путь тока молнии может быть установлен, например, внутри гондолы, то можно пересмотреть расположение проводки ВЭУ;
- использованием кабеля типа «витая пара». Использование такого кабеля уменьшает уровень наведенного напряжения за счет эффективного уменьшения площади, через которую проходит магнитное поле, до нуля. Системы «витая пара», таким образом, уменьшат напряжение дифференциального вида, однако по-прежнему могут сохраняться фазные напряжения;
- экранирование. Хорошо подходит способ прокладки проводки внутри стальных труб или металлических кабельных каналах, так как очень эффективно экранирует кабели от магнитных полей. Такой же эффект для молниеотводов, находящихся за экранами, обеспечивает использование экранированных кабелей. Важно отметить,

что такая защита возможна только тогда, когда оба конца экрана/трубы/кабельного канала должным образом соединены с СМЗ. Если только один конец молниеотвода соединен с СМЗ, то защита от индуктивной/магнитной связи не возможна.

Защитный экран должен быть правильно присоединен (360° соединение с корпусом оборудования) на обоих концах.

Если экранированные кабели длинные или импульсы тока больше расчетных, следует проверить, что наведенное напряжение между защитным экраном и проводником будет не больше допустимого. Если оборудование, соединенное с кабелем, не может выдержать такие высокие импульсы напряжения, экранирование должно совмещаться с УЗИП. Это можно сделать в точке между основанием башни и гондолой.

Ток молнии будет идти в защитном экране экранированного кабеля и наводить напряжение между проводниками и защитным экраном. Величину такого напряжения можно вычислить по полному переходному сопротивлению.

Если сигнал в экранированных кабелях слишком чувствителен, то может возникнуть необходимость защитить проводники с помощью УЗИП.

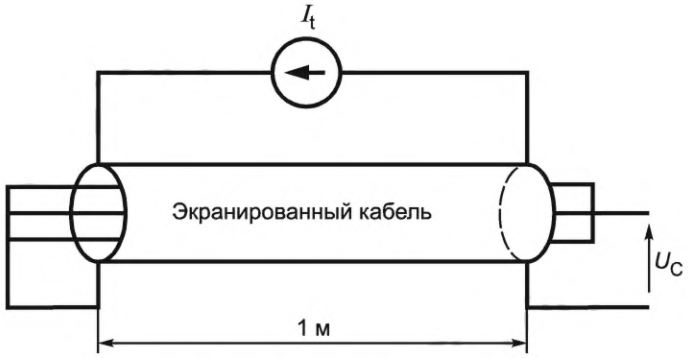


Рисунок *К.3* — Схема измерения полного переходного сопротивления экранированного кабеля

Полное переходное сопротивление можно определить с учетом *[32]*: ток I_t подают на защитный экран, известна длина кабеля, проводник и защитный экран короткозамкнуты на одном из концов кабеля, а напряжение U_C измеряют на другом конце кабеля (см. рисунок *К.3*).

Зная величину испытательного тока I_t и напряжения U_C, полное переходное сопротивление можно вычислить следующим образом:

$$Z_T = -\frac{U_C}{I_t}. \qquad (К.6)$$

Это затем можно использовать для вычисления напряжения между защитным экраном и проводником следующим образом:

$$U_C = l \cdot I_t \cdot Z_T, \qquad (К.7)$$

где U_C — напряжение между защитным экраном и проводниками, В;

l — длина кабеля, м;

I_t — ток в защитном экране, А;

Z_T — полное переходное сопротивление, Ом.

Когда кабель проложен, перепад напряжения будет разделен между согласующими полными сопротивлениями на двух концах кабеля. По приблизительной оценке, рассчитанное напряжение будет разделено пополам между двумя концами кабеля.

В случае если экранированные силовые кабели имеют соединения с малым сопротивлением между фазовыми проводниками и экраном/землей, ток молнии будет распределяться между защитным экраном и фазовыми проводниками. Таким соединением с низким полным сопротивлением может быть УЗИП для защиты от перенапряжений между фазовыми проводниками и защитным экраном/землей на концах кабеля. Такую ситуацию необходимо рассматривать, например, для силового кабеля, соединяющего ВЭУ с сетью.

В *ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010, приложение D*, даны указания по оценке тока повреждения для экранированных кабелей (т. е. уровня тока молнии, проходящего в защитном экране кабеля, который приведет к отказу из-за электрического пробоя изоляции кабеля).

Приложение *L*
(справочное)

Выбор и монтаж УЗИП

L.1 Размещение УЗИП

Выбор и монтаж УЗИП осуществляют в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 62305-4*, а также *ГОСТ IEC 61643-12*, *ГОСТ Р МЭК 62305-4* устанавливает ограничения кабельного расстояния там, где УЗИП обеспечивают защиту за счет колебательного явления и емкостных эффектов. *ГОСТ IEC 61643-12* включает некоторые дополнительные примеры дополнительной защиты, например когда:

- имеется очень чувствительное оборудование;
- расстояние между УЗИП, расположенным на входе в ЗМЗ и оборудованием, подлежащим защите слишком большое;
- электромагнитные поля внутри конструкции создаются внутренними источниками.

Описание колебательного явления дано в *ГОСТ Р МЭК 62305-4—2016, пункт D.3.3*. Расстояние защиты от колебаний является максимальной длиной цепи между УЗИП и оборудованием, для которого защита УЗИП по-прежнему остается адекватной, с учетом колебательного явления и емкостной нагрузки. Колебательные явления можно не учитывать, если длина цепи между УЗИП и оборудованием меньше 10 м или если уровень эффективной защиты равен 50 % уровня максимально допустимого импульсного напряжения оборудования, находящегося ниже по потоку.

Описание емкостных эффектов дано в *ГОСТ Р МЭК 62305-4—2016, пункт D.3.3*. Дальность действия индуктивной защиты — это максимальная длина по цепи между УЗИП и оборудованием, на которой УЗИП по-прежнему действует с учетом индуктивного (емкостного) воздействия. Индуктивное воздействие можно минимизировать пространственным и линейным экранированием (см. также приложение *K*).

Из-за перенапряжений, возникающих, например, при срабатывании выключателей и предохранителей в электрических системах ВЭУ или электрической системе, к которой подключена ВЭУ, может возникнуть необходимость в дополнительных УЗИП внутри ЗМЗ (см. *L.7*).

L.2 Выбор УЗИП

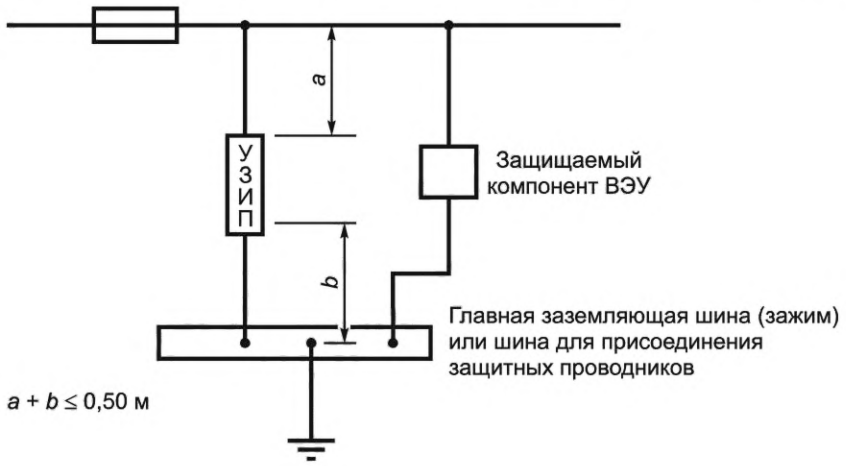
В большинстве случаев УЗИП можно подобрать по спецификации УЗИП или информации об изделии.

L.3 Монтаж УЗИП

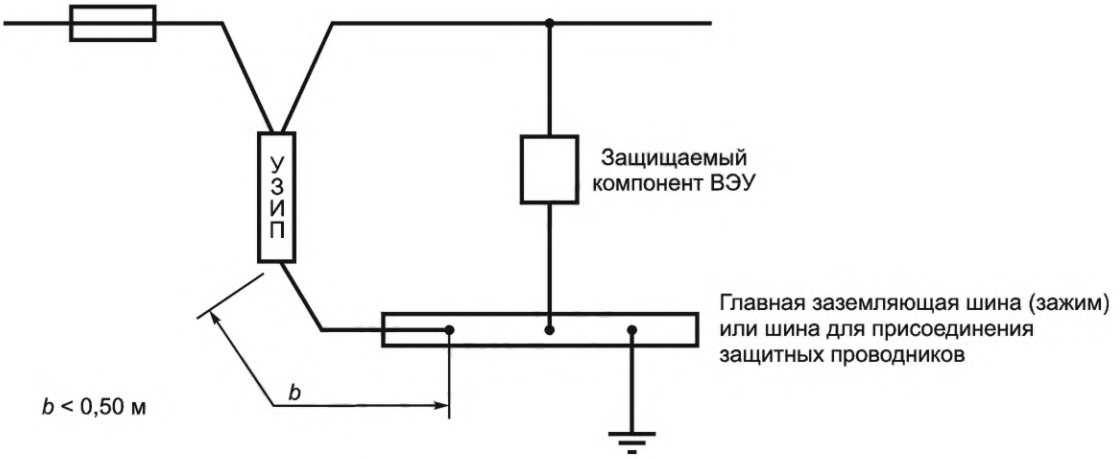
Для достижения наилучшей защиты от перенапряжений общая длина соединительного проводника УЗИП должна быть как можно меньше.

При монтаже УЗИП в ВЭУ:

- рекомендуется, чтобы полная длина соединительных проводников УЗИП не превышала 0,5 м, и они не имели каких-либо контуров. Пример схемы такого соединения показан на рисунке *L.1a*;
- схема установки УЗИП должна соответствовать рисунку *L.1b*, если полная длина соединительных проводников УЗИП (сумма расстояний *a* и *b* на рисунке *L.1a*) более 0,5 м;
- заземляющие соединения, показанные на рисунках 5 и 6, должны соответствовать рисунку *L.2*.

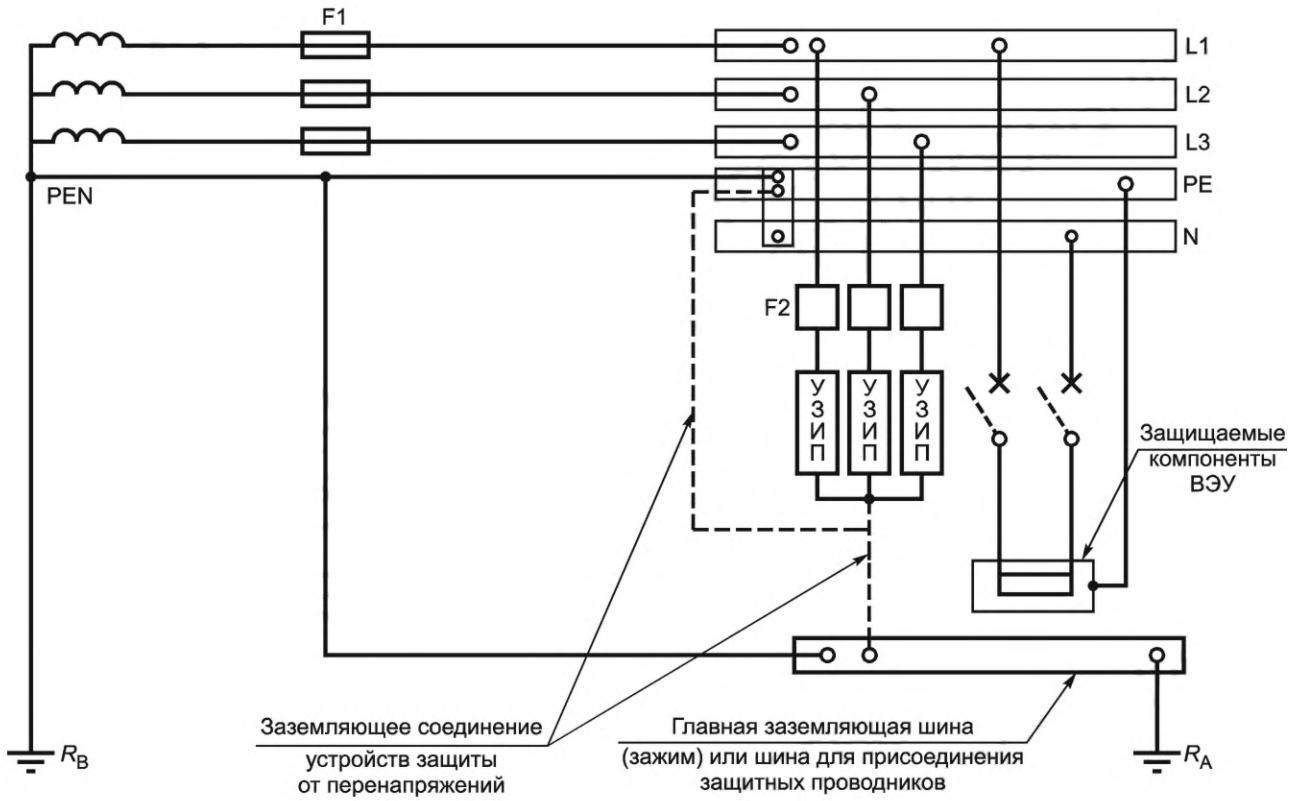


a — схема монтажа УЗИП, когда полная длина соединительных проводников не превышает 0,5 м
(по *ГОСТ Р 50571.5.53—2013, рисунок 53D*)



b — схема монтажа УЗИП, когда полная длина соединительных проводников более 0,5 м (по *ГОСТ Р 50571.5.53—2013, рисунок 53E*)

Рисунок *L.1* — Схемы монтажа УЗИП при разной полной длине соединительных проводников



F1 — защитное устройство на входе электроустановки; F2 — защитное устройство, устанавливаемое по требованию производителя УЗИП; R_A — заземляющий электрод (заземляющее сопротивление) электроустановки; R_B — заземляющий электрод (заземляющее сопротивление) системы электроснабжения

Рисунок *L.2* — Схема монтажа заземляющего соединения (по *ГОСТ Р 50571.5.53—2013, рисунок А.1*)

L.4 Воздействие внешней среды на УЗИП

В *ГОСТ IEC 61643-11* указаны следующие параметры:

- температура хранения и эксплуатации от минус 5 °С до плюс 40 °С (нормальный диапазон) и минус 40 °С до плюс 70 °С (расширенный диапазон);
- относительная влажность при внутренних условиях должна быть от 30 % до 90 %.

Требования по вибрации в *ГОСТ IEC 61643-11* не включены.

Если фактическое воздействие окружающей среды на установленное на ВЭУ УЗИП превышает значения, указанные в *ГОСТ IEC 61643-11*, то необходимо применить соответствующие методы испытаний и значения воздействий, приведенных в стандартах серии *[33]*. Производитель ВЭУ должен указать требования к конкретным точкам монтажа, например на гондоле и ступице.

L.5 Показатель состояния УЗИП и мониторинг при отказе УЗИП

УЗИП могут быть перегружены по причине исключительно большого тока молнии или повторяющегося воздействия. Кроме того, критичные части электрической системы и системы управления ВЭУ могут привести к повышению требований по имеющемуся УЗИП.

В таких случаях, которые определяют производители ВЭУ, УЗИП может обеспечить сочетание бесперебойности снабжения и защиты, как это описано в *ГОСТ Р 50571.5.53*.

При необходимости это может быть обеспечено, например, с помощью:

- системы мониторинга УЗИП;
- устройства сигнализирования и управления внутри УЗИП для предупреждения о наступающем сбое;
- дистанционной сигнализации, которая должна быть включена в общую систему сигнализации и контроля ВЭУ.

L.6 Выбор УЗИП по уровню напряжения защиты (U_P) и устойчивости на уровне системы

При необходимости устойчивость на уровне системы можно проверить с помощью испытания устойчивости на уровне системы. Возможные методы тестирования устойчивости на уровне системы описаны в приложении *M*.

L.7 Выбор УЗИП по перенапряжениям внутри ВЭУ

Перенапряжения, возникающие при включениях в электрических системах ВЭУ или системы энергоснабжения, к которой подключена ВЭУ, необходимо учитывать при выборе и применении мер защиты от перенапряжения для ВЭУ.

Возможны следующие примеры таких перенапряжений, возникающих внутри ВЭУ:

- короткие замыкания сети;
- статические преобразователи (энергия, хранящаяся в случае разъединения);
- повышенные токи емкостного разряда в связи с циклами инвертирующего усилителя мощности;
- переключение нагрузки низковольтным распределительным устройством.

L.8 Выбор УЗИП по току разряда (I_n) и импульсному току (I)

В большинстве случаев ВЭУ устанавливают на открытых участках местности. Более того, с увеличением высоты ВЭУ увеличивается и вероятность попадания молнии. Возможным способом увеличения срока службы УЗИП в случае большого количества попаданий молнии является выбор УЗИП с большими параметрами тока разряда и импульсного тока (см. *ГОСТ Р 50571.5.53—2013, таблица F.1*). Цепи, которые подключены к оборудованию, находящемуся в защищенной зоне ЗМЗ 0_B, могут рассматриваться как особо уязвимые цепи, как описано в 8.5.5.10. Этот вид оборудования классифицируется как оборудование, установленное снаружи согласно *ГОСТ Р МЭК 62305-4—2016, раздел B.12*.

Типичным примером оборудования, устанавливаемого снаружи ВЭУ, являются системы измерения направления и скорости ветра.

В таких случаях рекомендуется, чтобы УЗИП внутри ВЭУ отвечали требованиям таблицы *L.2*.

Таблица *L.1* — Уровни тока разряда и импульсного тока для систем заземления TN, указанные в *ГОСТ Р 50571.5.53*

УЗИП класс I — I_{imp} (10/350)
12,5 кА для каждого режима защиты
УЗИП класс II — I_n (8/20)
5 кА для каждого режима защиты

Таблица *L.2* — Пример увеличенных уровней тока заряда и импульсного тока для систем TN

УЗИП класс I — I_{imp} (10/350)
25 кА для каждого режима защиты
УЗИП класс II — I_n (8/20)
15 кА для каждого режима защиты

Когда для защитных целей используют совместное УЗИП, соответствующее классам I и II, величины I_n и I_{imp} должны соответствовать значениям, приведенным в таблицах *L.1* и *L.2*.

Когда ток молнии идет в землю через конструкцию ВЭУ, он делится между системой заделки заземления, внешними проводящими частями (если таковые имеются) и линиями коммуникаций напрямую или через УЗИП, соединенные с линиями. Уровень тока, отклоненного с помощью отдельного УЗИП, зависит от количества параллельных путей, между которыми делится ток, а также сопротивления отдельных путей. В *ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010, приложение Е*, даны указания по вычислению уровня тока.

Приложение *М*
(справочное)

Методы испытаний на устойчивость на уровне системы

Для испытаний на устойчивость на уровне системы применяют следующие методы:

a) Испытание тока разряда УЗИП в условиях эксплуатации:

1) до испытания на устойчивость на уровне системы:

устойчивость оборудования, которое необходимо защищать (определяется согласно методам, указанным в *ГОСТ IEC 61000-4-5*); защитное действие УЗИП необходимо проверить в соответствии с процедурами испытаний *ГОСТ IEC 61643-11*;

2) при обычной проверке системы оборудование, которое необходимо защитить, тестируется в условиях эксплуатации, т. е. устройство включается и подключается к обычному для него напряжению питания и нагружается током разряда, установленного УЗИП с номинальными параметрами, как это предусмотрено в точке установки УЗИП. Импульсный ток или частичный ток молнии в точке установки УЗИП должны быть проанализированы. При использовании экранированных кабелей ток, вводимый во внутренние проводники, необходимо оценить согласно *К.2*. Если специальный анализ не выполняется, то в отношении низковольтных систем питания должны использоваться параметры тока, приведенные в *L.8*. Значения по умолчанию для контуров данных и сигнальных цепей см. в *ГОСТ Р МЭК 62305-1*. В отношении соответствующих категорий испытаний см. *ГОСТ IEC 61643-22—2022, таблица 2*. Там, где это применимо, необходимо подключить дополнительные цепи, такие как линии связи, датчики, двигатели;

3) на рисунке *М.1* представлен пример цепи испытания тока разряда УЗИП в условиях эксплуатации, включая УЗИП класса II и систему управления углом наклона ВЭУ. На рисунках *М.2 — М.6* даны различные примеры ввода испытательного тока в вариантах экранированных и неэкранированных линий или кабелей;

b) испытания на индукцию из-за тока молнии:

1) импульсные токи необходимо пропустить через определенную металлическую опорную плиту для проверки поведения всей системы в электромагнитном поле, созданном токами молнии;

2) испытуемая система должна быть установлена настолько реалистично, насколько это возможно. Такая смоделированная установка должна включать отдельное оборудование, все установленные УЗИП, реальную длину и тип соединений;

3) необходимо отслеживать импульсные токи, наводимые в результате в кабельной сети всей системы;

4) характеристические и применимые значения первичного тока молнии следует определить на основе *ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010, таблица С.3*;

5) на рисунке *М.7* приведен пример цепи испытания на индукцию, вызванную токами молнии, включая УЗИП класса II для электроснабжения и УЗИП для оборудования контроля системы управления углом наклона ВЭУ;

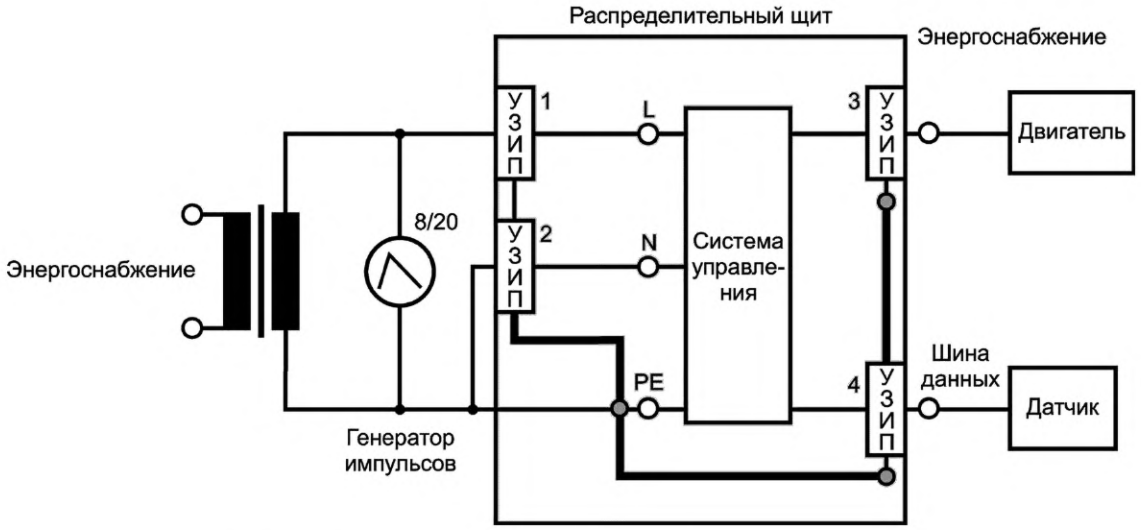
c) рекомендуемая классификация испытаний на устойчивость на уровне системы (согласно *ГОСТ IEC 61000-4-5*):

1) нормальная работа в пределах, установленных производителем;

2) временная потеря функции или ухудшение рабочих характеристик, которые прекращаются после прекращения нарушения и после которого испытуемое оборудование возвращается к нормальной работе без вмешательства оператора;

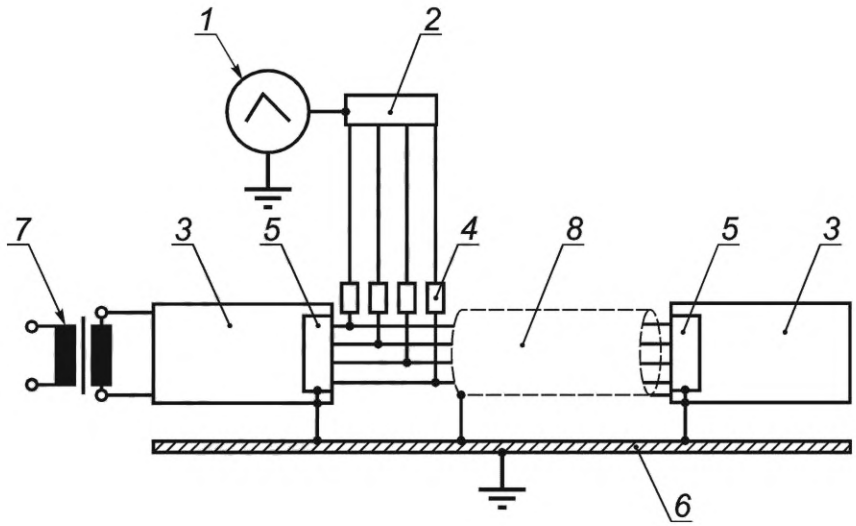
3) временная потеря функции или ухудшение рабочих характеристик, исправление которых требует вмешательства оператора;

4) потеря функции или ухудшение рабочих характеристик, которые невозможно восстановить из-за повреждения оборудования, программного обеспечения или потери данных.



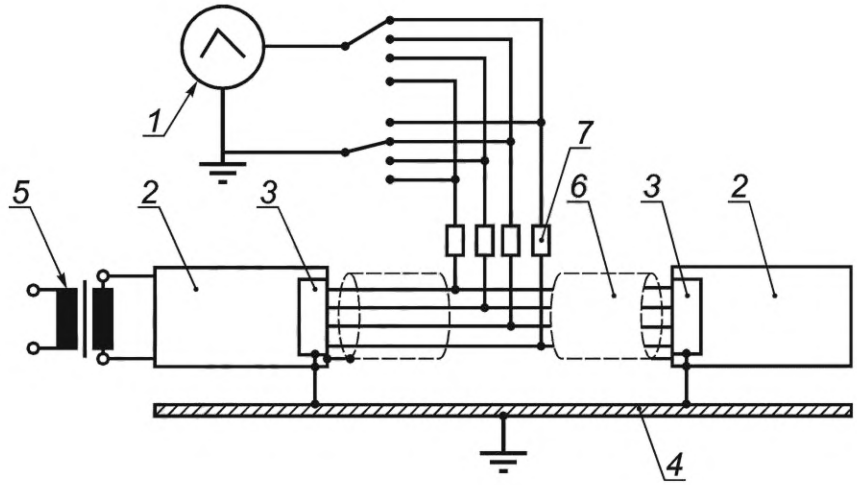
1—3 — УЗИП силовых цепей; *4* — УЗИП цепей связи и сигнализации

Рисунок *М.1* — Пример схемы тока разряда УЗИП в условиях эксплуатации



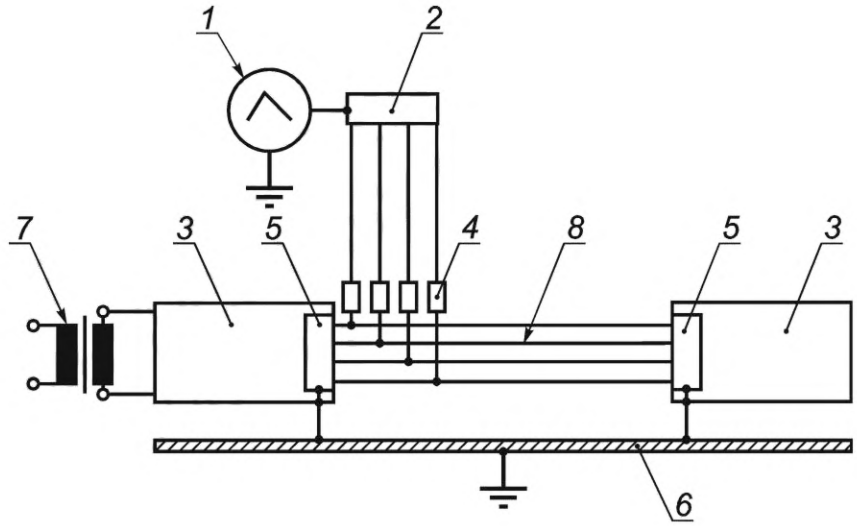
1 — генератор импульсного тока; *2* — балансировочная установка для равномерного распределения импульсного тока (см. *ГОСТ IEC 61643-11—2013, пункт 8.7.1*); *3* — защищаемое оборудование; *4* — блок развязки, например, искровой разрядник, газоразрядная труба; *5* — УЗИП; *6* — заземляющая пластина; *7* — источник питания для номинального напряжения питания; *8* — экранированный кабель

Рисунок *М.2* — Стандартная испытательная схема для экранированных линий/кабелей и подачи испытательного тока в жгут проводников



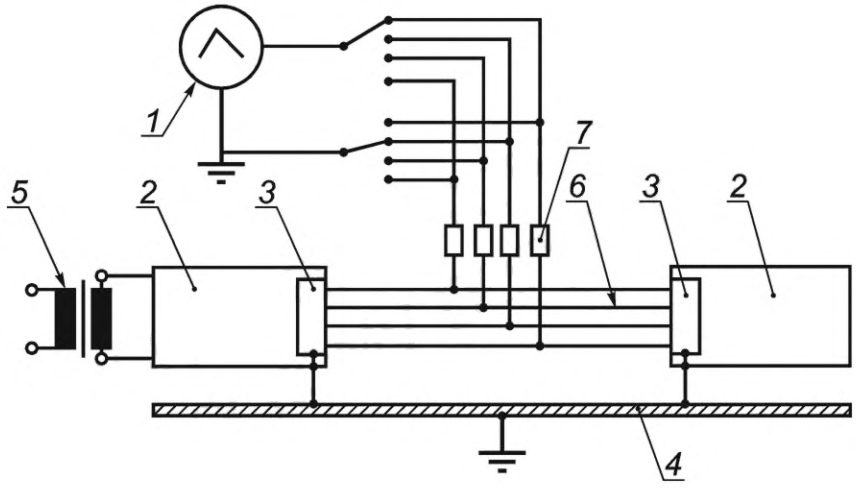
1 — генератор импульсного тока; *2* — защищаемое оборудование; *3* — УЗИП; *4* — заземляющая пластина; *5* — источник питания для номинального напряжения питания; *6* — экранированный кабель; *7* — блок развязки, например искровой разрядник, газоразрядная труба

Рисунок *М.3* — Стандартная испытательная схема для экранированных линий/кабелей и подачи испытательного тока в одиночный проводник



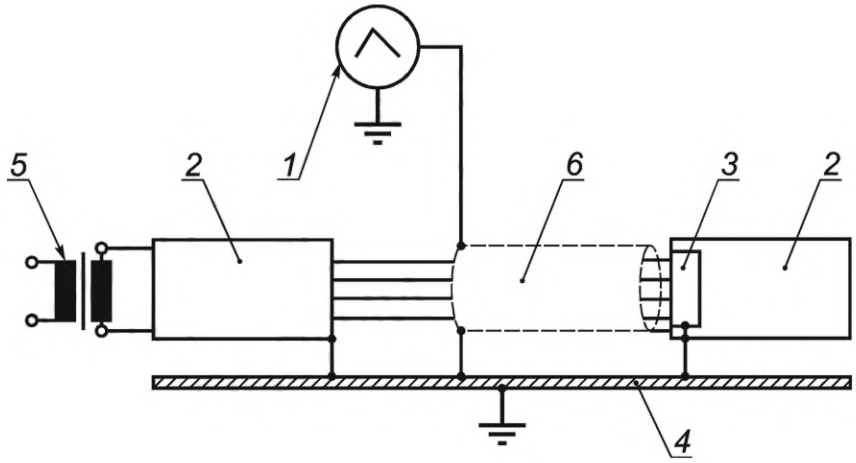
1 — генератор импульсного тока; *2* — балансировочная установка для равномерного распределения импульсного тока (см. *ГОСТ IEC 61643-11—2013, пункт 8.7.1*); *3* — защищаемое оборудование; *4* — блок развязки, например искровой разрядник, газоразрядная труба; *5* — УЗИП; *6* — заземляющая пластина; *7* — источник питания для номинального напряжения питания; *8* — неэкранированный кабель

Рисунок *М.4* — Стандартная испытательная схема для неэкранированных линий/кабелей и подачи испытательного тока в жгут проводников



1 — генератор импульсного тока; *2* — защищаемое оборудование; *3* — УЗИП; *4* — заземляющая пластина; *5* — источник питания для номинального напряжения питания; *6* — неэкранированный кабель; *7* — блок развязки, например искровой разрядник, газоразрядная труба

Рисунок *М.5* — Стандартная испытательная схема для неэкранированных линий/кабелей и подачи испытательного тока в одиночный проводник



1 — генератор импульсного тока; *2* — защищаемое оборудование; *3* — УЗИП; *4* — заземляющая пластина; *5* — источник питания для номинального напряжения питания; *6* — экранированный кабель

Рисунок *М.6* — Стандартная испытательная схема для экранированных линий/кабелей и подачи испытательного тока в защитный экран

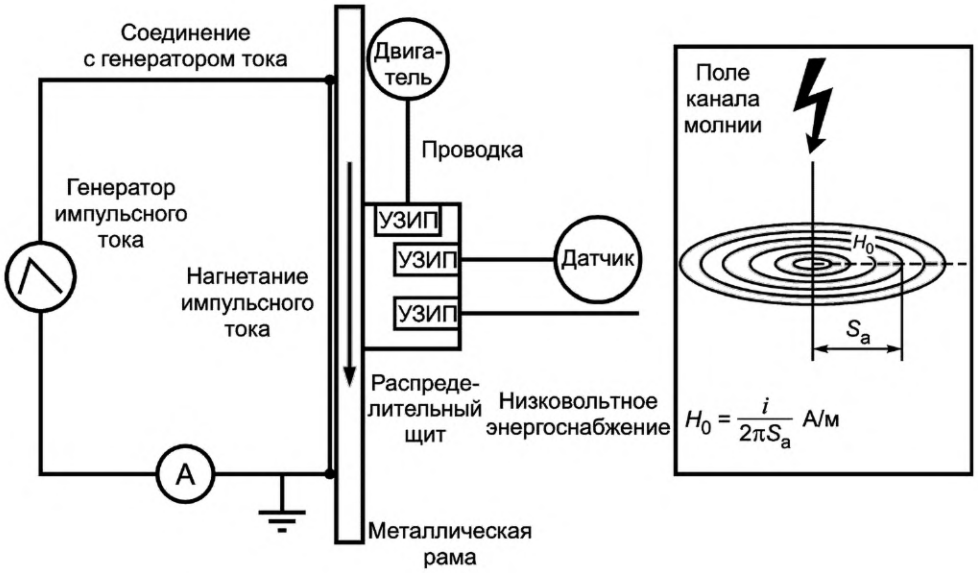


Рисунок *М.7* — Пример цепи для испытаний на индукцию, вызванную током молнии

Приложение *N*
(справочное)

Системы заземления ВЭС

Каждая ВЭУ должна иметь собственную систему заземления. Системы заземления отдельных ВЭУ и высоковольтная подстанция предпочтительно должны быть соединены с горизонтальными заземляющими молниеотводами с целью создания общей системы заземления ВЭС. Это особенно эффективно в случае, когда трудно получить хорошее сопротивление заземления для отдельных ВЭУ.

Соединения между системами заземления ВЭУ должны выполняться с помощью заземляющих электродов, проложенных по путям токоприемных кабелей, соединяющих ВЭУ.

Система заземления ВЭС очень важна для защиты электрических систем, поскольку система заземления с низким полным сопротивлением снижает разность потенциалов между различными объектами ВЭС и таким образом снижает интерференцию, введенную в электрические системы.

Чтобы снизить вероятность попадания прямых ударов молнии в кабельные трассы в земле, а также снизить наведенные эффекты молнии на кабели, рекомендуется устанавливать заземляющие проводники или, в случае более широких кабельных трасс, ряд заземляющих проводников над кабельными трассами.

Приложение *О*
(справочное)

Система заземления ВЭУ

О.1 Общие положения

О.1.1 Виды систем заземления

Большие ВЭУ всегда имеют обширную конструкцию основания, содержащую большое количество стальных деталей больших размеров. Сталь в конструкции основания в основном должна использоваться для заземления в качестве системы заземления основания для достижения самого низкого сопротивления заземления.

В случае, если проектировщик СМЗ решает установить отдельную систему заземления с заземляющим электродом, то по-прежнему необходимо обеспечить надлежащее соединение со стальными элементам основания, так как сложно будет оградить стальные элементы основания от попадания в них тока молнии, а разность электрических потенциалов между отдельной системой заземления и стальными элементами основания может быть опасна, например, для бетона, покрывающего стальную арматуру основания.

Разработчик и монтажник СМЗ должны выбрать подходящие виды заземляющих электродов. Разработчик и монтажник СМЗ должны учесть защиту от опасных скачков напряжения вблизи сетей с заделкой заземления, если они установлены в общедоступных зонах.

Глубоко залегающие заземляющие электроды могут быть эффективны в особых случаях: когда удельное сопротивление земли уменьшается с увеличением глубины и где слои почвы с низким сопротивлением находятся на глубинах больших тех, на которых обычно располагают стержневые электроды.

В случае предварительно напряженного бетона необходимо учесть последовательность прохождения токов разряда молнии, которые могут вызвать нежелательные механические нагружения.

Два основных типа заземляющих электродов приведены в *ГОСТ Р 59789*.

Установка типа А: горизонтальные или вертикальные электроды соединены с не менее чем двумя вертикальными молниеотводами. Тип А может быть использован для небольших сооружений (например, измерительные или служебные ангары, имеющие отношение к ВЭС).

Примечание — Дополнительную информацию по установкам типа А см. в *ГОСТ Р 59789—2021, подпункты 5.4.2.1* и *Е.5.4.2.1.*

Установка типа В: один или более внешних кольцевых проводника или естественных заземляющих электродов, встроенных в конструкцию. Такой тип установки состоит или из внешнего кольцевого заземляющего электрода в контакте с почвой на не менее чем 80 % его общей длины, или из заземляющего электрода фундамента.

Для ВЭУ следует использовать установку электродов по типу В.

Примечание — Дополнительную информацию по установкам типа В см. в *ГОСТ Р 59789—2021, подпункты 5.4.2.2* и *Е.5.4.2.2.*

О.1.2 Строительство

О.1.2.1 Заземляющие электроды фундамента

Заземляющий электрод фундамента состоит из проводников, установленных в фундаменте конструкции ниже уровня земли. Их преимущество заключается в том, что они надлежащим образом защищают от коррозии, если бетон хорошего однородного качества, и покрывают заземляющий электрод фундамента не менее чем на 50 мм.

Металлы, используемые для заземляющих электродов, должны соответствовать материалам, перечисленным в *ГОСТ Р 59789*, с учетом поведения металла относительно коррозии в почве. Определенные методические указания даны в *ГОСТ Р 59789*. Когда нет указаний для конкретного вида почвы, необходимо выяснить практику применения систем с заделкой заземления на других установках, стоящих на почве с похожими свойствами. При заполнении траншей для заземляющих электродов необходимо убедиться, что никакая зольная пыль, куски каменного угля или строительные булыжники не находятся в прямом контакте с заземляющим электродом. При высоком удельном сопротивлении почвы необходимо принять меры для уменьшения сопротивления заземлению. Могут быть использованы электроды с большей площадью поверхности, например, путем использования сетки из проводников в траншеях вместо отдельных электродов или использования проводящего заполняющего материала для улучшения контакта электрода с землей в траншеях и просверленных отверстиях. При использовании улучшающего заземление материала необходимо учитывать коррозию.

Сталь, заделанная в бетон, имеет примерно такой же гальванический потенциал в электрохимическом ряду потенциалов, как медь в почве. Таким образом, когда сталь в бетоне контактирует со сталью в почве, гальваническое напряжение возбуждения величиной примерно в 1 В вызывает прохождение коррозионного тока через почву и влажный бетон и растворение стали в почве.

Следовательно, в местах, где заземляющие электроды в почве соединяются со сталью, заделанной в бетон, должны использоваться проводники из меди или нержавеющей стали.

По периметру конструкции должен быть установлен металлический проводник согласно *ГОСТ Р 59789*, соединяющий башню с металлом основания наиболее коротким путем.

При монтаже необходимо регулярно измерять сопротивление заземления. Дальнейшее заглубление электродов может быть прекращено, как только сопротивление заземления перестанет уменьшаться. Кроме того, можно установить дополнительные электроды в местах, где действие на сопротивление заземления будет лучше. Рекомендуется отслеживать выполняемые измерения для каждого электрода в системе контроля качества.

Заземляющий электрод должен находиться в земле в достаточном удалении от существующих кабелей, металлических труб и т. д., также необходимо сделать должное допущение для заземляющего электрода при его отклонении от предполагаемого местоположения при заглублении. Расстояние разноса зависит от силы электрического импульса и сопротивления земли, а также тока в электроде.

Если существует опасность увеличения сопротивления около поверхности (например, из-за высыхания), должны быть использованы заземляющие электроды глубокого привода большей длины.

Радиальные заземляющие электроды должны быть установлены на глубине 0,5 м и более. Например, в странах с низкой температурой в зимнее время заземляющие электроды не будут находиться в замерзшей почве (которая имеет крайне низкую электропроводность), если увеличить глубину укладки электрода. Для достижения стабильного сопротивления заземления, независимо от сезона, предпочтительнее использовать вертикальные электроды. Более глубоко залегающие заземляющие электроды могут иметь меньшую разность электрических потенциалов на поверхности земли, что является дополнительным преимуществом, уменьшает скачки напряжения и снижает опасность для живых существ на поверхности земли.

О.1.2.2 Тип В — кольцевые заземляющие электроды

Для уменьшения условного сопротивления заземления устройство заземления по типу В, при необходимости, может быть улучшено путем добавления вертикальных или радиальных заземляющих электродов. На рисунке *О.1* представлены требования по минимальной длине заземляющих электродов.

Изоляционное расстояние и глубина расположения заземляющих электродов по типу В являются оптимальными при нормальных условиях почвы для защиты людей, находящихся в непосредственной близости от ВЭУ. В странах с низкими зимними температурами необходимо учесть надлежащую глубину заглубления заземляющих электродов.

В зонах, прилегающих к защищаемой ВЭУ, в которых часто собирается большое количество людей, необходимо обеспечить усиленный контроль потенциала. Большее количество кольцевых заземляющих электродов должно быть установлено на приемлемых расстояниях от первого и последующих кольцевых проводников. Эти кольцевые заземляющие электроды должны быть соединены с первым кольцевым проводником с помощью радиальных проводников.

О.1.2.3 Заземляющие электроды в скалистом грунте

Во время строительства заземляющий электрод фундамента должен быть встроен в бетонное основание.

Даже в скалистом грунте, где заземляющий электрод фундамента обладает меньшим эффектом заземления, он все равно действует в качестве эквипотенциальной плоскости, связывающей ток молнии с землей.

Для радиальных заземляющих электродов, лежащих на или около поверхности земли, может возникнуть необходимость их покрытия камнем или гравием, или бетонирования для обеспечения механической защиты.

Если ВЭУ находится вблизи дороги, кольцевой заземляющий электрод должен, если это возможно, находиться ниже уровня дороги. Однако там, где это невозможно осуществить на всей длине подверженной воздействию дороги, такой эквипотенциальный контроль должен осуществляться, как минимум, вблизи заземляющих электродов.

Для контроля потенциала в некоторых особых случаях необходимо принять решение либо об установке дополнительной части кольца вблизи входа ВЭУ, либо искусственно увеличить сопротивление поверхностного слоя земли (например, с помощью дополнительного слоя гравия).

О.2 Размеры электрода

О.2.1 Тип установки

Установка по типу А состоит из горизонтальных или вертикальных заземляющих электродов, устанавливаемых снаружи защищаемой конструкции и соединяемых с каждым вертикальным молниеотводом. Общее количество заземляющих электродов должно быть не менее двух.

Минимальная длина каждого электрода у основания каждого вертикального молниеотвода составляет:

- l_1 — для горизонтальных электродов или
- $0{,}5l_1$ — для вертикальных (или наклонных) электродов,

где l_1 — минимальная длина горизонтальных электродов, показанных на рисунке *О.1*.

Минимальная длина (l_1) заземляющего электрода зависит от уровня молниезащиты (I—IV) и удельного сопротивления грунта.

Для комбинированных (вертикальных или горизонтальных) электродов необходимо учесть общую длину электродов.

Установленная минимальная длина l_1 может не соблюдаться в случае, если сопротивление заземления системы заземления меньше 10 Ом, измеренное на частоте, отличной от частоты питающей сети (50—60 Гц), и с низким порядком гармонических колебаний.

Для установки типа А в почве с удельным сопротивлением менее 500 Ом минимальная длина для двух горизонтальных электродов составляет 5 или 2,5 м для двух вертикальных электродов.

При удельном сопротивлении почвы выше 500 Ом · м минимальная длина (l_1) увеличивается линейно до 80 м при удельном сопротивлении земли, равном 3000 Ом · м.

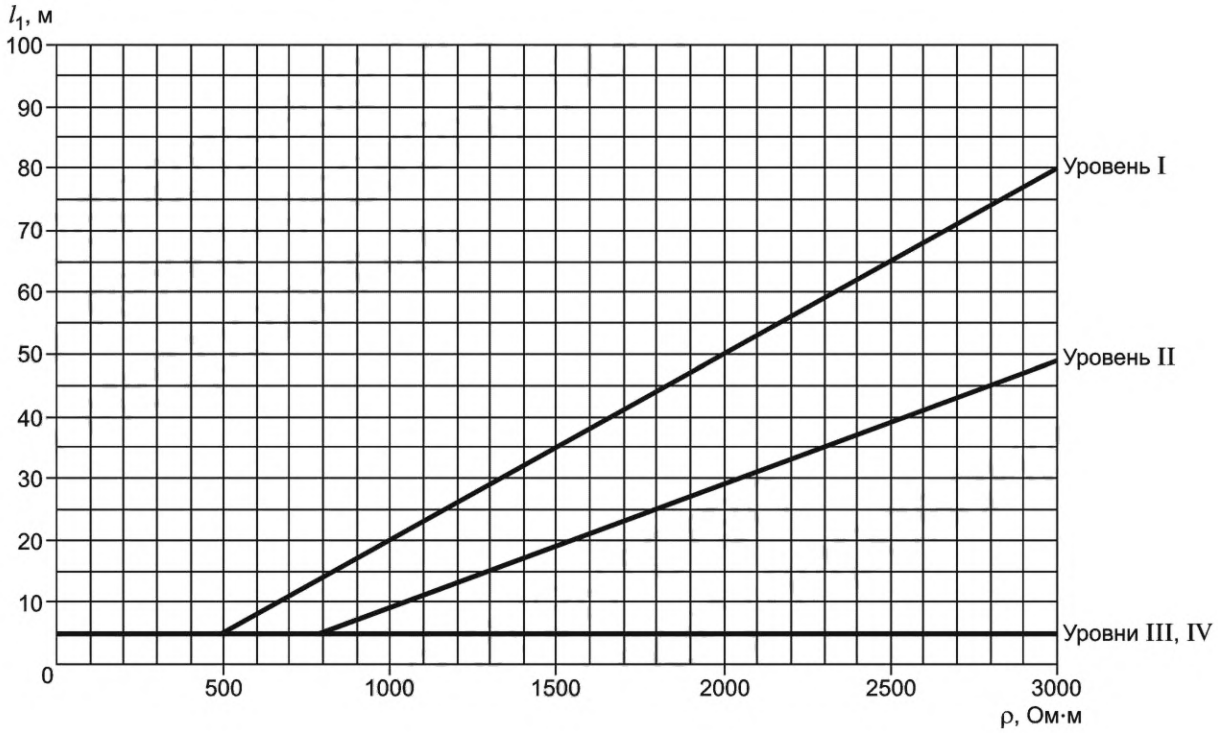


Рисунок *О.1* — Минимальная длина (l_1) каждого заземляющего электрода для разных уровней молниезащиты (см. *ГОСТ Р 59789*)

Из-за высокочастотных компонент тока молнии длина, превышающая 80 м, независимо от удельного сопротивления земли далее не уменьшает полное сопротивление.

Установка типа В состоит либо из кольцевого проводника вне защищаемой конструкции в контакте с почвой на не менее 80 % его общей длины, либо из заземляющего электрода фундамента. Такие заземляющие электроды также могут быть сетчатыми.

Для кольцевого заземляющего электрода (или фундаментного заземляющего электрода) средний радиус (r_e) зоны, окруженной кольцевым заземляющим электродом (или фундаментным заземляющим электродом), не должен быть меньше значения l_1:

$$r_e \geq l_1, \qquad (O.1)$$

где l_1 определяют по графику на рисунке *О.1* для соответствующего уровня молниезащиты.

Когда требуемое значение l_1 превышает подходящее значение r_e, необходимо добавить дополнительный горизонтальный или вертикальный (наклонный) электрод собственной длины l_r (горизонтальный) и l_v (вертикальный), которые определяют по следующим формулам:

$$l_r = l_1 - r_e; \qquad (O.2)$$

$$l_v = (l_1 - r_e)/2. \qquad (O.3)$$

Должно быть не менее двух электродов.

Дополнительные электроды следует подсоединить, по возможности, на равноудаленном расстоянии.

Информация об удельном сопротивлении почвы, предполагаемом блуждающем токе земли и времени освобождения от блуждающего тока земли крайне важна для проектирования конструкции и установки системы заземления.

Удельное сопротивление почвы очень отличается в зависимости от характера почвы.

Пример — Для УМЗ I и ρ = 1500 Ом по рисунку О.1 минимальная длина электрода l1 = 35 м.

Для кольцевого заземляющего электрода с радиусом r_e = 10 м должны быть добавлены два горизонтальных электрода, каждый длиной l_r = 35 м — 10 м = 25 м, или два вертикальных электрода l_v = (35 м − 10 м)/2 = 12,5 м.

***О.2.2* Зависимость частоты от полного сопротивления заземления**

Измерения системы заземления обычно проводят на низкой частоте, а результат получают в виде сопротивления, однако разработчику системы заземления необходимо учитывать, что из-за высокой частоты молнии (до 1 МГц) импульсная характеристика полного сопротивления электрода может быть выше или ниже значения, измеренного на низкой частоте. Характеристики электрода (емкостные, индуктивные или резистивные) зависят от формы электрода, удельного сопротивления земли и точки ввода тока молнии.

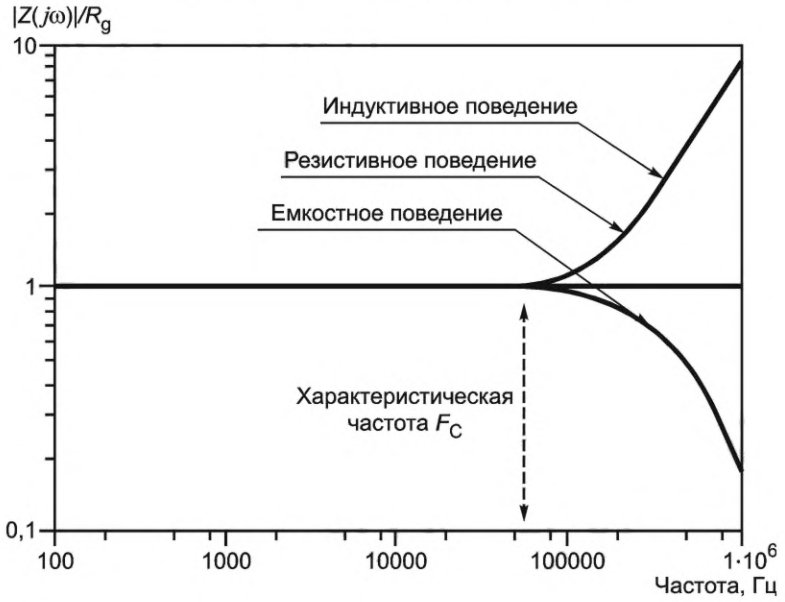


Рисунок *О.2* — Зависимость частоты от полного сопротивления заземления (см. *[34]*)

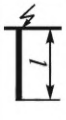
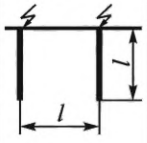
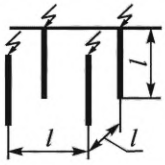
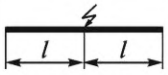
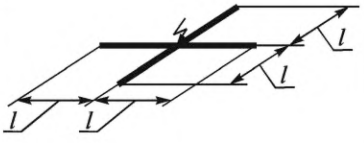
На рисунке *О.2* представлена типичная зависимость от полного сопротивления относительно земли, отношение модуля полного сопротивления $|Z(j\omega)|$ и сопротивления относительно земли переменному току низкой частоты (R_g). Существует два диапазона частот: диапазон низких частот (НЧ) до 50 кГц, при котором полное сопротивление практически постоянно и равно сопротивлению, и диапазон высоких частот (ВЧ) выше 50 кГц, при котором полное сопротивление меняется с частотой и может быть выше или ниже значения измеренного сопротивления. Динамическое поведение заземляющих электродов, подверженных импульсам тока молнии, является важным моментом (т. е. отношение между максимальными значениями напряжения и введенным током).

Резистивное и емкостное поведение более благоприятно, так как высокая частота меньше или равна низкочастотному сопротивлению относительно земли. Обычно емкостное поведение является типичным для систем заземления с сетчатыми электродами, имеющими разветвления для покрытия зоны, в то время как система заземления с несколькими длинными электродами обладает в большинстве случаев индуктивными характеристиками.

Использование множества устройств заземления улучшает импульсную эффективность, как показано в таблице *О.1*. Однако на практике не всегда возможно использование небольших электродов для выполнения требований в стандартах низких значений сопротивления.

Горизонтальные стержни менее эффективны на частоте питающей сети по сравнению с вертикальными стержнями, однако обладают лучшей импульсной эффективностью.

Таблица *О.1* — Импульсная эффективность схем стержневых устройств заземления по сравнению с 12-метровым вертикальным заземляющим стержневым электродом (100 %) (см. *[34]*)

Установка заземляющего стержневого электрода						
Процент	100	95	85	85	80	70

О.3 Формулы для расчета сопротивления заземления для различных конфигураций заземляющих электродов

При создании большинства систем заземления сопротивление заземления для различных конфигураций заземляющих электродов определяют с помощью компьютерных программ, так как это позволяет точно проанализировать взаимодействие между многими элементами, обычно используемыми в таких системах. Некоторые программы способны рассчитать ответную реакцию системы заземления на переходные токи при ударе молнии. Использование компьютерных программ обычно дает наиболее точные результаты. Для случаев, когда специальные компьютерные программы не доступны, можно использовать приведенные в таблицах *О.2* — *О.6* формулы для различных конфигураций и комбинаций простых заземляющих электродов.

Таблица *О.2* — Обозначения, используемые в таблицах *О.3* — *О.6*

Наименование	Единица измерения	Наименование	Единица измерения
Удельное сопротивление почвы ρ	Ом · м	Расстояние между стержнями a_{12}	м
Количество радиальных проводников *n*	—	Глубина заглубления *d*	м
Длина каждого радиального проводника *L*	м	Сопротивление электрода *R*	Ом
Радиус радиального проводника *a*	м	Диаметр кольцевого электрода *D*	м
Расстояние между стержнями *s*	м	*e* = 2,718	—

Таблица *О.3* — Формулы для расчета сопротивления заземления для различных конфигураций заземляющих электродов

Заглубленный прямой горизонтальный электрод

$$R=\frac{\rho}{\pi L}\left(\ln\frac{2L}{\sqrt{2ad}}-1\right) \quad \text{при } d \ll L \qquad (O.4)$$

Два стержневых электрода одинаковой длины, разделенные расстоянием a_{12}

$$R=\frac{\rho}{4\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a}-1+\frac{L}{a_{12}}\right) \quad \text{при } a_{12} \gg L \qquad (O.8)$$

n заглубленных радиальных электродов, расходящихся горизонтально и симметрично из общей точки

$$R=\frac{\rho}{n\pi L}\left(\ln\frac{2L}{\sqrt{2ad}}-1+\sum_{m=1}^{n-1}\ln\frac{1+\sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)}{\sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)}\right) \qquad (O.5)$$

n стержневых электродов одинаковой длины, соединенных изолированным кабелем и расположенных на одинаковом расстоянии по кругу диаметром *D*, значительно меньшим, чем длина стержней

$$R=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{4L}{\sqrt[n]{na\left(\frac{D}{2}\right)^{n-1}}}-1\right) \quad \text{при } D \ll L \qquad (O.9)$$

Вертикальный стержневой электрод

$$R=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a}-1\right) \quad \text{при } L \gg a \qquad (O.6)$$

n стержневых электродов одинаковой длины, расположенных на одинаковом расстоянии по кругу диаметром *D* с интервалом между соседними стержнями, равным или превышающим длину стержня

$$R=\frac{\rho}{2n\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a}-1+\frac{L}{D}\sum_{m=1}^{n-1}\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)}\right). \qquad (O.10)$$

Два стержневых электрода одинаковой длины, разделенные расстоянием a_{12}

$$R=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{4L}{\sqrt{aa_{12}}}-1\right) \quad \text{при } a_{12} \ll L \qquad (O.7)$$

Голый заглубленный кольцевой электрод

$$R=\frac{\rho}{\pi^2 D}\ln\frac{4D}{\sqrt{2ad}}. \qquad (O.11)$$

Примечание — В формулах (*О.4*) и (*О.5*) предполагается, что угол между любыми двумя смежными электродами одинаковый, поэтому в варианте *n* = 2, электроды лежат в противоположных направлениях от общей точки. Все проводники проводят одинаковый ток.

Таблица *О.4* — Формулы для расчета сопротивления заземления для заглубленного кольцевого электрода в сочетании с вертикальными стержневыми электродами

Голый заглубленный кольцевой электрод	R_1 Формула (*О.11*)
n заземляющих стержней равной длины, установленных по кругу диаметром *D*, с интервалом между соседними стержнями равным или превышающим длину стержня	R_2 Формула (*О.10*)
Взаимное сопротивление заземления между кольцевым электродом и *n* заземляющими стержнями, установленными по кругу диаметром *D*	$R_3 = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{2\frac{L}{e} d}}$ (*О.12*)
Общее сопротивление	$R = \frac{R_1 R_2 - R_3^2}{R_1 + R_2 - 2R_3}$ (*О.13*)

Таблица *О.5* — Формулы для расчета сопротивления заземления для заглубленного кольцевого электрода в сочетании с радиальными электродами

Голый заглубленный кольцевой электрод	R_1 Формула (*О.11*)
n заглубленных радиальных электродов, расходящихся горизонтально и симметрично из общей точки	R_2 Формула (*О.5*)
Взаимное сопротивление заземлению между кольцевым электродом и *n* заглубленных радиальных электродов, расходящихся симметрично из общей точки	$R_3 = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{2\frac{L}{e} d}}$ (*О.14*)
Общее сопротивление	$R = \frac{R_1 R_2 - R_3^2}{R_1 + R_2 - 2R_3}$ (*О.15*)

Таблица *О.6* — Формулы для расчета сопротивления заземления для затупленного прямого горизонтального электрода в сочетании с вертикальными стержневыми электродами

Голый заглубленный прямой горизонтальный электрод	R_1 Формула (*О.4*)
Вертикальный стержневой электрод	R_r Формула (*О.6*)
n вертикальных стержневых электродов, соединенных изолированным кабелем	$R_2 = \frac{R_r}{n} + \frac{\rho}{n\pi s} \sum_{m=2}^{n} \frac{1}{m}$ (*О.16*)
Взаимное сопротивление заземления между прямым горизонтальным электродом и *n* вертикальными стержнями	$R_3 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left(\ln \frac{2L_c}{\sqrt{2\frac{L_p}{e} d}} - 1 \right)$ (*О.17*)
Общее сопротивление	$R = \frac{R_1 R_2 - R_3^2}{R_1 + R_2 - 2R_3}$ (*О.18*)

Приложение *Р*
(справочное)

Системы мониторинга

ВЭУ рекомендуется оснастить оборудованием для обнаружения ударов молнии и мониторинга уровней тока таких ударов молнии (системами мониторинга). Назначение таких систем мониторинга заключается:

- в предоставлении оператору информации об уровне ударов молнии, воздействующих на ВЭУ, и участии в режимах эксплуатации и техобслуживания;

- предоставлении важных данных об ожидаемом количестве ударов молнии в высокие ВЭУ и оценке их величины/характеристик, содействие в процессе оценки будущих рисков.

Существуют несколько вариантов систем мониторинга. Ниже приведено краткое описание таких систем.

a) Система обнаружения молнии на обширном пространстве.

Многие коммерческие системы позволяют обнаружить молнию с помощью антенн поиска электромагнитного импульса, производимого разрядом молнии. В таких системах используются многоэлементные антенны для определения местоположения разряда молнии на основе методик определения направления или времени прихода, или интерферометрических методов. Данные, доставляемые такими системами, в основном доступны в режиме реального времени. Для получателя данных от систем обнаружения молнии на обширном пространстве важно знать несколько параметров, которые влияют на работу системы. Характеристики систем обнаружения молнии на обширном пространстве перечислены в таблице *Р.1*.

Таблица *Р.1* — Характеристики систем обнаружения молнии на обширном пространстве

Параметр	Описание
Эффективность обнаружения (*DE*)	*DE* разряда и *DE* удара различаются. Поскольку разряд молнии состоит из одного или нескольких ударов, *DE* разряда (DE_f) обычно выше, чем *DE* удара (DE_s). Следует учитывать, что системы обнаружения молнии обнаруживают удары, а группирование ударов в разряды осуществляется на основе критериев, которые должны быть известны или определены пользователю. *DE* зависит от нескольких параметров, таких как количество имеющихся датчиков, расстояния между датчиками и геометрия положений датчиков вокруг интересующей точки; работа датчиков (например, уровень помех на каждой площадке/датчике, доступность и т. п.); необходимое количество датчиков, используемое для обнаружения; а также несколько других параметров. Относительное *DE* сети может быть получено путем анализа распределения тока в интересующей точке и в эталонном местоположении (например, центре сети)
Точность местонахождения	Точность местонахождения таких систем может быть ограничена от нескольких сот метров до нескольких километров. Точность местонахождения для отдельных ударов зависит, среди прочих факторов, от параметров тока этого конкретного удара и работы сети в интересующей точке. Поэтому точность местонахождения не является постоянной для всех ударов и для всех местоположений интересующей точки
Информация о данных	Точность местонахождения и *DE* также зависят от уставок процесса данных, используемого для определения решения (местонахождения удара и параметров). Поскольку данные о молнии могут использоваться для нескольких целей, то пользователь данных о молнии должен согласовать с провайдером данных о молнии тип получаемых данных в зависимости от их предназначения. В качестве примера можно привести очень высокую точность местонахождения, которая не нужна для оповещения о молнии, но хорошая DE_s или способность обнаружения молнии внутри облака может быть удобной. Некоторые провайдеры данных о молнии используют различные фильтры для данных. Эта информация должна предоставляться пользователю

b) Локальные системы активного обнаружения молнии.

На башне ВЭУ устанавливают специальные системы, например, с датчиками, предупреждающие об опасности молнии исходя из критериев магнитного поля или оптических критериев. Датчики предотвращают ошибочные срабатывания, когда разряд молнии происходит на удаленном расстоянии. Такие системы можно соединить с системой типа SCADA, что позволяет получать нужную информацию об ударах молнии в реальном времени. Системы могут давать или не давать показания о форме кривой тока или его величине, и, если система размещена на башне, она не предоставит информацию о месте удара молнии в ВЭУ. Однако такие системы полезны для упреждающих действий оператора во время мониторинга ВЭУ после грозы. Характеристики локальных активных систем обнаружения молнии перечислены в таблице *Р.2*.

Таблица *Р.2* — Характеристики локальных систем активного обнаружения молнии

Типы	Описание
Системы, предназначенные для выдачи аварийных сигналов	Системы, сконструированные согласно *ГОСТ Р МЭК 62561.6*, могут быть непригодны для ВЭУ, поскольку они предназначены для стандартизованных импульсов молнии. Эти системы должны быть достаточно чувствительными с пригодным частотным откликом. Изготовитель должен предоставить частотный отклик чувствительности
Системы измерения тока: шунты	Шунты тока обычно обеспечивают наилучший частотный отклик от постоянного тока до нескольких МГц. В ВЭУ размер шунта тока ограничивает его использование. Поскольку шунты тока являются частью системы вертикального молниеотвода, они должны тестироваться как часть вертикального молниеотвода на УМЗ I. Изготовитель должен предоставить информацию по калибровке
Системы измерения тока: пояс Роговского и оптические средства	Датчики на основе катушки Роговского или оптические средства (например, эффект Фарадея) должны иметь соответствующую ширину полосы. Изготовитель должен предоставить частотный отклик системы. Система должна быть сконструирована для измерения как можно большего числа непрерывных токов. Изготовитель должен предоставить калибровочную информацию

c) Локальные пассивные системы обнаружения молнии

Счетчики молний и карточки с чувствительными датчиками пикового значения тока предоставляют минимальную информацию о молниях в ВЭУ. Наиболее простые счетчики молний (например, электромеханические) предоставляют лишь количество ударов. Электронные счетчики молний, кроме того, предоставляют временную метку и оценку параметров молнии. Датчик пикового значения тока предоставляют оценку максимального пикового значения тока с того момента, как был установлен датчик. Характеристики локальных систем пассивного обнаружения молнии перечислены в таблице *Р.3*.

Таблица *Р.3* — Характеристики локальных систем пассивного обнаружения молнии

Типы	Описание
Счетчики ударов молнии	Счетчики молнии, сконструированные согласно *ГОСТ Р МЭК 62561.6*, непригодны для ВЭУ, поскольку они предназначены для стандартизованных импульсов молнии. Некоторые счетчики молнии также оценивают один или несколько параметров тока: пиковый ток, заряд, удельную энергию. Устройства, предназначенные для стандартных токов молнии (например, *ГОСТ Р МЭК 62561.1*) не обеспечат реалистичных данных для всех ударов молнии. Изготовитель должен определить испытательные формы кривой, включая непрерывные токи. Изготовитель должен предоставить эталонные формы кривой и неопределенности. Изготовитель также должен предоставить информацию о частотном отклике чувствительности и неопределенности оцениваемых параметров. Счетчики молний для ВЭУ должны быть чувствительны насколько это возможно на низких частотах, чтобы обнаружить восходящую молнию. Изготовитель должен предоставить кривую чувствительности в зависимости от частоты
Датчики пикового тока	Этот тип датчиков предназначен и калибруется только по формам кривой стандартного тока молнии и может быть непригоден для регистрации реальных токов молнии. Изготовитель должен предоставить информацию о работе датчика при стандартных токах молнии ВЭУ. Изготовитель должен предоставить информацию о минимально обнаруживаемом токе и испытуемых формах кривых. Этот тип датчиков непригоден для обнаружения непрерывных токов. Изготовитель должен предоставить частотный отклик чувствительности и ее неопределенность

Пользователям следует осторожно интерпретировать информацию, предоставленную изготовителями этих типов устройств. Пользователям следует знать частотный отклик устройства, чтобы получить итоговый результат, в противном случае данные могут быть нереалистичными.

Приложение Q
(справочное)

Пример определения точек измерения при определении непрерывности

Пример определения точек измерения показан на рисунке *Q.1*. Описание точек, показанных на рисунке *Q.1*, приведено в таблице *Q.1*.

Следуя данному примеру можно провести измерения, указанные в таблице *Q.1*.

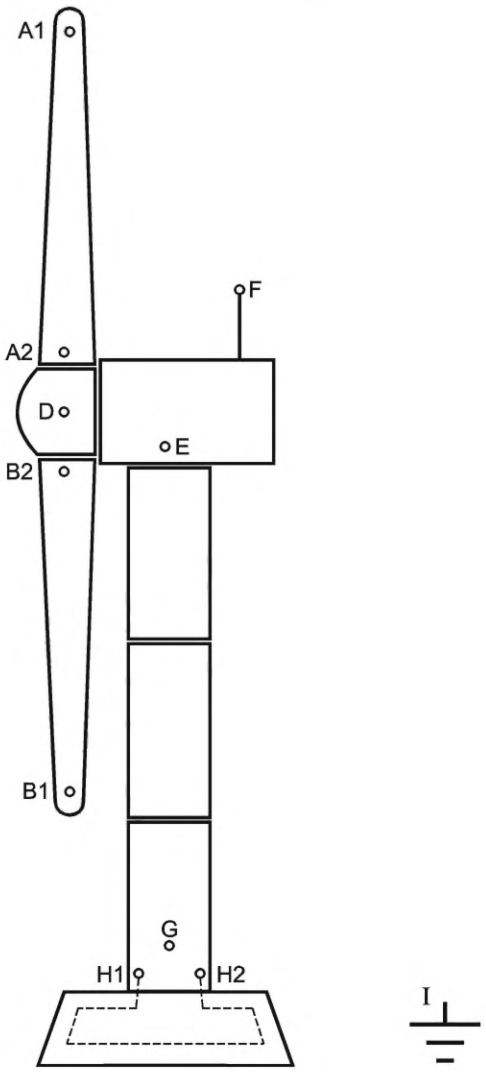


Рисунок *Q.1* — Пример точек измерения

Таблица *Q.1* — Точки обязательные измерения сопротивления

Точка измерения	Описание	Точка измерения	Описание	Сопротивление, Ом
A1	Точка молниезащиты на концевой части лопасти A	A2	Вертикальный молниеотвод на комлевой части лопасти A	
B1	Точка молниезащиты на концевой части лопасти B	B2	Вертикальный молниеотвод на комлевой части лопасти B	
A2	Вертикальный молниеотвод на комлевой части лопасти A	D	Корпус ступицы ветроколеса	

Окончание таблицы Q.1

Точка измерения	Описание	Точка измерения	Описание	Сопротивление, Ом
B2	Вертикальный молниеотвод на комлевой части лопасти B	D	Корпус ступицы ветроколеса	
D	Шасси ступицы ветроколеса	E	Корпус гондолы или шина заземления	
F	Молниезащита приборов ветра	E	Корпус гондолы или шина заземления	
E	Шасси гондолы или шина заземления	G	Шина заземления в нижней части башни	
H1	Заземление 1 на электроде фундамента	H2	Заземление 2 на электроде фундамента	
G	Шина заземления в нижней части башни	I	Удаленное заземление	

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного национального, межгосударственного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование ссылочного международного стандарта
ГОСТ 30804.6.2—2013 (IEC 61000-6-2:2005)	MOD	IEC 61000-6-2:2005 «Электромагнитная совместимость. Часть 6-2. Общие стандарты. Помехоустойчивость оборудования, используемого в районах с промышленными предприятиями»
ГОСТ IEC 61000-4-5—2017	IDT	IEC 61000-4-5:2014 «Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-5. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к выбросу напряжения»
ГОСТ IEC 61000-4-9—2013	IDT	IEC 61000-4-9:2001 «Электромагнитная совместимость. Часть 4. Методики испытаний и измерений. Раздел 9. Испытание на помехоустойчивость в условиях импульсного магнитного поля»
ГОСТ IEC 61643-11—2013	IDT	IEC 61643-11:2011 «Устройства защиты от перенапряжений низковольтные. Часть 11. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к низковольтным системам распределения электроэнергии. Требования и методы испытаний»
ГОСТ IEC 61643-12—2022	IDT	IEC 61643-12:2020 «Устройства защиты от перенапряжений низковольтные. Часть 12. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к низковольтным системам распределения электроэнергии. Принципы выбора и применения»
ГОСТ IEC 61643-21—2014	IDT	IEC 61643-21:2012 «Устройства защиты от перенапряжений низковольтные. Часть 21. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к сигнальным и телекоммуникационным сетям. Требования к эксплуатационным характеристикам и методы испытаний»
ГОСТ IEC 61643-22—2022	IDT	IEC 61643-22:2015 «Устройства защиты от импульсных перенапряжений низковольтные. Часть 22. Устройства защиты от импульсных перенапряжений, подключенные к телекоммуникационным сетям и сетям связи. Выбор и принципы применения»
ГОСТ Р 50571.4.44—2019 (МЭК 60364-4-44:2007)	MOD	IEC 60364-4-44:2007 «Электроустановки низковольтные. Часть 4-44. Защита для обеспечения безопасности. Защита от резких отклонений напряжения и электромагнитных возмущений»
ГОСТ Р 50571.5.53—2013/ МЭК 60364-5-53:2002	IDT	IEC 60364-5-53:2002 «Электрические установки зданий. Часть 5-53. Выбор и установка электрооборудования. Изоляция, коммутационная аппаратура и механизмы управления»
ГОСТ Р 50571.5.54—2013/ МЭК 60364-5-54:2011	IDT	IEC 60364-5-54:2011 «Электроустановки низковольтные. Часть 5-54. Выбор и монтаж электрооборудования. Заземляющие устройства и защитные проводники»

Окончание таблицы ДА.1

Обозначение ссылочного национального, межгосударственного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование ссылочного международного стандарта
ГОСТ Р 50571.16—2019/ МЭК 60364-6:2016	IDT	IEC 60364-6:2016 «Низковольтные электроустановки. Часть 6. Испытания»
ГОСТ Р 54418.23—2019 (МЭК 61400-23:2014)	MOD	IEC 61400-23:2014 «Ветроэнергетические установки. Часть 23. Полномасштабные испытания лопастей ротора на прочность»
ГОСТ Р 59789—2021 (МЭК 62305-3:2010)	MOD	IEC 62305-3:2010 «Защита от молнии. Часть 3. Физические повреждения конструкций и опасность для жизни»
ГОСТ Р МЭК 60664.1—2012	IDT	IEC 60664-1:2007 «Координация изоляции для оборудования в низковольтных системах. Часть 1. Принципы, требования и испытания»
ГОСТ Р МЭК 61587-3—2013	IDT	IEC 61587-3:2006 «Конструкции механические для электронного оборудования. Испытания конструкций по IEC 60917 и IEC 60297. Часть 3. Испытание на определение характеристик электромагнитного экранирования шкафов, стоек и подстоек»
ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010	IDT	IEC 62305-1:2010 «Защита от молнии. Часть 1. Общие принципы»
ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010	IDT	IEC 62305-2:2010 «Защита от молнии. Часть 2. Управление риском»
ГОСТ Р МЭК 62305-4—2016	IDT	IEC 62305-4:2010 «Защита от молнии. Часть 4. Электрические и электронные системы внутри конструкций»
Примечание — В настоящей таблице использованы следующие условные обозначения степени соответствия стандартов: - IDT — идентичные стандарты; - MOD — модифицированные стандарты.		

Приложение ДБ
(справочное)

Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного стандарта

Таблица ДБ.1

Структура настоящего стандарта	Структура международного стандарта МЭК 61400-24:2019
1 Область применения	1 Область применения
2 Нормативные ссылки	2 Нормативные ссылки
3 Термины и определения	3 Термины и определения
4 Обозначения	4 Обозначения и единицы измерения
5 Сокращения	5 Сокращения
6 Воздействие молнии на ВЭУ	6 Молниевая обстановка для ветровой турбины
6.1 Общие положения	6.1 Общие положения
6.2 Параметры тока молнии и уровни молниезащиты	6.2 Параметры тока молнии и уровней молниезащиты (УМЗ)
7 Оценка воздействия молнии	7 Оценка воздействия молнии
7.1 Общие положения	7.1 Общие положения
7.2 Оценка влияния числа ударов молнии на ВЭУ или группу ВЭУ	7.2 Оценка частоты влияния вспышек молнии на ветровую турбину или группу ветровых турбин
7.3 Оценка риска повреждения	7.3 Оценка риска повреждения
8 Молниезащита отдельных компонентов ВЭУ	8 Молниезащита отдельных элементов ветровой турбины
8.1 Общие положения	8.1 Общие положения
8.2 Лопасти	8.2 Лопасти
8.3 Гондола и другие элементы конструкции	8.3 Гондола и другие элементы конструкции
8.4 Механический привод и система установки на ветер	8.4 Механический приводной механизм и система управления поворотом
8.5 Электрические низковольтные системы, электронные системы и их компоненты	8.5 Электрические низковольтные системы, а также электронные системы и установки
8.6 Электрические системы высокого напряжения	8.6 Электрические высоковольтные системы
9 Система заземления ВЭУ	9 Заземление ветровых турбин
9.1 Общие положения	9.1 Общие положения
9.2 Уравнивание потенциалов	9.2 Эквипотенциальное соединение
9.3 Элементы конструкции ВЭУ	9.3 Элементы конструкции
9.4 Размеры электродов	9.4 Размеры электродов
9.5 Исполнение и техническое обслуживание	9.5 Исполнение и техобслуживание системы заземления
10 Безопасность персонала	10 Безопасность персонала
11 Документация системы молниезащиты	11 Документация системы молниезащиты
11.1 Общие положения	11.1 Общие положения

Продолжение таблицы ДБ.1

Структура настоящего стандарта	Структура международного стандарта МЭК 61400-24:2019
11.2 Документация, необходимая для анализа конструкции	11.2 Документация, необходимая во время оценки конструкции
11.3 Информация о площадке размещения ВЭУ	11.3 Информация по конкретной площадке
11.4 Информация для руководства по проверке СМЗ	11.4 Документация, предоставляемая в руководствах для инспекций СМЗ
11.5 Руководства	11.5 Руководства
12 Проверки системы молниезащиты	12 Инспекция системы молниезащиты
12.1 Объем проверок	12.1 Объем инспекции
12.2 Порядок проведения проверок	12.2 Порядок проведения инспекций
12.3 Техническое обслуживание	12.3 Техобслуживание
Приложение A Молниезащита малых ВЭУ (Приложение M)	Приложение A Воздействие молнии на ветровые турбины
Приложение B Воздействие молнии на ВЭУ (Приложение A)	Приложение B Оценка воздействия молнии
Приложение C Методы испытаний (Приложение D)	Приложение C Методы защиты лопастей
Приложение D Оценка воздействия молнии (Приложение B)	Приложение D Методы испытаний
Приложение E Классификация повреждения молнией на основе менеджмента риска (Приложение K)	Приложение E Применение молниевой обстановки и зон молниезащиты (ЗМЗ)
Приложение F Молниевая обстановка и зоны молниезащиты (Приложение E)	Приложение F Выбор и установка согласованной защиты УЗП на ветровой турбине
Приложение G Защита лопастей (Приложение C)	Приложение G Сведения по металлизации, экранированию и методам установки
Приложение H Проверка сходства конструкции лопастей с конструкциями лопастей, испытанными ранее (Приложение N)	Приложение H Методы контроля для испытаний на устойчивость на системном уровне
Приложение I Проверка адекватности методов численного анализа, используемых при создании зон молниезащиты (Приложение O)	Приложение I Система заземления
Приложение J Испытание вращающихся элементов (Приложение P)	Приложение J Пример определения точек измерения
Приложение K Уменьшение влияния магнитных полей, возникающих при ударе молнии (Приложение G)	Приложение K Классификация повреждения молнией на основе менеджмента риска
Приложение L Выбор и монтаж УЗИП (Приложение F)	Приложение L Системы мониторинга
Приложение M Методы испытаний на устойчивость на уровне системы (Приложение H)	Приложение M Методические указания по малым ветровым турбинам
Приложение N Системы заземления ВЭС (Приложение Q)	Приложение N Методические указания по верификации сходства лопастей

Окончание таблицы ДБ.1

Структура настоящего стандарта	Структура международного стандарта МЭК 61400-24:2019
Приложение О Система заземления ВЭУ (Приложение I)	Приложение О Методические указания по валидации методов численного анализа
Приложение Р Системы мониторинга (Приложение L)	Приложение Р Испытание вращающихся элементов
Приложение Q Пример определения точек измерения при определении непрерывности (Приложение J)	Приложение Q Системы заземления для ветроэлектрических станций
Приложение ДА Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте	Библиография
Приложение ДБ Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного стандарта	
Библиография	
Примечание — После заголовков приложений настоящего стандарта приведены в скобках обозначения аналогичных им приложений международного стандарта.	

Библиография

[1] *Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»*

[2] Cigré WG C4.407, Lightning Parameters for Engineering Applications, Cigré Brochure 549, 2013

[3] Masaru Ishii, NEDO R&D Project for Measures of Lightning Protection of Wind Turbines in Japan, 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), Balneário Camboriú, Brazil, 28th Sept. — 2nd Oct. 2015

[4] МЭК 62858:2019 Плотность разрядов молний на основе данных систем локации молниеопасных зон (LLS). Общие принципы [Lightning density based on lightning location systems (LLS) — General principles]

[5] NASA, Global Hydrology Research Center, Lightning & Atmospheric Electricity Research [online]. Viewed 2018-10-11. Available at gost.e-ecolog.ru

[6] МЭК 60243 (все части) Материалы твердые изоляционные. Методы определения электрической прочности [Electric strength of insulating materials — Test methods (all parts)]

[7] IEC/TS 62561-8:2018 Компоненты систем молниезащиты. Часть 8. Требования к компонентам автономной системы молниезащиты [Lightning protection system components (LPSC) — Part 8: Requirements for components for isolated LPS]

[8] МЭК 60060-1:2010 Методы испытаний высоким напряжением. Часть 1. Общие определения и требования к испытаниям (High-voltage test techniques — Part 1: General definitions and test requirements)

[9] МЭК 60243-1:2013 Материалы изоляционные. Методы определения электрической прочности. Часть 1. Испытания на промышленных частотах (Electric strength of insulating materials — Test methods — Part 1: Tests at power frequencies)

[10] МЭК 60243-3:2013 Материалы изоляционные. Методы определения электрической прочности. Часть 3. Дополнительные требования к импульсным испытаниям при 1,2/50 мкс (Electric strength of insulating materials — Test methods — Part 3: Additional requirements for 1,2/50 mks impulse tests)

[11] МЭК 60464-2:2014 Лаки электроизоляционные. Часть 2. Методы испытания (Varnishes used for electrical insulation — Part 2: Methods of test)

[12] МЭК 60587:2007 Материалы электроизоляционные. Методы испытания на дугостойкость и эрозионную стойкость в жестких условиях окружающей среды (Electrical insulating materials used under severe ambient conditions — Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion)

[13] IEC/TR 61000-5-2:1997 Электромагнитная совместимость. (ЭМС). Часть 5. Руководящие указания по установке устройств защиты и ослаблению помех. Раздел 2. Заземление и прокладка кабеля. [Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5: Installation and mitigation guidelines — Section 2: Earthing and cabling]

[14] МЭК 61000-4-10:2016 Электромагнитная совместимость. Часть 4-10. Методики испытаний и измерений. Испытание на помехоустойчивость к воздействию магнитного поля с затухающими колебаниями [Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-10: Testing and measurement techniques — Damped oscillatory magnetic field immunity test]

[15] ITU-T K.21:2008 Электромагнитная совместимость. Устойчивость телекоммуникационного оборудования, установленного в помещениях пользователя, к перенапряжениям и сверхпроводящим токам (Resistibility of telecommunications equipment installed in customer premises to overvoltages and overcurrents)

[16] ITU-T K.20:2008 Устойчивость телекоммуникационного оборудования, установленного в телекоммуникационных центрах, к перенапряжениям и перегрузкам по току (Resistibility of telecommunication equipment installed in a telecommunications centre to overvoltages and overcurrents)

[17] МЭК 61000-5-7:2001 Электромагнитная совместимость. Часть 5-7. Руководство по установке и подавлению. Степени защиты, обеспечиваемые оболочками против электромагнитных помех (код EM) [Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 5-7: Installation and mitigation guidelines — Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code)]

[18]	ЕН 50539-22:2010	Низковольтные устройства защиты от перенапряжения. Устройства защиты от перенапряжений для специального применения, включая постоянный ток. Часть 22. Выбор и принципы применения. Ветроэнергетические установки. Общие положения (Low-voltage surge protective devices — Surge protective devices for specific application including d.c. — Part 22: Selection and application principles — Wind turbine applications. General information)
[19]	МЭК 60071 (все части)	Координация изоляции (Insulation coordination)
[20]	МЭК 60099-4:2014	Ограничители перенапряжений. Часть 4. Металлооксидные ограничители перенапряжений без искровых промежутков для систем переменного тока (Surge arresters — Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems)
[21]	МЭК 60071-2:2018	Координация изоляции. Часть 2. Руководство по применению (Insulation coordination — Part 2: Application guidelines)
[22]	МЭК 60204-11:2018	Безопасность машин. Электрооборудование машин и механизмов. Часть 11. Требования к оборудованию на напряжение свыше 1000 В переменного тока или 1500 В постоянного тока, но не выше 36 кВ (Safety of machinery — Electrical equipment of machines — Part 11: Requirements for equipment for voltages above 1000 V AC or 1500 V DC and not exceeding 36 kV)
[23]	МЭК 61936-1:2014	Установки электрические напряжением свыше 1 кВ переменного тока. Часть 1. Общие правила (Power installations exceeding 1 kV a.c. — Part 1: Common rules)
[24]	IEC/TS 61936-2:2015	Установки электрические напряжением свыше 1 кВ переменного тока и 1,5 кВ постоянного тока. Часть 2. Постоянный ток (Power installations exceeding 1 kV a.c. and 1,5 kV d.c. — Part 2: d.c.)
[25]	МЭК 60479-1:2018	Воздействие электрического тока на людей и домашних животных. Часть 1. Общие аспекты (Effects of current on human beings and livestock — Part 1: General aspects)
[26]	IEC TR 60479-4:2020	Воздействие электрического тока на людей и домашних животных. Часть 4. Воздействие ударов молнии (Effects of current on human beings and livestock — Part 4: Effects of lightning strokes)
[27]	ITU-R P.832-3 (02/2012)	Атлас мира проводимости почв. Серия Р. Распространение радиоволн (World Atlas of Ground Conductivities)
[28]	МЭК 62793:2020	Системы предупреждения о грозах. Молниезащита (Thunderstorm warning systems — Protection against lightning)
[29]	Rakov V.A., Un M.A. Lightning Physics and Effects. Cambridge University Press, 2003, ISBN 0 521 58327	
[30]	Fisher F.A., Plumer J.A. and Perala R.A. Lightning Protection of Aircraft. Second edition. Lightning Technologies Inc., Pittsfield, MA, USA, 2004	
[31]	МЭК 62561 (все части)	Компоненты системы молниезащиты (LPSC) [Lightning protection system components (LPSC)]
[32]	МЭК 62153-4-3:2013	Методы испытания металлических кабелей связи. Часть 4-3. Электромагнитная совместимость. Передаточное полное поверхностное сопротивление. Трехосевой метод [Metallic communication cables test methods — Part 4-3: Electromagnetic compatibility (EMC) — Surface transfer impedance — Triaxial method]
[33]	МЭК 60068 (все части)	Испытание на воздействие внешних факторов (Environmental testing)
[34]	Cigré WG C.4.4.02, Protection of MV and LV networks against lightning — Part 1: Common topics, July 2005	

УДК 621.311:006.354 ОКС 27.160

Ключевые слова: ветроэнергетические установки, ветроэлектрические станции, молниезащита, требования, расчет, испытания, риски и ущербы

Редактор *Н.В. Таланова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *И.А. Королева*
Компьютерная верстка *И.Ю. Литовкиной*

Сдано в набор 10.01.2024. Подписано в печать 26.01.2024. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 18,14. Уч-изд. л. 15,42.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

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

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