ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика

УСТАНОВКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ

Часть 24

Молниезащита

IEC 61400-24:2010
Wind turbine — Part 24: Lightning protection
(MOD)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2015

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» (ОАО «НИИЭС»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 330 «Процессы, оборудование и энергетические системы на основе возобновляемых источников энергии»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 сентября 2013 г. № 1049-ст

4 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к международному стандарту МЭК 61400-24:2010 «Турбины ветровые. Часть 24. Защита от молнии» (IEC 61400-24:2010 «Wind turbine — Part 24: Lightning protection») путем изменения отдельных фраз (слов, значений показателей), которые выделены в тексте курсивом

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0—2012 (раздел 8). 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 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.ru)

© Стандартинформ, 2015

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 . . . 2
4 Обозначения . . . 6
5 Сокращения . . . 8
6 Молниевая обстановка для ветроэнергетической установки . . . 8
6.1 Общие положения . . . 8
6.2 Параметры тока молнии и уровни молниезащиты (УМЗ) . . . 8
7 Оценка воздействия молнии . . . 10
7.1 Общие положения . . . 10
7.2 Оценка частоты влияния вспышек молнии на ветроэнергетическую установку . . . 10
7.3 Оценка риска повреждения . . . 14
7.3.1 Основное уравнение . . . 14
7.3.2 Оценка элементов риска, связанного с попаданием вспышек молнии в ветроэнергетическую установку (S1) . . . 14
7.3.3 Оценка элемента риска, связанного с попаданием вспышек молнии в непосредственной близи от ветроэнергетической установки (S2) . . . 14
7.3.4 Оценка элементов риска, связанных с попаданием вспышек молнии в служебную линию, подведенную к ветроэнергетической установке (S3) . . . 14
7.3.5 Оценка элемента риска, связанного с попаданием вспышек молнии около служебной линии, подведенной к ветроэнергетической установке (S4) . . . 15
8 Молниезащита отдельных элементов ветроэнергетической установки . . . 16
8.1 Общие положения . . . 16
8.2 Лопасти . . . 16
8.2.1 Общие положения . . . 16
8.2.2 Требования . . . 16
8.2.3 Проверка . . . 16
8.2.4 Рассмотрение защитных мер . . . 16
8.2.5 Методы испытаний . . . 18
8.3 Гондола и другие элементы конструкции . . . 19
8.3.1 Общие положения . . . 19
8.3.2 Ступица . . . 19
8.3.3 Обтекатель ступицы . . . 19
8.3.4 Гондола . . . 20
8.3.5 Мачта . . . 20
8.3.6 Методы испытаний . . . 21
8.4 Механический приводной механизм и система рыскания . . . 21
8.4.1 Общие положения . . . 21
8.4.2 Подшипники . . . 21
8.4.3 Гидравлические системы . . . 21
8.4.4 Искровые зазоры и скользящие контакты . . . 21
8.4.5 Испытания . . . 22
8.5 Электрические низковольтные системы, а также электронные системы и установки . . . 22
8.5.1 Общие положения . . . 22
8.5.2 Меры защиты от электромагнитного импульса от грозовых разрядов . . . 22
8.5.3 Зоны молниезащиты (ЗМЗ) . . . 23
8.5.4 Эквипотенциальная металлизация внутри ветроэнергетической установки . . . 23
8.5.5 Экранирование и кабельная разводка . . . 24
8.5.6 Согласованная защита УЗП . . . 24
8.5.7 Методы испытаний системы на устойчивость . . . 26
8.6 Электрические высоковольтные системы . . . 26

9 Заземление ветроэнергетических установок и ветроэлектрических станций . . . 28
9.1 Общие положения . . . 28
9.1.1 Основные требования . . . 28
9.1.2 Заземляющие электродные установки . . . 28
9.1.3 Полное сопротивление системы заземления . . . 28
9.2 Эквипотенциальная металлизация . . . 29
9.2.1 Общие положения . . . 29
9.2.2 Молниезащитная эквипотенциальная металлизация металлических установок . . . 29
9.2.3 СМЗ с электроизоляцией . . . 30
9.3 Конструкционные элементы . . . 30
9.3.1 Общие положения . . . 30
9.3.2 Металлическая пустотелая мачта . . . 30
9.3.3 Металлическая железобетонная мачта . . . 30
9.3.4 Решетчатая мачта . . . 30
9.3.5 Системы внутри мачты . . . 30
9.3.6 Бетонный фундамент . . . 30
9.3.7 Фундамент на скалистых участках . . . 31
9.3.8 Фундамент на металлических сваях . . . 31
9.3.9 Фундамент в прибрежной зоне . . . 31
9.4 Размеры электрода . . . 31
9.5 Ветроэлектрические станции . . . 32
9.6 Исполнение и техобслуживание системы заземления . . . 32
10 Безопасность персонала . . . 33
11 Документация на систему молниезащиты . . . 34
11.1 Общие положения . . . 34
11.2 Документация, необходимая во время анализа конструкции . . . 34
11.2.1 Общая документация . . . 34
11.2.2 Документация на лопасти ротора . . . 34
11.2.3 Документация на механические системы . . . 35
11.2.4 Документация на электрические и электронные системы . . . 35
11.2.5 Документация на системы заземления и металлизации . . . 35
11.2.6 Документация на системы молниезащиты корпуса гондолы, ступицы и мачты . . . 35
11.3 Специальная информация о площадке . . . 35
11.4 Документация, предоставляемая для проведения проверок СМЗ . . . 35
11.5 Руководства . . . 35
12 Проверки системы молниезащиты . . . 36
12.1 Объем проверок . . . 36
12.2 Порядок проверок . . . 36
12.2.1 Общие положения . . . 36
12.2.2 Проверки во время изготовления ветроэнергетических установок . . . 36
12.2.3 Проверки во время монтажа ветроэнергетических установок . . . 36
12.2.4 Проверки во время ввода ветроэнергетической установки в эксплуатацию и периодические проверки . . . 36
12.2.5 Проверка после демонтажа и ремонта основных частей . . . 37
12.3 Техобслуживание . . . 37
Приложение А (справочное) Воздействие молнии на ветроэнергетическую установку . . . 38
Приложение В (справочное) Оценка воздействия молнии . . . 48
Приложение С (справочное) Методы защиты лопастей . . . 61
Приложение D (справочное) Технические требования к испытаниям . . . 71
Приложение Е (справочное) Применение концепции зон молниезащиты (ЗМЗ) на ветроэнергетической установке . . . 88

Приложение F (справочное) Выбор и установка согласованной защиты УЗП на ветроэнергетической установке 93
Приложение G (справочное) Дополнительные сведения по металлизации, экранированию и методам установки 96
Приложение H (справочное) Методы контроля для испытаний на устойчивость на системном уровне 100
Приложение I (справочное) Система заземления 102
Приложение J (справочное) Пример определения точек измерения 108
Приложение K (справочное) Типичные вопросы о повреждении молнией 110
Приложение L (справочное) Системы мониторинга 113
Приложение M (справочное) Руководство для малых ветроэнергетических установок. Микровыработка 114
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте 115
Библиография 117

Введение

Целью настоящего стандарта является установление единообразия методов, обеспечивающих молниезащиту ветроэнергетических установок. Данный стандарт разработан для использования:

- изготовителем ветроэнергетических установок, для выполнения требований молниезащиты;
- потребителем ветроэнергетических установок для анализа этих требований;
- при анализе соответствия параметров ветроэнергетических установок требованиям молниезащиты.

Настоящий стандарт является руководящим документом при проведении работ по молниезащите ветроэнергетических установок. Данный стандарт должен использоваться при разработке, изготовлении, монтаже и эксплуатации ветроэнергетических установок. Рекомендованные в настоящем стандарте методы молниезащиты должны использоваться всеми заинтересованными сторонами для согласованного взаимодействия в части обеспечения требований по молниезащите.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика

УСТАНОВКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ

Часть 24

Молниезащита

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

Дата введения — 2015 — 07— 01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на молниезащиту ветроэнергетических установок (ВЭУ) и систем электропитания ВЭУ.

Нормативные ссылочные документы, использованные в данном стандарте, являются групповыми стандартами по молниезащите, низковольтным и высоковольтным системам для оборудования и установок, а также по электромагнитной совместимости (ЭМС).

В настоящем стандарте рассмотрена молниевая обстановка на территории, окружающей место установки ВЭУ. На основание полученных данных по молниевой обстановке приведена оценка рисков для ВЭУ. Определены требования по защите лопастей, других конструктивных элементов, а также электрических систем и систем управления от воздействия молнии. Рекомендованы методы испытаний для выполнения оценки устойчивости оборудования и элементов конструкции к воздействию ударов молнии и грозовых разрядов.

Приведена рекомендация по устройству системы молниезащиты, выбору электрических промышленных устройств и устройств, обеспечивающих электромагнитную совместимость, включая заземление.

Предложены рекомендации по обеспечению безопасности персонала.

Приведены данные по статистике повреждений и отчетности.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 50532—93 Материалы электроизоляционные твердые. Стандартные условия, устанавливаемые до и во время испытаний

ГОСТ Р 50571.4.44—2011 Электроустановки низковольтные. Часть 4-44. Требования по обеспечению безопасности. Защита от отклонений напряжения и электромагнитных помех

ГОСТ Р 51317.4.5—99 Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний

ГОСТ Р 51992—2011 Устройства защиты от импульсных перенапряжений низковольтные. Часть 1. Устройства защиты от импульсных перенапряжений в низковольтных силовых распределительных системах. Технические требования и методы испытаний

ГОСТ Р 52725—2007 Ограничители перенапряжений нелинейные для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ. Общие технические условия

ГОСТ Р 53735.5—2009 Разрядники вентильные и ограничители перенапряжений нелинейные для электроустановок переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Часть 5. Рекомендации по выбору и применению

Издание официальное

ГОСТ Р 54986—2012 Устройства защиты от импульсных перенапряжений низковольтные. Часть 21. Устройства защиты от импульсных перенапряжений в системах телекоммуникации и сигнализации (информационных системах). Требования к работоспособности и методы испытаний

ГОСТ Р МЭК 60068—2 Испытания на воздействие внешних факторов

ГОСТ Р МЭК 60204-1—2007 Безопасность машин. Электрооборудование машин и механизмов. Часть 1. Общие требования

ГОСТ Р МЭК 60664.1—2012 Координация изоляции для оборудования в низковольтных системах. Часть 1. Принципы, требования и испытания

ГОСТ Р МЭК 61643-12—2011 Устройства защиты от импульсных перенапряжений низковольтные. Часть 12. Устройства защиты от импульсных перенапряжений в низковольтных силовых распределительных системах. Принципы выбора и применения

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 13526—79 Лаки и эмали электроизоляционные. Методы испытаний

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 дата датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дата 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 следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **внешняя система молниезащиты:** Часть системы молниезащиты, состоящая из воздушной системы перехвата вспышек молнии, системы вертикальных молниеотводов и системы заземления.

Примечание — Вертикальный молниеотвод может размещаться внутри лопастей ВЭУ.

3.2 **внутренняя система молниезащиты:** Часть системы молниезащиты, состоящая из молниезащитной эквипотенциальной металлизации и/или электрической изоляции внешней системы молниезащиты.

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

3.3 **воздушная система перехвата вспышек молнии:** Часть внешней системы молниезащиты, использующая металлические элементы, такие как стержни, заземляющие провода или несущие тросы, предназначенные для перехвата вспышек молнии.

3.4 **восходящая вспышка:** Вспышка молнии, инициируемая восходящим лидером от заземленной конструкции до облака.

Примечание — Восходящая вспышка состоит из первого длинного удара молнии с или без многократных наложившихся друг на друга коротких ударов. За одним или несколькими короткими ударами может последовать длинный удар молнии.

3.5 **вспышка молнии в землю:** Электрический атмосферный разряд между небом и землей, состоящий из одного или нескольких ударов.

Примечание — Отрицательная вспышка уменьшает отрицательный разряд от грозовой тучи до земли. Положительная вспышка приводит к переносу положительного заряда от грозовой тучи до земли.

3.6 **вспышка молнии в конструкцию:** Вспышка молнии, попадающая в конструкцию, которую необходимо защитить.

3.7 **выброс:** Нестационарная волна, проявляющаяся в виде повышенного напряжения и/или тока, вызванного электромагнитными импульсами от грозовых разрядов.

Примечания

1 Выбросы, вызванные электромагнитными импульсами от грозовых разрядов, могут возникнуть в результате действия (неполных) токов молнии, индуктивных воздействий в замкнутых цепях установки, а также как остаточные выбросы ниже устройства защиты от перенапряжений.

2 Выбросы могут появиться из других источников, как например, при коммутационных передачах или работе предохранителей.

3.8 **грозовые дни T_d:** Количество грозовых дней в году, полученное с помощью изокераунических карт.

3.9 **длинный удар молнии:** Часть вспышки молнии, которая соответствует непрерывному току.

Примечание — Продолжительность t_{long} (временной промежуток, начиная через 10 % от начала удара и заканчивая за 10 % до конца удара) непрерывного тока составляет обычно более 2 мс и менее 1 с (см. рисунок А.4 (приложение А).

3.10 **допустимый риск R_T:** Максимальное значение риска, которое может быть допустимым для защищаемой конструкции.

3.11 **естественный элемент системы молниезащиты:** Проводящий элемент, который был установлен не для молниезащиты и который может быть использован в дополнение к системе молниезащиты или в некоторых случаях может выполнять функцию одной или нескольких частей системы молниезащиты.

Примечание — Примеры использования данного термина включают:

- естественный воздушный перехват вспышек молнии;
- естественный вертикальный молниеотвод;
- естественный заземляющий электрод.

3.12 **заземляющий электрод:** Часть или группа частей системы заземления, которая осуществляет прямой электрический контакт и уводит ток молнии в землю.

3.13 **заземляющий электрод фундамента:** Арматурная сталь фундамента или дополнительный молниеотвод, помещенный в бетонный фундамент конструкции, используемый в качестве заземляющего электрода.

3.14 **заряд вспышки Q_{flash}:** Интеграл во времени тока молнии при полной продолжительности вспышки молнии.

3.15 **зона молниезащиты; ЗМЗ:** Зона, в которой устанавливается электромагнитная защита от грозовых разрядов.

Примечание — границы зоны молниезащиты необязательно являются физическими границами (например, стены, пол и потолок).

3.16 **количество опасных случаев из-за вспышек молнии в конструкции N_d:** Расчетное среднее годовое количество опасных случаев из-за вспышек молнии в конструкции.

3.17 **контактная шина:** Шина, на которой металлические установки, линии электропередачи, линии связи и другие кабели могут быть металлизированы с системой молниезащиты.

3.18 **короткий удар молнии:** Часть вспышки молнии, которая соответствует импульсному току.

Примечание — Продолжительность данного тока соответствует времени достижения половинной величины (t_2), обычно составляющему менее 2 мс (см. рисунок А.3 (приложение А).

3.19 **лидер:** Высокотемпературный плазменный канал, который формируется при искровом пробое.

3.20 **магнитный экран:** Закрытый, металлический, сетчатый или сплошной экран, закрывающий конструкцию, которую необходимо защитить, или ее часть и используемый для снижения числа отказов электрических и электронных систем.

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

3.21 **металлические установки:** Металлические предметы в конструкции, которые могут образовывать путь тока молнии, такие как основание гондолы, лифтовые направляющие и тросы, лестницы, платформы и соответствующая арматура.

3.22 **многократные удары молнии:** Вспышка молнии, состоящая в среднем из трех-четырех ударов. Обычно временной интервал между ударами составляет около 50 мс.

Примечание — Были зафиксированы явления, включающие до нескольких десятков ударов молнии с интервалами между ними 10—250 мс.

3.23 **молниезащита:** Комплекс защитных устройств и мероприятий, предназначенных для обеспечения безопасности людей, предохранения зданий, сооружений, оборудования и материалов от возможных взрывов, загораний и разрушений, возникающих при разрядах молний.

3.24 **молниезащитная эквипотенциальная металлизация:** Металлизация с системой молниезащиты отдельных металлических деталей путем прямых токопроводящих соединений или через устройства защиты от перенапряжений для уменьшения разности электрических потенциалов, вызванных током молнии.

3.25 **нисходящая вспышка:** Вспышка молнии, инициируемая нисходящим лидером от облака к земле.

Примечание — Нисходящая вспышка состоит из первого короткого удара молнии, за которым могут последовать короткие удары. Нисходящая вспышка может также включать в себя длинный удар.

3.26 **пиковое значение *I*:** Максимальное значение тока молнии.

3.27 **площадь сбора вспышек молнии A_d:** Площадь земной поверхности, на которую приходится такая же годовая частота прямых вспышек молнии, что и на конструкцию.

3.28 **приемник:** Тип воздушного перехвата вспышек молнии на лопастях ветроэнергетических установок, например, разобщенные стойки из тонкостенных профилей, проходящие через поверхность лопасти, подсоединенную к системе вертикальных молниеотводов.

3.29 **риск *R*:** Величина вероятных среднегодовых потерь (человеческие жизни и имущество) вследствие молнии относительно общей стоимости (человеческие жизни и имущество) конструкции, которую необходимо защитить.

3.30 **система вертикальных молниеотводов:** Часть внешней системы молниезащиты, предназначенная для проведения тока молнии от воздушной системы перехвата вспышек молнии до системы заземления.

3.31 **система заземления:** Часть внешней системы молниезащиты, которая предназначена для проведения и увода тока молнии в землю.

3.32 **система мер защиты от электромагнитных импульсов от грозовых разрядов:** Полная система защитных мер для внутренних систем от электромагнитных импульсов от грозовых разрядов.

3.33 **система молниезащиты; СМЗ:** Полная система, используемая для уменьшения физических повреждений из-за ударов вспышек молнии в конструкцию.

Примечание — Она состоит из внешней и внутренней систем молниезащиты.

3.34 **служебная линия:** Линия электропитания или линия связи, подведенная к конструкции, которую необходимо защитить.

3.35 **соединительный лидер:** Лидер молнии, исходящий от конструкции вследствие реакции на внешнее электрическое поле, создаваемое либо находящимся сверху грозовым облаком, либо нисходящим лидером, приближающимся к конструкции.

3.36 **согласованная защита УЗП:** Комплект устройств защиты от перенапряжений, правильно отобранных, согласованных и установленных для снижения числа отказов электрических и электронных систем.

Примечание — Для согласования защиты УЗП должны использоваться соединительные линии для осуществления координации изоляции полных систем.

3.37 **средняя скорость нарастания фронта тока короткого удара молнии:** Средняя скорость изменения тока в промежутке времени $\Delta t = t_2 - t_1$.

Примечание — Она выражается в виде разности $\Delta i = i(t_2) - i(t_1)$ значений тока в начале и в конце данного промежутка времени, деленную на временной интервал $\Delta t = t_2 - t_1$ (см. рисунок А.3).

3.38 **территориальный разнос:** Расстояние между двумя токопроводящими элементами, при котором не может появиться опасное искрение.

3.39 **ток молнии *i*:** Ток в точке удара молнии.

3.40 **точка контакта лидеров:** Точка в воздушном промежутке между объектом испытаний и высоковольтным электродом, где встречаются положительный и отрицательный лидеры и образуется разряд.

3.41 **точка удара молнии:** Точка, в которой вспышка молнии ударяет землю или выступающий элемент (например, конструкцию, систему молниезащиты, служебную линию, дерево и т. п.)

Примечание — Вспышка молнии может иметь несколько точек удара.

3.42 **удар молнии:** Одиночный разряд во вспышке молнии в землю.

3.43 **удельная энергия *W/R*:** Интеграл квадрата тока молнии по времени для полной продолжительности вспышки.

Примечание — Удельная энергия представляет собой энергию, рассеянную при помощи тока молнии в удельном сопротивлении.

3.44 **уровень защиты от напряжения U_p:** Параметр, характеризующий способность устройства защиты от перенапряжения ограничивать через свои терминалы напряжение, которое выбирается из перечня рекомендуемых номиналов. Данная величина будет превышать самое высокое значение измеренных предельных напряжений.

3.45 **условное полное сопротивление заземления:** Отношение пиковых значений напряжения заземления и тока заземления, которые в большинстве случаев одновременно не появляются.

3.46 **уровень молниезащиты; УМЗ:** Число, относящееся к набору значений тока молнии, связанных с вероятностью, что соответствующие максимальные и минимальные расчетные параметры не будут превышены при молнии естественного происхождения.

Примечание — Уровень молниезащиты используется для разработки защитных мер в соответствии с набором значений тока молнии.

3.47 **устройство защиты от перенапряжений ЗП:** Устройство, предназначенное для ограничения переходных перенапряжений и отклонения выбросов тока. Оно содержит как минимум один нелинейный элемент.

Примечание — Для линий электропитания подходящий испытательный ток I_{imp} указывается в методике испытаний класса I согласно ГОСТ Р 51992.

3.48 **устройство защиты от перенапряжений, проверенное током I_{imp}:** Устройства защиты от перенапряжений, которые выдерживают неполный ток молнии с обычной формой кривой тока 10/350 мс, должны пройти импульсные испытания соответствующим током I_{imp}.

Примечание — Для линий электропитания подходящий испытательный ток I_{imp} указывается в методике испытаний класса I.

3.49 **устройство защиты от перенапряжений, проверенное током I_n:**
Устройства защиты от перенапряжений, которые выдерживают индуктированный выброс тока молнии с обычной формой кривой тока 8/20 μс и должны пройти импульсные испытания соответствующим током I_n.

Примечание — Для линий электропитания подходящий испытательный ток I_n указывается в методике испытаний класса II согласно ГОСТ Р 51992.

3.50 **частота вспышек молнии в землю N_g:** Количество вспышек молнии на квадратный километр за год в районе, где находится конструкция.

3.51 **электромагнитный импульс от грозовых разрядов:** Электромагнитное воздействие тока молнии.

Примечание — Он включает проведенное грозовое перенапряжение, а также воздействие электромагнитного поля от излученного импульса.

3.52 **эффективная высота *H*:** Высшая точка ветроэнергетической установки, до которой доходят лопасти, т.е. это высота ступицы плюс радиус ротора.

3.53 **эффективность перехвата:** Вероятность, с которой воздушная система перехвата вспышек молнии системы молниезащиты перехватывает вспышку молнии.

4 Обозначения

A_d — площадь сбора вспышек молнии в обособленную конструкцию;
A_l — площадь сбора вспышек молнии в служебную линию;
A_i — площадь сбора вспышек молнии около служебной линии;
A_m — площадь воздействия вспышек молнии около конструкции;
c_s — скрытая теплота плавления;
c_t — общая стоимость конструкции в денежных единицах;
c_w — теплоемкость;
C — средняя величина вероятных потерь;
C_e — коэффициент окружающей среды;
C_d — коэффициент местонахождения;
c_t — поправочный коэффициент для высоковольтного/низковольтного трансформатора, находящегося на служебной линии;
D1 — травмирование живых существ;
D2 — физическое повреждение;
D3 — повреждение электрических и электронных устройств;
h_z — коэффициент, увеличивающий убытки при наличии особой опасности;
i — ток;
I — пиковый ток;
I_n — номинальный испытательный ток; ток разряда;
I_t — ток в защитной оболочке кабеля;
I_{imp} — импульсный испытательный ток;
di/dt — производная тока по времени, средняя скорость нарастания;
di/dt — скорость нарастания тока между точками, соответствующими 30 % и 90 % пиковой амплитуды на переднем крае;
L_A — ущерб, связанный с травмированием живых существ;
L_B — ущерб конструкции, связанный с физическим повреждением (вспышки молнии, попадающие в конструкцию);
L_C — ущерб, связанный с повреждением внутренних систем (вспышки молнии, попадающие в служебную линию);
L_M — ущерб, связанный с повреждением внутренних систем (вспышки молнии около конструкции);
L_U — ущерб, связанный с травмированием живых существ (вспышки молнии, попадающие в служебную линию);
L_V — ущерб конструкции, связанный с физическим повреждением (вспышки молнии, попадающие в служебную линию);
L_W — ущерб, связанный с повреждением внутренних систем (вспышки молнии, попадающие в служебную линию);
L_t — ущерб вследствие травмирования из-за напряжения прикосновения и ступенчатого напряжения;
L_o — ущерб вследствие физического повреждения;
L_f — ущерб вследствие повреждения внутренних систем;
L_x — размер ущерба для элемента x;
L_z — ущерб, связанный с повреждением внутренних систем (вспышки молнии около служебной линии);
L1 — потеря человеческой жизни из-за конструкции;
L2 — невыполнение обслуживания населения из-за конструкции;
L3 — ущерб культурному наследию из-за конструкции;
L4 — потеря экономической ценности из-за конструкции;
n_p — число возможных лиц, которым угрожает опасность (жертв);
n_t — количество человек, находящихся в конструкции и подвергающихся воздействию;
N_D — количество опасных случаев из-за вспышек молнии в конструкции в год;
N_x — количество опасных случаев для элемента x в год;
N_d — количество вспышек молнии, попавших в конструкцию в год;
N_m — количество вспышек молнии около конструкции в год;
N_L — количество вспышек молнии, попавших в служебную линию в год;
N_i — количество вспышек молнии около служебной линии в год;

$N_{d,x}$ — количество вспышек молнии, попавших в конструкцию в конце «x» служебной линии в год;
N_g — частота ударов, уходящих в землю, в год;
P_A — вероятность, что вспышки молнии, попадающие в конструкцию, приведут к электрическому удару живых существ;
P_B — вероятность, что вспышки молнии, попадающие в конструкцию, приведут к физическому повреждению;
P_C — вероятность повреждения внутренних систем вследствие вспышек молнии, попадающих в конструкцию;
P_{LD} — вероятность, что вспышки молнии, попадающие в служебную линию, приведут к повреждению внутренних систем;
P_{LI} — вероятность, что вспышки молнии около служебной линии приведут к повреждению внутренних систем;
P_M — вероятность, что вспышки молнии около конструкции приведут к повреждению внутренних систем;
P_{SPD} — вероятность повреждения внутренних систем при использовании устройства защиты от перенапряжений;
P_U — вероятность, что вспышки молнии, попадающие в служебную линию, приведут к травмированию живых существ;
P_V — вероятность, что вспышки молнии, попадающие в служебную линию, приведут к физическому повреждению;
P_W — вероятность, что вспышки молнии, попадающие в служебную линию, приведут к повреждению внутренних систем;
P_x — вероятность повреждения для конструкции элемента;
P_Z — вероятность, что вспышки молнии около служебной линии приведут к повреждению внутренних систем;
r_a — коэффициент ослабления, связанный с типом верхнего слоя грунта;
r_f — коэффициент, уменьшающий ущерб вследствие физического повреждения в зависимости от пожаростойкости;
r_p — коэффициент, уменьшающий ущерб вследствие физического повреждения в зависимости от принимаемых мер предосторожности;
r_u — коэффициент, уменьшающий потери человеческих жизней в зависимости от типа основания площадки;
R — риск;
R — радиус катящейся сферы;
R_S — сопротивление защитной оболочки кабеля на единицу длины;
R_T — допустимый риск;
R_x — элемент риска x;
S — расстояние между заземляющими стержнями;
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 длинного удара молнии;
T_d — грозовые дни;
$u_{a,c}$ — падение напряжения на аноде или катоде;
U_C — напряжение между защитной оболочкой кабеля и проводами;
U_W — импульсное выдерживаемое напряжение;
U_p — уровень защиты от напряжения;
Q — заряд тока молнии;
Q_{flash} — заряд тока вспышки;
Q_{short} — заряд тока короткого удара молнии;
Q_{long} — заряд тока длинного удара молнии;
W/R — удельная энергия,
Z_T — проходное полное сопротивление;
a — 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

ВЭУ — ветроэнергетическая установка;
ЭМС — электромагнитная совместимость;
СМЗ — система молниезащиты;
УМЗ — уровень молниезащиты;
ЗМЗ — зона молниезащиты;
УЗП — устройство защиты от перенапряжений;
ЗЗ — защитное заземление;
УЗС — устройство защиты от сверхтоков;
ТО — техническое обслуживание.

6 Молниевая обстановка для ветроэнергетической установки

6.1 Общие положения

Молниевая обстановка для ВЭУ в зависимости от значений параметров тока молнии, которые необходимо использовать для расчета размеров, анализа и испытаний систем молниезащиты, определяется в ГОСТ Р МЭК 62305-1.

Содержательное описание такого явления как молния по отношению к ВЭУ приводится в приложении А.

6.2 Параметры тока молнии и уровни молниезащиты (УМЗ)

В настоящем стандарте приводятся четыре уровня молниезащиты (I — IV). Для каждого уровня молниезащиты установлен набор минимальных и максимальных значений параметров тока молнии.

Максимальные значения параметров тока молнии относительно уровня молниезащиты I не будут превышены с вероятностью 99 %. Максимальные значения параметров тока молнии относительно уровня молниезащиты I снижаются до 75 % для уровня молниезащиты II и до 50 % — для уровня молниезащиты III и IV (линейное соотношение для I, Q и di/dt, но квадратичное для W/R). Временные параметры неизменны.

Таблица 1 — Максимальные значения параметров молнии в зависимости от уровня молниезащиты (таблица 5 в ГОСТ Р МЭК 62305-1)

Первый короткий положительный удар молнии			Уровень молниезащиты			
Параметры тока	Символ	Единица измерения	I	II	III	IV
Пиковый ток	I	кА	200	150	100	
Заряд короткого удара молнии	Q_{short}	Кл	100	75	50	
Удельная энергия	W/R	Мгдж/Ом	10	5,6	2,5	
Временные параметры	T_1/T_2	мс/мс	10/350			

Окончание таблицы 1

Первый короткий отрицательный удар молнии [a]			Уровень молниезащиты			
Пиковый ток	I	кА	100	75	50	
Средняя скорость нарастания	di/dt	кА/мкс	100	75	50	
Временные параметры	T_1/T_2	мкс/мкс	1/200			
Последующий короткий удар молнии [a]			Уровень молниезащиты			
Параметры тока	Символ	Единица измерения	I	II	III	IV
Пиковый ток	I	кА	50	37,5	25	
Средняя скорость нарастания	di/dt	кА/мкс	200	150	100	
Временные параметры	T_1/T_2	мкс/мкс	0,25 / 100			
Длинный удар молнии			Уровень молниезащиты			
Параметры тока	Символ	Единица измерения	I	II	III	IV
Заряд длинного удара молнии	Q_{long}	Кл	200	150	100	
Временной параметр	T_{long}	с	0,5			
Вспышка молнии			Уровень молниезащиты			
Параметры тока	Символ	Единица измерения	I	II	III	IV
Заряд вспышки	Q_{flach}	Кл	300	225	150	

[a] Данная форма волны используется только для расчетов, а не для испытаний.

Максимальные значения параметров тока молнии для различных уровней молниезащиты приводятся в таблице 1 и используются для проектирования элементов молниезащиты (например, поперечное сечение молниеотводов, толщина металлических пластин, допустимая токовая нагрузка УЗП, изоляция от опасного искрения), а также для определения параметров испытаний, моделирующих влияния молнии на такие элементы (см. приложение D).

Примечание — Для ВЭУ, установленных в областях с большим количеством воздействий восходящих молний, в частности в зимний период, может быть уместным повышение прочности воздушных систем перехвата вспышек молнии (например, приемников) относительно заряда вспышки 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 вспышек молнии.

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

Таблица 2 — Минимальные значения параметров тока молнии и соответствующие радиусы катящейся сферы в зависимости от уровня молниезащиты (таблица 6 в ГОСТ Р МЭК 62305-1)

Критерии перехвата			Уровень молниезащиты			
	Символ	Единица измерения	I	II	III	IV
Минимальный 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

ВЭУ представляют собой высотные конструкции, которые подвержены частому воздействию молниевых ударов. Для ВЭУ необходимо использовать молниезащиту как меру защиты от экономических убытков вследствие повреждения, от снижения дохода, как защиту от опасности для живых существ (главным образом, обслуживающего персонала) и как средство уменьшения объема необходимого техобслуживания.

При проектировании любой системы молниезащиты необходимо учитывать опасность ударов молнии и/или 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 ступенчатого напряжения/напряжения прикосновения или взрывов и пожаров вследствие вспышки молнии.

Задача любой системы молниезащиты — уменьшить опасность до допустимого уровня R_T. Допустимый уровень опирается на допустимый риск, если учитывается безопасность человека. Если риск ниже уровня, допустимого для человека, тогда необходимость в дальнейшей защите может исходить только из экономического анализа, который проводится путем оценки стоимости системы молниезащиты по сравнению со стоимостью повреждения, которое она будет предотвращать.

При проектировании должен быть определен уровень допустимого риска. Характерное значение допустимого риска R_T, когда вспышки молнии вызывают гибель людей или тяжелые травмы, составляет 10^{-5} год$^{-1}$.

Риск попадания вспышек молнии в любую конструкцию зависит от высоты конструкции, местности и уровня молниевой активности в данном месте. Риски, связанные с молнией, могут быть подробно рассмотрены в соответствии с ГОСТ Р МЭК 62305-2. Так как методики, представленные в указанном стандарте, чрезвычайно сложны, в настоящем стандарте приводится упрощенное руководство по оценке воздействия молнии на отдельные ВЭУ, а также распространение полученных результатов на группы ВЭУ и ветроэлектрические станции.

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

Оценка риска зависит от точности введенных в анализ данных, она никогда не будет более точной, чем данные, введенные в расчет. 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 очень точный краткосрочный прогноз количества случаев воздействия молнии на отдельные ВЭУ или ветроэлектрические станции. Оценка риска дает возможность определить уровень снижения риска при использовании молниезащиты и позволяет сравнить риски для различных проектов ВЭС (см. приложение В).

7.2 Оценка частоты влияния вспышек молнии на ветроэнергетическую установку

Первый этап анализа риска возникновения молнии — оценка частоты попадания вспышек молнии в ВЭУ. В ГОСТ Р МЭК 62305-2 приводится руководство, как получить данную информацию. Для оценки частоты попадания вспышек молнии в конструкцию необходим комплект данных, включающий частоту вспышек в землю (N_g).

Примечание — Как правило, федеральные организации, такие как метеобюро, располагают такой информацией.

Если нет данных о частоте вспышек молнии в землю, то их рекомендуется получить, используя следующую зависимость:

$$N_g \approx 0{,}1 \quad T_d, \tag{1}$$

где N_g — среднегодовая частота вспышек молнии в землю, км$^{-2}$·год$^{-1}$;

T_d — количество грозовых дней в год, полученное при помощи изокераунических карт (обычно имеющихся в национальных метеостанциях), год$^{-1}$.

Среднегодовое количество опасных явлений для ВЭУ можно разделить на следующие группы:

- N_D — частота попадания вспышек молнии в ВЭУ, год$^{-1}$;
- N_M — частота попадания вспышек молнии около ВЭУ (в пределах 250 м), год$^{-1}$;
- N_L — частота попадания вспышек молнии в служебные линии, подведенные к ВЭУ, т. е. кабель электропитания и кабель связи, подведенные к ВЭУ, год$^{-1}$;
- N_I — частота попадания вспышек молнии около служебных линий, подведенных к ВЭУ, т. е. кабель электропитания и кабель связи, подведенные к ВЭУ, год$^{-1}$;
- $N_{D,b}$ — частота попадания вспышек молнии в ВЭУ или другую конструкцию на (другом) конце «b» служебных линий, подведенных к рассматриваемой ВЭУ, год$^{-1}$.

Среднегодовую частоту попадания вспышек молнии в ВЭУ можно получить следующим образом

$$N_D = N_g \cdot A_d \cdot C_d \cdot 10^{-6}, \tag{2}$$

где A_d — площадь сбора информации о частоте попадания вспышек молнии в конструкцию, м^2;

C_d — коэффициент окружающей среды.

Подходящие значения: C_d = 1 для ВЭУ, расположенных на равнинной местности, и C_d = 2 для ВЭУ на возвышенности или горных хребтах.

Примечание

1 Для ВЭУ, расположенных в местах, часто поражаемых молниями в целом и зимними молниями в частности, можно использовать более высокий коэффициент окружающей среды C_d для учета восходящей молнии, возникающей в таких условиях.

2 Для ВЭУ, расположенных на прибрежной территории, можно использовать коэффициент окружающей среды C_d, равный 3 — 5, для получения реального расчета частоты касания молнией.

Площадь сбора информации о частоте попадания вспышек молнии в конструкцию — это площадь земной поверхности, на которую приходится такая же годовая частота попадания вспышек молнии в землю, что и в конструкцию. Для изолированных конструкций соответствующая площадь сбора информации о частоте попадания вспышек молнии — это площадь, имеющая пограничную линию, полученную при пересечении линии земной поверхности и прямой линии под наклоном 1:3, проходящей через верхнюю точку конструкции (касаясь ее) и оборачивающейся вокруг нее.

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

На рисунке 1 показана площадь сбора информации о частоте попадания вспышек молнии для ВЭУ на равнинной местности. Это круг радиусом в три раза больше высоты ВЭУ.

Следовательно, при расчете годового количества попадания вспышек молнии в ВЭУ, расположенную на равнинной местности можно использовать следующее уравнение

$$N_d = N_g \cdot A_d \cdot 10^{-6} = N_g \cdot 9\pi \cdot H^2 \cdot 10^{-6}, \tag{3}$$

где H — высота ВЭУ, м.

Для более сложного рельефа местности целесообразно рассматривать эффективную высоту ВЭУ с учетом высоты нахождения ВЭУ, например, если она установлена на возвышенностях или хребтах (см. рисунок 2).

Кроме того, для ВЭУ могут представлять опасность вспышки молнии около ВЭУ:

$$N_M = N_g \quad (A_m - A_d C_d) \cdot 10^{-6}, \tag{4}$$

где A_m — площадь сбора ударов молнии около конструкции, м^2; т. е. это участок протяженностью 250 м.

При использовании для ВЭУ и служебных линий, подведенных к ней, соответствующей молниезащиты можно предположить, что данная защита также включает защиту от повреждений ВЭУ при возникновении ударов молнии около ВЭУ и около служебных линий, подведенных к ней.

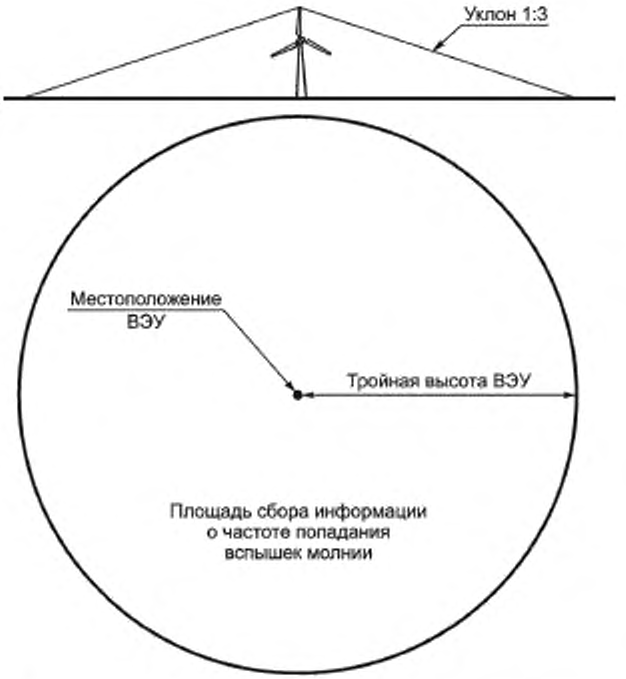


Рисунок 1 — Площадь сбора информации о частоте попадания вспышек молнии в ВЭУ

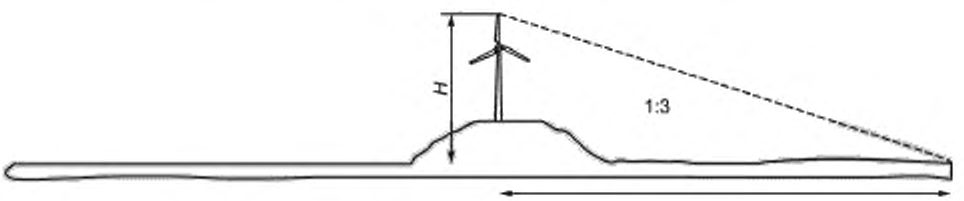


Рисунок 2 — Эффективная высота (*H*) ВЭУ, расположенной на возвышенности

Большие ВЭУ обычно подсоединены к высоковольтному токоприемнику, а также к внешнему центру управления через линию связи, и на обе эти служебные линии могут оказывать влияние вспышки молнии, попадающие в служебные линии или около них (см. рисунок 3). Если линия связи является волоконно-оптическим соединением (рекомендовано), то риск повреждения линии связи вследствие воздействия молнией можно не учитывать.

Количество вспышек молнии, попавших в служебную линию, подведенную к ВЭУ, можно вычислить по формуле

$$N_L = C_d \cdot C_t \cdot N_g \cdot A_l \cdot 10^{-6}. \quad (5)$$

Количество вспышек молнии около служебной линии (т.е. достаточно близко, чтобы повредить линию) можно вычислить по формуле

$$N_L = C_e \cdot C_t \cdot N_g \cdot A_l \cdot 10^{-6}, \quad (6)$$

где C_d — это коэффициент местонахождения:

1 — для равнинной местности;

2 — для холмистой местности;

C_e — коэффициент окружающей среды, который равен 1 для сельской местности;

C_t — трансформаторный коэффициент;

A_l — площадь сбора информации о частоте попадания вспышек молнии, попадающих в служебную линию, м^2 (см. таблицу 3);

A_i — площадь сбора информации о частоте попадания вспышек молнии около служебной линии, м^2 (см. таблицу 3).

Трансформаторный коэффициент равен C_t =1, если нет трансформатора между точкой касания молнией и ВЭУ, и C_t = 0,2, если таковой имеется. Учитывая, что обычно высоковольтный трансформатор устанавливается на больших ВЭУ, для кабелей промежуточного напряжения, подсоединяющих ВЭУ к сети можно использовать C_t = 0,2.

Примечание — C_d = 0 для подводящих служебных линий (подводных высоковольтных кабелей и кабелей связи).

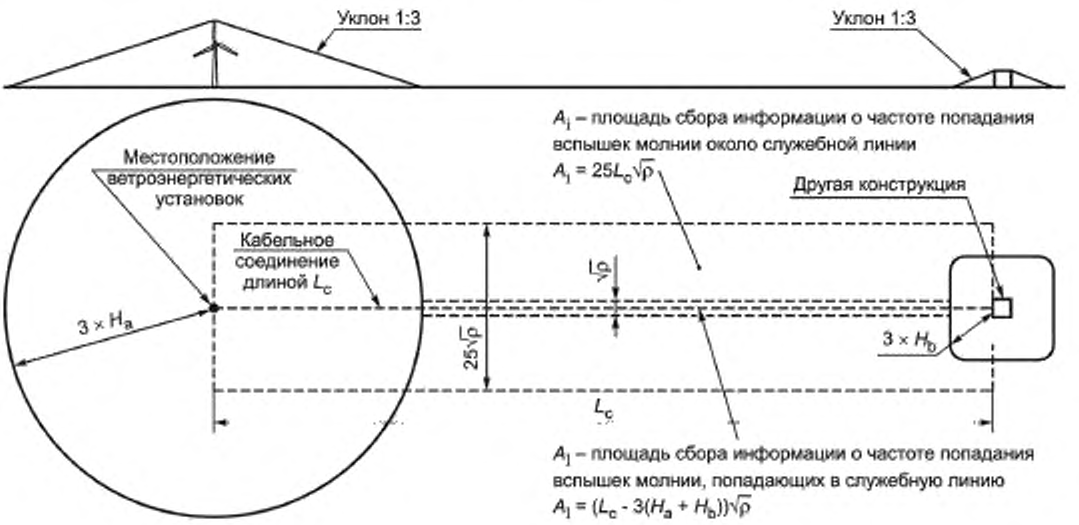


Рисунок 3 — Площадь сбора информации о частоте попадания вспышек молнии, попадающих в ВЭУ высотой H_a и другую конструкцию высотой H_b, соединенную при помощи подземного кабеля длиной L_c

Таблица 3 — Площади сбора информации о частоте попадания вспышек молнии A_l и A_i для служебной линии в зависимости от расположения — надземного или подземного

Площади сбора ударов молнии	Надземное положение	Подземное положение
A_l	$(L_c - 3(H_a + H_b)) 6 H_c$	$(L_c - 3(H_a + H_b)) \sqrt{\rho}$
A_i	1000 L_c	25 $L_c \sqrt{\rho}$

Примечание — В настоящей таблице используются следующие обозначения:

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

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

H_b, м — высота ВЭУ (или другой конструкции), подсоединенной к концу «b» служебной линии;

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

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

Вспышки молнии внутри узкой площади A_1 вдоль кабельной магистрали могут проникать и напрямую воздействовать на кабель, в то время как вспышки молнии внутри более широкой площади A_i могут вызывать появление переходного напряжения и образование точечных пробоев в изоляции кабеля.

Примечание — На ВЭС площади сбора информации о частоте вспышек молнии, попадающих в соседние ВЭУ, могут часто накладываться друг на друга. В таких случаях площади сбора информации о частоте попадания вспышек молнии следует просто поделить между ВЭУ в местах пересечения линий уклона, выходящих из верхней точки ВЭУ.

7.3 Оценка риска повреждения

7.3.1 Основное уравнение

Риск повреждения вследствие попадания молнии в конструкцию ВЭУ, а следовательно и риск финансовых потерь можно рассматривать как сумму множества элементов риска. Каждый элемент риска может быть выражен в виде следующего общего уравнения

$$R_X = N_X \cdot P_X \cdot L_X, \quad (7)$$

где N_X — количество опасных явлений в год, год$^{-1}$;

P_X — вероятность повреждения конструкции (функция различных мер защиты);

L_X — потери вследствие повреждения.

Данное основное уравнение должно использоваться для оценки риска повреждения на основе вероятности повреждений различных типов и потерь вследствие повреждения (см. приложение В).

Если вычисленный риск слишком высок, необходимо принять меры защиты для снижения риска ниже допустимого уровня R_T

$$R_X \le R_T. \quad (8)$$

Примечание — Допустимый риск R_T может быть установлен уполномоченными лицами.

7.3.2 Оценка элементов риска, связанного с попаданием вспышек молнии в ветроэнергетическую установку (S1)

Для оценки элементов риска попадания вспышек молнии в ВЭУ используется следующее соотношение:

- элемент, связанный с нанесением травм живым существам (D1)

$$R_A = N_D \cdot P_A \cdot L_A; \quad (9)$$

- элемент, связанный с физическими повреждениями (D2)

$$R_B = N_D \cdot P_B \cdot L_B; \quad (10)$$

- элемент, связанный с повреждением внутренних систем (D3)

$$R_C = N_D \cdot P_C \cdot L_C. \quad (11)$$

Параметры для оценки этих элементов риска приведены в таблице 4.

7.3.3 Оценка элемента риска, связанного с попаданием вспышек молнии в непосредственной близи от ветроэнергетической установки (S2)

Для оценки элемента риска, связанного с попаданием вспышек молнии около ВЭУ, используется следующее соотношение

- элемент, связанный с повреждением внутренних систем (D3)

$$R_M = N_M \cdot P_M \cdot L_M. \quad (12)$$

Параметры для оценки этих элементов риска приведены в таблице 4.

7.3.4 Оценка элементов риска, связанных с попаданием вспышек молнии в служебную линию, подведенную к ветроэнергетической установке (S3)

Для оценки элементов риска, связанных с попаданием вспышек молнии во входящую служебную линию, подведенную к ВЭУ, используется следующее соотношение:

- элемент, связанный с травмированием живых существ (D1)

$$R_U = (N_L + N_{D,b}) \cdot P_U \cdot L_U; \quad (13)$$

- элемент, связанный с физическими повреждениями (D2)

$$R_V = (N_L + N_{D,b}) \cdot P_V \cdot L_V; \quad (14)$$

- элемент, связанный с повреждением внутренних систем (D3)

$$R_W = (N_L + N_{D\,b}) \cdot P_W \cdot L_W. \quad (15)$$

Параметры для оценки этих элементов риска приведены в таблице 4.

7.3.5 Оценка элемента риска, связанного с попаданием вспышек молнии около служебной линии, подведенной к ветроэнергетической установке (S4)

Для оценки элемента риска, связанного с попаданием вспышек молнии около служебной линии, подведенной к ВЭУ, используется следующее соотношение:

- элемент, связанный с повреждением внутренних систем (D3)

$$R_Z = (N_I + N_L) \cdot P_Z \cdot L_Z. \quad (16)$$

Если $(N_I - N_L) < 0$ при проведении данной оценки, то $(N_I - N_L) = 0$.

Параметры для оценки этих элементов риска приведены в таблице 4.

Таблица 4 — Параметры, имеющие отношение к оценке элементов риска для ВЭУ

Параметры	Среднегодовое количество опасных случаев из-за вспышек молнии
N_D, год[1]	в ВЭУ
N_M, год$^{-1}$	около ВЭУ
N_L, год$^{-1}$	в служебную линию, входящую в ВЭУ
N_I, год$^{-1}$	около служебной линии, входящей в ВЭУ
$N_{D,b}$, год$^{-1}$	в конструкцию на конце «b» служебной линии (см. рисунок 3)
	Вероятность, что удар, попадающий в ВЭУ, приведет к:
P_A	электрическому удару живых существ
P_B	физическому повреждению
P_C	повреждению внутренних систем
	Вероятность, что удар около ВЭУ приведет к
P_M	повреждению внутренних систем
	Вероятность, что удар, попадающий в служебную линию, приведет к:
P_U	травмированию живых существ
P_V	физическому повреждению
P_W	повреждению внутренних систем
	Вероятность, что удар около служебной линии приведет к
P_Z	повреждению внутренних систем
	Убытки вследствие:
$L_A = L_U = r_a \cdot L_t$	травмирования живых существ
$L_B = L_V = r_p \cdot r_f \cdot h_z \cdot L_f$	физического повреждения
$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_o$	повреждения внутренних систем

Примечание — Величины убытков L_t; L_f; L_o; коэффициентов r_p, r_a, r_u, r_f, снижающих убытки, и коэффициента h_z, увеличивающего убытки, приводятся в приложении В.

8 Молниезащита отдельных элементов ветроэнергетической установки

8.1 Общие положения

Если не указано иначе вследствие проведенного анализа рисков, то все элементы должны быть защищены в соответствии с УМЗ-I.

Для соответствия срока службы, определенному в УМЗ, возможно потребуется проведение техобслуживания и проверок, которые могут быть различными в зависимости от местных условий. Требования к техобслуживанию и проверкам по системе молниезащиты, включая систему заземления, должны быть приведены в руководстве по эксплуатации и ТО. Методы проведения техобслуживания и проверок приводятся в разделе 12.

Примечание — При проведении подробного анализа рисков может выясниться, что уровень защиты ниже УМЗ-I является экономически оптимальным для некоторых ВЭУ или ветроэлектрических станций, в то время как может быть предпочтительно устанавливать различные УМЗ, для различных элементов ВЭУ, например, лопасти могут иметь более высокий УМЗ, а другие части, ремонтопригодные или заменяемые по более низкой цене, могут иметь более низкий уровень молниезащиты.

8.2 Лопасти

8.2.1 Общие положения

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

Лопасти ВЭУ, находящиеся в зоне молниезащиты 0_A по ГОСТ Р МЭК 62305-1, должны быть соответствующим образом защищены.

Основные положения, касающиеся молниезащиты лопастей, приведены в приложении С.

8.2.2 Требования

Молниезащита должна быть достаточной для выдерживания лопастями ударов молнии с УМЗ-I (если анализ рисков не показал, что уровень УМЗ-II или УМЗ-III является достаточным) без повреждений конструкции, которые бы привели к ослаблению функционирования лопасти.

Повреждения вследствие поражения молнией не должны приводить к потере работоспособности лопастей до следующего запланированного периода технического обслуживания и осмотра.

8.2.3 Проверка

Способность воздушной системы молниезащиты и вертикального молниеотвода к перехвату вспышек молнии и проведения тока молнии должна быть подтверждена одним из следующих методов:

а) испытания высоким током и высоким напряжением в соответствии с 8.2.5;

б) демонстрация сходства типа лопасти (конструкции) с проверенным ранее типом лопасти или же с типом лопасти, обладающим документально подтвержденной эффективной молниезащитой;

в) использование методов анализа, ранее проверенных путем сравнения с результатами испытаний или же со средствами защиты лопасти, которые имели удачный опыт эксплуатации.

Для проведения проверки на основе сходства в соответствии с б) лопасти должны иметь одинаковый состав материала, одинаковую систему молниезащиты и одинаковые конструктивные размеры. Значительные изменения, которые влияют на восприимчивость молнии, не допускаются без проверки. Однако проводить повторные оценки рисков, которые будут идентичны оценкам по ранее проверяемым конструкциям лопасти, не следует.

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

8.2.4 Рассмотрение защитных мер

В следующих подпунктах описываются вопросы, которые являются важными для конструкции и объединения систем молниезащиты, имеющих отношение к лопасти.

8.2.4.1 Воздушная система молниезащиты

Воздушные системы молниезащиты размещаются на поверхностях лопасти в месте, где соединительные лидеры могут образоваться и привести к попаданиям вспышек молнии или пробоям, если нет воздушной системы перехвата вспышек молнии. Воздушные системы молниезащиты могут быть частью самой конструкции лопасти, элементами, добавленными к лопасти, или их объединением.

Средства позиционирования воздушной системы молниезащиты (катящаяся сфера, защитный угол и т. п.) не применяются для лопастей ВЭУ. Поэтому конструкция воздушной системы молниезащиты должна быть проверена в соответствии с 8.2.3.

Примечание — В международной практике для более подробной информации по средствам позиционирования воздушной системы молниезащиты ВЭУ используют стандарт [1].

Производитель должен гарантировать, что воздушная система молниезащиты надлежащим образом зафиксирована в своем креплении, и спроектировать воздушную систему молниезащиты таким образом, чтобы она могла выдержать предполагаемые воздействия ветра, влаги, частиц пыли и т.п. В рамках данной проверки необходимо установить наличие элементов молниезащиты в готовой лопасти до проведения испытания на выносливость и других механических испытаний.

Все внутренние части воздушной системы молниезащиты, крепление устройств воздушного перехвата и соединения с вертикальным молниеотводом должны снижать риск получения внутренних разрядов (например, от стримеров и лидеров), образующихся в этих частях.

Производитель должен создать воздушную систему молниезащиты таким образом, чтобы обслуживающий персонал мог отремонтировать или заменить ее части, поврежденные или изношенные вследствие воздействия молнии или других факторов окружающей среды. Устройства воздушной системы молниезащиты подвержены в процессе эксплуатации износу вследствие эрозии в местах прохождения «ножек» дуги молнии. Эрозия зависит от заряда, входящего через ножку (ножки) дуги молнии, а также материала поверхности и геометрии воздушной системы перехвата ударов молнии. Для лопастей, которые принимают большое количество ударов молнии, может потребоваться с течением времени замена устройств воздушного перехвата ударов молнии. Срок службы воздушной системы молниезащиты должен быть максимальным и обеспечен тщательным выбором ее материала и конструкции. Производитель должен предоставить руководство по проверке и обслуживанию воздушной системы перехвата ударов молнии.

Если воздушная система молниезащиты имеет покрытие, то его работоспособность и ремонтопригодность в течение срока службы должны сохраняться. Рекомендуемые испытания для определения эффективности устройств воздушного перехвата ударов молнии приведены в приложении D.

Производитель должен определить способ регулярной проверки воздушных систем перехвата ударов молнии, чтобы установить и следить за расчетными сроками службы и периодичностью технического обслуживания/замены.

Проверку эффективности воздушной системы молниезащиты проводят согласно 8.2.3.

8.2.4.2 Система вертикальных молниеотводов и ее соединительные элементы

Система вертикальных молниеотводов и ее соединительные элементы являются системой для прохождения тока молнии от воздушной системы перехвата ударов молнии до его вывода на конце комеля лопасти.

Соединения с системой вертикальных молниеотводов должны быть жесткими и постоянными и гарантированно обеспечивать устойчивость системы в целом к совместному электрическому, тепловому и электродинамическому воздействию тока молнии. Способность систем молниезащиты выдерживать механические нагрузки на лопасти должна быть проверена на основе соответствующих испытаний.

Примечание — В международной практике способность систем молниезащиты выдерживать механические нагрузки на лопасти проверяется согласно стандарту [2].

Поперечное сечение вертикального молниеотвода и естественные токопроводящие части лопасти, используемые в качестве вертикального молниеотвода, должны обладать способностью проводить ток молнии в соответствии с выбранным УМЗ.

Примечание — В международной практике в большинстве случаев металлические молниеотводы должны быть выбраны в соответствии со стандартом [1].

Испытания элементов соединения должны проводиться без доведения до необходимого состояния/старения. Контрольные уровни тока должны быть установлены в соответствии с первым коротким ударом молнии выбранного УМЗ. Если используются не жесткие соединения, такие как вращающиеся звенья, подшипники или искровые зазоры, то испытание также необходимо провести с наложением тока длинного удара молнии. Если существует несколько путей для прохождения тока молнии, то амплитуды испытательного тока для каждого пути могут быть вычислены в соответствии с распределением тока по путям.

Примечание — В международной практике — в соответствии со стандартом [3].

Все внутренние части вертикального молниеотвода и элементов соединения должны минимизировать риск внутренних разрядов, образующихся из этих частей. Целью является воспрепятствование образованию электрических разрядов из каких-либо еще конструкций помимо внешней воздушной системы перехвата вспышек молнии; тем самым ограничивается риск формирования таких внутренних разрядов, пробивающих поверхность лопасти.

Вертикальные молниеотводы, установленные снаружи, определяются как воздушные системы перехвата вспышек молнии, следовательно, на них накладываются требования в соответствии с 8.2.4.1.

Производитель должен установить способ регулярной проверки любых частей системы вертикальных молниеотводов и ее соединительных элементов, которые могут износиться в процессе эксплуатации для того, чтобы следить за состоянием, расчетными сроками службы и периодичностью технического обслуживания этих частей.

Рекомендуемые испытания для определения характеристик вертикальных молниеотводов и соединительных элементов описаны в приложении D.

Проверка системы вертикальных молниеотводов и ее соединительных элементов должна проводиться согласно 8.2.3.

8.2.4.3 Дополнительные токопроводящие элементы

В случае присутствия в лопасти дополнительных токопроводящих элементов: токопроводящие конструкционные элементы, углеродный композиционный материл, балансиры, тормозные тросы концевой части лопасти, электрические кабели датчиков, сигнальные лампы и т. п., они, как правило, должны быть соединены проводниками с системой молниезащиты. Данные проводники должны проводить приходящуюся на них долю (доли) тока молнии, а также предотвращать искрение между токопроводящими элементами.

Необходимость соединения металлическими проводниками указанных токопроводящих элементов лопасти друг с другом или с системой молниезащиты должна быть установлена на основе испытаний в соответствии с УМЗ и/или выполнения соответствующего анализа.

Система с дополнительными токопроводящими элементами должна быть проверена испытанием высоким током в соответствии с 8.2.5.2.

Если молниеотводы в лопасти образуют пути для прохождения прямого тока, такие молниеотводы должны соединяться согласно ГОСТ Р МЭК 62305-1, при этом необходимо учесть воздействие на них электродинамических сил.

8.2.4.4 Воздействия электрических полей на конструкцию из композиционного материала

Вследствие высокого расположения и незащищенности лопастей ВЭУ вся конструкция лопасти будет 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 композиционных материалов. Поэтому системы молниезащиты должны быть разработаны исходя из принципов разработки высоковольтной изоляции.

8.2.5 Методы испытаний

Следующие методы испытаний используются для всей конструкции лопасти или ее частей, таких как концевые части лопасти или многослойные образцы.

8.2.5.1 Испытания высоким напряжением

Эффективность перехватывания воздушных систем перехвата вспышек молнии на лопасти можно определить при помощи испытания на касание лидером, как описано в D.2.1 (приложение D).

Для разработки определенных деталей конструкции вокруг приемников на конце лопасти, боковых приемников и т.п. может оказаться полезным проведение испытания на приложение исходного лидера, описанного в D.2.1 (приложение D).

Улучшить способность слоистого материала лопасти к повышению сопротивления внутренним разрядам и к предотвращению пробивания ими поверхности лопасти можно путем повышения у материала напряженности электрического поля при пробое. *Напряженность электрического поля при пробое у изоляционных композиционных материалов и слоев покрытия можно определить в соответствии с ГОСТ Р 50532 (переменный ток) ГОСТ 13526 (покрытие).*

Примечание — В международной практике при определении напряженности электрического поля при пробое также используют стандарты [4], [5].

Когда на изоляционных поверхностях (стримеры, искрения на поверхности и т. п.) наблюдается электрическая активность, поверхность может испортиться вследствие действия блуждающего тока и электрической эрозии. Воздействия, связанные с влагой, могут изменить свойства изоляционных поверхностей в сторону более высокой токопроводности и поэтому повышать риск прямого касания молнией.

Примечание — В международной практике сопротивление действию блуждающего тока у различных материалов лопасти и материалов покрытия можно оценить и сравнить, используя стандарт [6].

8.2.5.2 Испытания высоким током

На воздушные системы перехвата вспышек молнии будет оказывать сильное воздействие заряд вспышки молнии (т. е. интеграл тока молнии по времени) — явление, которое можно оценить помощью испытания на физическое повреждение высоким током, описанного в D.3 (приложение D).

Элементы соединений и части вертикального молниеотвода могут пройти испытание на физическое повреждение высоким током в соответствии с D.3 (приложение D) без доведения элементов до необходимого состояния/старения.

Формы кривой и уровни испытательного тока должны включать первый короткий удар молнии, а также, если необходимо, длинный удар молнии (непрерывный ток), установленные для выбранного УМЗ.

8.3 Гондола и другие элементы конструкции

8.3.1 Общие положения

Молниезащита гондолы и других элементов конструкции ВЭУ должна быть создана на основе самых больших металлических конструкций, по мере возможности, для воздушного перехвата ударов молнии, эквипотенциализации, экранирования и прохождения электрического тока к системе заземления. Дополнительные элементы молниезащиты, такие как воздушные системы перехвата ударов молнии для защиты метеорологических приборов и предупредительной световой сигнализации, расположенных на гондоле, а также вертикальные молниеотводы и элементы металлизации должны быть поделены на зоны молниезащиты — ЗМЗ (приложение Е).

Примечание — В международной практике элементы металлизации должны иметь размеры согласно стандарту [1].

8.3.2 Ступица

Ступица больших ВЭУ представляет собой полую металлическую сферу диаметром два-три метра. Таким образом, сама толщина материала обеспечивает устойчивость конструкции ступицы к воздействию молнии. В большинстве случаев электрические системы, механические системы управления и приводы размещаются в ступице, а кабели выведены наружу из ступицы к лопастям и гондоле. Ступица должна быть заключена в клетку Фарадея, создающую магнитные экраны в отверстиях ступицы в сторону лопастей, передней части и гондолы (т.е. ступица должна быть определена 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 определенной молниезащиты. Молниезащита ступицы тогда сводится к эквипотенциальной металлизации 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. Т. к. модель вращающейся сферы будет всегда показывать, что существует вероятность касания молнией переднего края обтекателя, то следует рассмотреть вопросы молниезащиты. В некоторых конструкциях ВЭУ электрические системы, механические системы управления и приводы также находятся с наружной стороны ступицы и имеют обтекатель. Такие системы должны быть экранированы от касания молнией с помощью воздушных систем перехвата вспышек молнии. Для случаев, когда под обтекателем не размещаются указанные системы, может оказаться целесообразным допущение риска пробивания обтекателя и отсутствие молниезащиты обтекателя. Однако в большинстве случаев простая и практичная молниезащита обтекателя может быть создана с помощью металлической опорной конструкции для обтекателя, выступающей в качестве воздушной системы перехвата вспышек молнии и соединения ее со ступицей.

8.3.4 Гондола

Конструкция гондолы должна быть частью системы молниезащиты. Она должна гарантировать, что молния при касании гондолы коснется либо обычных металлических частей, способных выдержать нагрузку, либо воздушной системы молниезащиты, созданной специально для этой цели. Гондолы, имеющие кожух из стеклопластика или подобного материала, должны иметь воздушную систему молниезащиты и вертикальные молниеотводы, образующие клетку вокруг гондолы.

Воздушная система молниезащиты, включающая открытые проводники в этой клетке, должна выдерживать удары молнии, соответствующие выбранному УМЗ. Другие проводники в клетке Фарадея должны быть такого размера, чтобы выдержать часть токов молнии, которые будут на них воздействовать. Воздушные системы молниезащиты для защиты приборов и т. п., расположенных с наружной стороны гондолы, должны быть разработаны в соответствии с принятыми нормами, а вертикальные молниеотводы должны быть подсоединены к вышеуказанной клетке.

Примечание — В международной практике воздушные системы молниезащиты для защиты приборов разрабатывают согласно стандарту [1].

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. Или же все цепи внутри гондолы могут быть размещены внутри закрытых металлических трубопроводов или кабельных коробок и т. п. Система эквипотенциальной металлизации должна быть создана таким образом, чтобы она охватывала основные металлические конструкции внутри и на гондоле, как это требуется по электротехническим правилам и нормам. При этом она будет образовывать эффективную эквипотенциальную поверхность, к которой должны подходить все соединения заземления и эквипотенциальной металлизации.

При касании молнией лопастей токи молнии должны по возможности проходить в вышеупомянутую клетку напрямую, полностью предотвращая, таким образом, прохождение тока молнии через подшипники механизма регулирования наклона лопасти и подшипники приводного механизма (см. 8.2 и 8.4 с рассмотрением защиты лопастей и подшипников). Обычно для увода токов молнии от подшипников используются различные типы щеточных систем. 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.

Примечание — Корпус гондолы с таким магнитных экраном не будет способен создать защиту от воздействия магнитных полей, создаваемых токами молнии, проходящими внутри гондолы, а именно в главном валу.

8.3.5 Мачта

Пустотелая стальная мачта, используемая для больших ВЭУ, обычно соответствует размерам, необходимым для вертикальных молниеотводов. Пустотелая стальная мачта может считаться клеткой Фарадея с практически идеальным электромагнитным экраном, т. к. электромагнитное поле является почти замкнутым в месте соединения с гондолой и на поверхности земли. Поэтому в большинстве случаев целесообразно обозначить внутреннюю часть мачты как зону молниезащиты ЗМ31 или ЗМ32. Для того, чтобы мачта образовывала максимально замкнутое поле, по всей длине вдоль фланцев между частями мачты должен проходить прямой электрический контакт. Через мачту и все ее основные металлические части должен проходить защитный заземляющий провод и системы эквипотенциальной металлизации для создания наилучшей защиты, предоставляемой клеткой Фарадея. Что касается металлизации металлических конструкций и систем внутри мачты, таких как лестницы, провода и направляющие, то нужно руководствоваться 9.3.5.

Примечание — В международной практике используются указания по соответствию пустотелой стальной мачты размерам, необходимым для вертикальных молниеотводов, приведенные в стандарте [1].

Привод с гондолой обычно закрывается металлическими листами и заслонками, которые также могут служить в качестве электромагнитного экрана, закрывающего мачту (см. 8.4.2 с описанием молниезащиты подшипников механизма установки на ветер). Привод мачты и системы заземления описаны в разделе 9. Если мачта имеет конструкцию в виде клетки Фарадея, то для содержимого мачты не требуется определенной молниезащиты. Молниезащита мачты тогда будет сводиться к эквипотенциальной металлизации и защите от переходного напряжения цепей электрических систем и систем управления, уходящих в другие ЗМЗ, такие как гондола и наружная часть мачты.

Решетчатые мачты обычно не считаются эффективной клеткой Фарадея, хотя внутри решетчатой мачты магнитное поле немного ослабевает, а ток молнии снижается. Целесообразно считать внутреннюю часть решетчатой мачты уровнем ЗМЗ 0_B. Вертикальное отведение молнии должно осуществляться через конструкционные элементы решетчатой мачты, которые должны в свою очередь соответствовать размерам, необходимым для вертикальных молниеотводов, с учетом перераспределения тока по параллельным путям. Оболочки кабелей в решетчатых мачтах во избежание пробоев кабельной изоляции рекомендуется металлизировать с мачтой через определенные интервалы, которые следует определить путем расчетов (см. ГОСТ Р МЭК 62305—2 (приложение D)).

Примечание — В международной практике размеры вертикальных молниеотводов определяют согласно стандарту [1].

В стальных железобетонных конструкциях арматура может использоваться для вертикального отведения молнии при помощи двух — четырех параллельных вертикальных соединений с достаточным поперечным сечением, которые соединяются 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 мачты, если выполнить металлизацию указанным выше образом.

8.3.6 Методы испытаний

Методы предварительных испытаний включены в приложение D.

8.4 Механический приводной механизм и система рыскания

8.4.1 Общие положения

ВЭУ обычно имеет подшипники для обеспечения поворота лопастей, вращения главного вала, работы редуктора, генератора и системы установки на ветер.

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 осмотреть подшипники и оценить их состояние невозможно, 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. Если подшипник не способен функционировать в течение всего расчетного срока службы, необходимо обеспечить его защиту (см. 8.4.4).

8.4.3 Гидравлические системы

Если гидравлические системы находятся на пути прохождения тока молнии, необходимо убедиться, что воздействие тока молнии не нанесет вред системе. При проектировании гидравлических систем необходимо учитывать риск протечек жидкости вследствие повреждения соединительных элементов и воспламенения гидравлического масла.

Защитные меры в виде скользящих контактов или металлизационных перемычек могут использоваться для направления тока в обход приводных цилиндров.

Гидравлические патрубки, подвергающиеся воздействию тока молнии, должны быть защищены от проникновения тока. Если гидравлические патрубки имеют механическую защитную оболочку, она должна быть металлизирована со стальной конструкцией оборудования на обоих концах патрубка. Также необходимо убедиться, что у защитной оболочки достаточное поперечное сечение для проведения части тока молнии, который может на них воздействовать.

Подобные меры можно использовать для охлаждающих систем.

8.4.4 Искровые зазоры и скользящие контакты

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

Искровые зазоры и скользящие контакты должны быть способны проводить ток молнии, который может воздействовать на ВЭУ.

Искровые зазоры и скользящие контакты должны сохранять требуемые рабочие характеристики, несмотря на влияния внешней среды, такие как дождь, лед, загрязнение солью, пылью и т. п.

Если используются искровые зазоры и скользящие контакты, то их следует рассматривать как изнашиваемые элементы, и интервалы между проведением техобслуживания необходимо рассчитать и задокументировать. Искровые зазоры и скользящие контакты необходимо регулярно осматривать в соответствии с руководствами по ТО и эксплуатации.

8.4.5 Испытания

Все системы для защиты подшипников и приводных систем должны выполнять документально зафиксированные функции. Рекомендуется проводить испытания импульсным током, представляющим естественный ток молнии.

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

Необходимо доказать, что защитная система способна выдержать разрушительное действие первого удара молнии вместе с током длинного удара молнии.

Если скользящие контакты используются как часть системы, то должны быть проведены механические испытания для подтверждения устойчивости системы, обращая особое внимание на изнашивание контакта из-за эрозии от тока молнии. Изнашивание должно быть незначительным для беспрепятственного функционирования между проведениями плановых ТО.

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

Методы испытаний приведены в D.3.4 (приложение D).

8.5 Электрические низковольтные системы, а также электронные системы и установки

8.5.1 Общие положения

Настоящий раздел касается защиты электрических систем и систем управления ВЭУ от воздействия:

- вспышек молнии, касающихся ВЭУ;
- токов лидера, исходящих от ВЭУ;
- непрямых вспышек молнии (т.е. воздействие через электромагнитный импульс от грозовых разрядов, который не воздействует на ВЭУ напрямую).

Примечания

1 Переходные перенапряжения и выбросы вследствие коммутационных операций в электрических системах (коммутационный электромагнитный импульс) должны также учитываться. Однако это выходит за рамки настоящего стандарта. Для получения общей информации см. приложение F, касающееся коммутационных перенапряжений. В 8.5.6.9 и F.7 приложения F приводится информация по выбору УЗП с учетом перенапряжений, создаваемых внутри ВЭУ.

Все типы вспышек молнии образуют электромагнитные импульсы от грозовых разрядов.

2 Должны соблюдаться общие требования для электрического оборудования установки, приведенные в ГОСТ Р МЭК 60204-1.

8.5.2 Меры защиты от электромагнитного импульса от грозовых разрядов

Электрические системы и системы управления подвергаются повреждениям при воздействии электромагнитного импульса от грозовых разрядов. Поэтому во избежание повреждения данных систем необходимо принять меры защиты от электромагнитного импульса от грозовых разрядов. Для эффективной защиты электрической системы и системы управления ВЭУ от электромагнитного импульса грозовых разрядов требуется систематический подход к представлению зон молниезащиты (ЗМЗ). Система мер защиты от электромагнитного импульса грозовых разрядов входит в общие положения представления зоны молниезащиты для всей ВЭУ, описанного в 8.5.3. Примеры представления зон молниезащиты (ЗМЗ) для ВЭУ приводятся в приложении Е.

Примечание — В международной практике используется подход к представлению ЗМЗ согласно стандарту [7].

Производитель ВЭУ должен разработать систему мер защиты от электромагнитных импульсов грозовых разрядов для всей электрической системы.

Примечания

1 В международной практике производители ВЭУ разрабатывают систему мер защиты от электромагнитных импульсов грозовых разрядов согласно стандарту [7].

2 Можно предположить, что эффективные меры защиты от электромагнитного импульса при воздействии грозовых разрядов также будут предоставлять эффективную защиту от воздействий непрямых вспышек молнии.

Основные меры защиты в системе мер защиты от электромагнитных импульсов грозовых разрядов включают:

- металлизацию (см. 8.5.4);
- магнитное и электрическое экранирование кабелей и кабельная разводка (при монтаже системы) (см. 8.5.5);
- согласованную защиту УЗП (см. 8.5.6);
- заземление (см. раздел 9).

Дополнительные методы включают:

- изоляцию, схемные решения, симметричные схемы, продольное полное сопротивление и т.п.

Что касается системы мер защиты от электромагнитных импульсов от грозовых разрядов, следующая основная информация должна быть представлена в документации (раздел 11):

- определение УМЗ;
- чертежи ВЭУ с указанием УМЗ и их границ;
- электрические схемы с указанием УМЗ, экранов кабелей и точки металлизации экрана кабеля.

Примечание — В международной практике УМЗ определяется в соответствии со стандартом [1].

На рисунках Е.5 и Е.6 (приложение Е) приведены основные примеры представления подобной информации в документации.

8.5.3 Зоны молниезащиты (ЗМЗ)

ВЭУ может быть поделена на физические области, которые примерно определяют уровень влияния вспышки молнии на элементы в данной зоне. Деление ВЭУ на зоны молниезащиты является средством для обеспечения систематической и достаточной защиты всех элементов ВЭУ. Эти зоны молниезащиты (ЗМЗ) определяются в зависимости от того, есть ли вероятность прямого попадания молнии или нет, а также по величине тока молнии и соответствующих магнитных и электрических полей, ожидаемых в данной зоне (таблица Е.1 (приложение Е)). Способы молниезащиты применяются для гарантии того, что элементы, например, оборудование, электрические системы или системы управления, смогут выдержать влияние магнитных и электрических полей, а также ток молнии, который может войти в зону размещения элементов. Например, защита от перенапряжения необходима только для кабелей, идущих из одной зоны в зону с более чувствительными элементами (т. е. от меньшего номера УМЗ к большему номеру УМЗ), тогда как внутренние соединения в зоне могут быть не защищены.

Примечание — Более подробно данный подход описан в стандарте [7] (раздел 4), а также в приложении Е.

Дальнейшее руководство по выполнению требований, приведенных в 8.5.3, приводится в приложении Е.

8.5.4 Эквипотенциальная металлизация внутри ветроэнергетической установки

Использование внутри ВЭУ эквипотенциальной металлизации должно гарантировать, что потенциально опасное искрение не возникнет между токопроводящими частями ВЭУ. Данные эквипотенциальные соединения обеспечивают защиту от напряжения прикосновения и ступенчатого напряжения во время касания молнией. Эквипотенциальные соединения играют важную роль в снижении вероятности повреждения электрических систем и систем управления. Металлизационные соединения с малым сопротивлением предотвращают опасную разность электрических потенциалов между оборудованием внутри ВЭУ.

Для достижения большей эффективности металлизация соединения должна быть максимально использована для больших металлических конструкций ВЭУ (т. е. главным образом для мачты, основания гондолы, рамы гондолы и ступицы). Такие металлизационные шины могут дополнительно снижать уровни магнитного поля, образующиеся вследствие молнии. Например, если металлизационные соединения размещаются между металлическими платформами и стенкой мачты в нескольких местах, рассредоточенных вокруг привода платформы и мачты, то это приведет к образованию эффективного электромагнитного экранирования внутри мачты.

Большинство повреждений систем управления ВЭУ можно предотвратить при помощи эффективной металлизации и экранирования. Дальнейшее подробное рассмотрение металлизации, необходимой для ВЭУ, приводится в приложении G.

8.5.5 Экранирование и кабельная разводка

Экранирование — средство, при помощи которого ослабляется электромагнитное поле. Ослабление электромагнитных полей может существенно снизить уровни напряжений, наводимых на электрические цепи.

Магнитное поле, образующееся внутри ЗМЗ вследствие воздействия вспышек молнии на конструкцию или близко к земле, может быть ослаблено только при помощи пространственного экранирования зоны молниезащиты. Перенапряжения, наводимые на систему управления через соединительные кабели, можно минимизировать либо путем пространственного экранирования, либо разводки кабелей и экранирования (например, экранированные кабели, металлизированные с обоих концов), или же при объединении этих методов.

Следует использовать магнитное экранирование и кабельную разводку в соответствии со стандартом [7] (раздел 4), а также соблюдать общие указания по установке с учетом требований электромагнитной совместимости, приведенных в стандарте [8].

Когда токи молнии проходят через ВЭУ, образуются большие магнитные поля. Если эти изменяющиеся магнитные поля проходят через замкнутую цепь, образованную проводкой или же проводкой и конструкцией, они будут порождать выбросы напряжений и токов в этой замкнутой цепи. Величина выбросов зависит от скорости изменения магнитного поля и площади рассматриваемой цепи. Разработчик должен учитывать величину наводимых напряжений и убедиться, что такие выбросы не превысят выдерживаемый уровень для кабельной сети и подключенного оборудования.

Использование экранирования и разводки кабелей необходимо обосновать при помощи анализа и/или испытания.

Дальнейшее рассмотрение вопросов экранирования, необходимого для ВЭУ, приводится в приложении G.

8.5.6 Согласованная защита УЗП

8.5.6.1 Общие положения

Согласованная защита УЗП включает комплект устройств защиты от перенапряжений, правильно отобранных, согласованных и установленных для снижения числа отказов электрических и электронных систем.

Примечание — Для согласования устройств защиты от перенапряжений должны использоваться соединительные линии для согласования изоляции полных систем.

Согласованная защита УЗП ограничивает влияния грозовых перенапряжений и образующихся внутри коммутационных перенапряжений. Защита электрических систем и систем управления требует систематического подхода к согласованным УЗП, предназначенным для электрических низковольтных систем и систем управления. Рекомендации по согласованной защите УЗП в зоне ВЭУ приводятся в приложении F.

8.5.6.2 Местонахождение УЗП

По системе мер защиты от электромагнитных импульсов от грозовых разрядов УЗП должны размещаться на линейном входе в каждую ЗМЗ:

- как можно ближе к границе ЗМЗ-1 необходимо установить УЗП, проверенные током I_{imp} (испытание класса I) согласно классификации ГОСТ Р 51992;

- как можно ближе к границе ЗМЗ-2 и выше и, если необходимо, как можно ближе к оборудованию, которое требует защиты, необходимо установить УЗП, проверенные током I_n (испытание класса II) согласно классификации ГОСТ Р 51992.

Примечание — Если длина цепи между УЗП и оборудованием слишком большая (т. е. обычно больше 10 м), распространение выбросов может привести к появлению вибрации.

8.5.6.3 Выбор УЗП

Устройства защиты от перенапряжений, которые выдерживают неполный ток молнии с обычной формой кривой тока 10/350 μс, должны пройти импульсные испытания соответствующим током I_{imp}. Для линий электропитания подходящий испытательный ток I_{imp} указывается в методике испытаний класса I согласно ГОСТ Р 51992.

Устройства защиты от перенапряжений, которые выдерживают индуктированные ударные токи молнии с обычной формой кривой тока 8/20 μс, должны пройти импульсные испытания соответствующим током I_n. Для линий электропитания подходящий испытательный ток I_n указывается в методике испытаний класса II согласно ГОСТ Р 51992.

УЗП должны соответствовать требованиям:

- ГОСТ Р 51992 относительно систем электропитания;
- ГОСТ Р 54986 относительно систем связи и сигнализации.

8.5.6.4 Установка УЗП

Места установки УЗП должны быть показаны на чертежах и электрических схемах в соответствии с мерами защиты от электромагнитных импульсов от грозовых разрядов. Для УЗП, установленных на различных границах УЗП и возможных элементов защиты от перенапряжений, установленных внутри оборудования, должны соблюдаться требования по согласованию электроэнергии.

Примечания

1 УЗП должны устанавливаться в соответствии с правилами установки, приведенными в ГОСТ Р 50571-4-44, ГОСТ Р МЭК 61643-12.

2 В международной практике также используются стандарты [9], [10].

Необходимо проанализировать согласование УЗП в электрических системах и системах управления. Документация должна включать достаточное количество информации по поводу того, как осуществляется согласование УЗП.

Дальнейшие указания относительно металлизации (заземления) и кабельной разводки в электрических системах и системах управления, а также по монтажным работам даются в 8.5.4 и 8.5.5, примеры приводятся в приложении G.

8.5.6.5 Воздействия окружающей среды

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

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

В зависимости от условий в месте установки внутри ВЭУ могут накладываться дополнительные и специальные требования на рабочие характеристики и установку УЗП. При необходимости производитель ВЭУ должен учитывать условия окружающей среды для конкретных мест установки, например, гондолы и ступицы.

8.5.6.6 Техобслуживание

Техобслуживание и замена УЗП должны проводиться в соответствии с планом техобслуживания.

УЗП должны устанавливаться таким образом, чтобы была возможность их осмотреть.

Примечание — Производителем УЗП должна быть представлена информация о продолжительности службы УЗП.

8.5.6.7 Контроль УЗП

Возможно возникнет необходимость осуществлять контроль за защитой критических элементов электрических систем и систем управления при помощи УЗП.

8.5.6.8 Выбор УЗП по уровню защиты (U_p) и устойчивости системы

Для того, чтобы определить необходимый уровень защиты U_p в ЗМЗ, необходимо установить уровни устойчивости оборудования в ЗМЗ, например:

- для линий электропитания и выводов оборудования в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.5 и ГОСТ Р МЭК 60664-1;
- для линий связи и выводов оборудования в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.5;
- для других линий и выводов оборудования в соответствии с информацией, полученной от производителя.

Производители электрических и электронных элементов должны предоставить необходимую информацию об уровне устойчивости согласно стандартам по ЭМС. В противном случае производитель ВЭУ должен провести испытания для определения уровня устойчивости.

От установленного уровня устойчивости элементов в ЗМЗ напрямую зависит необходимый уровень защиты, который должен быть обеспечен на границах ЗМЗ.

Устойчивость системы необходимо проверить, включая все установленные УЗП и оборудование для защиты, если возможно. Возможные методы испытаний описываются в приложении Н.

8.5.6.9 Перенапряжения, образующиеся внутри ветроэнергетических установок

Определенные требования могут накладываться на УЗП вследствие сильных изменений напряжения и временных перенапряжений в электрической системе ВЭУ. В таких случаях соответствующие части электрических систем и уровни напряжения, уровни тока и продолжительность должны быть установ-

лены в ходе анализа и/или испытания, и в зависимости от них должны быть выбраны УЗП. Примеры приведены в приложении F.

Должно быть представлено доказательство, что выбранные УЗП могут выдержать данные уровни нагрузок.

8.5.6.10 Выбор УЗП относительно тока разряда I_n и импульсного тока I_{imp}

Рекомендуется провести анализ распределения тока молнии внутри ВЭУ. На основании данных расчетов могут быть выбраны УЗП относительно тока разряда I_n и импульсного тока I_{imp}.

Примечание — В международной практике анализ распределения тока молнии внутри ВЭУ проводят в соответствии со стандартом [7].

УЗП для цепей, подверженных значительному воздействию, возможно должны обладать более высокими скоростями по сравнению с уровнями, приведенными в стандарте [9], или же такие цепи необходимо экранировать. Такие цепи, подверженные в значительной степени или высоким нагрузкам, или повторяющимся нагрузкам, должны быть установлены в ходе анализа. Если возможно, такие незащищенные цепи в электрических системах и системах управления ВЭУ должны быть указаны производителем на электрических схемах. Подробная информация дается в приложении F.

8.5.6.11 Выбор УЗП относительно тока короткого замыкания, скорости прерывания остаточного тока и рабочего цикла (интервалов проведения техобслуживания) УЗП

Скорость выдерживаемого тока короткого замыкания для комбинации УЗП и устройства защиты от сверхтоков (УЗС), например, предохранителя, а также скорость прерывания остаточного тока у УЗП, как заявлено производителями УЗП, должны быть равны или выше максимального тока короткого замыкания, ожидаемого в точке установки. Кроме того, когда скорость прерывания остаточного тока заявлена для УЗП, она должна быть подтверждена либо расчетами, либо испытаниями, показывающими, что УЗС, установленные в конкретной цепи питания, не работают.

Примечание — Производитель УЗП может предоставить информацию о продолжительности службы УЗП.

8.5.6.12 Работа УЗП в случае воздействия множества вспышек молнии

Вследствие относительно высокой частоты вспышек молнии в ВЭУ и критическому характеру установки УЗП в ВЭУ УЗП должны выдерживать воздействия множества вспышек молнии.

8.5.7 Методы испытаний системы на устойчивость

Методы предварительных испытаний включены в приложение Н.

8.6 Электрические высоковольтные системы

Большие 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, например, при 132 кВ.

Высоковольтный трансформатор ВЭУ может быть размещен на задней стенке гондолы, в нижней части мачты или рядом с мачтой ВЭУ.

Высоковольтные устройства защиты от перенапряжений обычно называют грозозащитными разрядниками. Применяемые для ВЭУ грозозащитные 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 неустановившихся напряжений, входящих в ВЭУ от высоковольтной кабельной системы снаружи ВЭУ. Необходимость в установке грозозащитных разрядников на высоковольтной стороне трансформатора следует проанализировать исходя из принципов ГОСТ Р МЭК 62305-2 (раздел 7 и приложение В).

Для оценки уровней неустановившихся напряжений, идущих от высоковольтной кабельной системы снаружи ВЭУ, требуется специальное моделирование неустановившихся напряжений в электрической сети.

Примечание — В международной практике исследования проводятся в соответствии со стандартом [11]. В случае, если эти исследования не проводятся, то высоковольтные грозозащитные разрядники рекомендуется использовать в качестве общей защиты.

Высоковольтные грозозащитные разрядники должны быть металлооксидными, без зазоров в соответствии с ГОСТ Р 52725, а выбраны и использованы в соответствии с ГОСТ Р 53735.5.

Высоковольтные грозозащитные разрядники предпочтительно размещать на выводах высоковольтного трансформатора, как показано на рисунке 4, обеспечивая, таким образом, максимальную защиту

трансформатора. Допускается размещать грозозащитные разрядники на распределительном устройстве. Между разрядником и защищаемым элементом допускается расстояние 10—40 м в зависимости от уровня прочности изоляции элемента; если расстояние больше 40 м, то необходимо провести более детальный анализ и решить, например, могут ли разрядники в основании мачты обеспечить необходимую защиту для трансформатора, расположенного в гондоле. Если трансформатор размещается с наружной стороны мачты, то необходимо подсоединить систему заземления трансформатора к системе заземления ВЭУ, и желательно, если это будет одна система заземления.

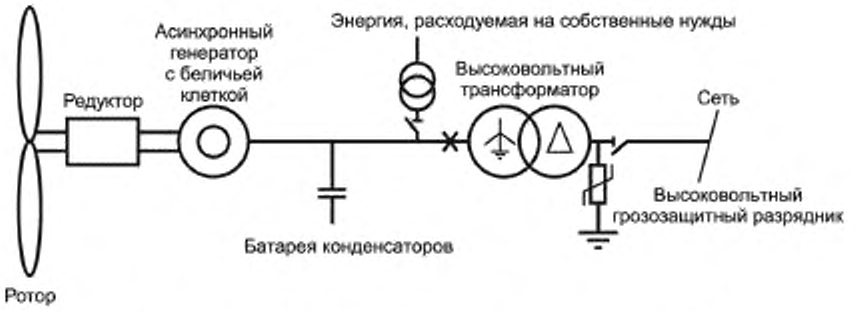


Рисунок 4а — асинхронный генератор с беличьей клеткой

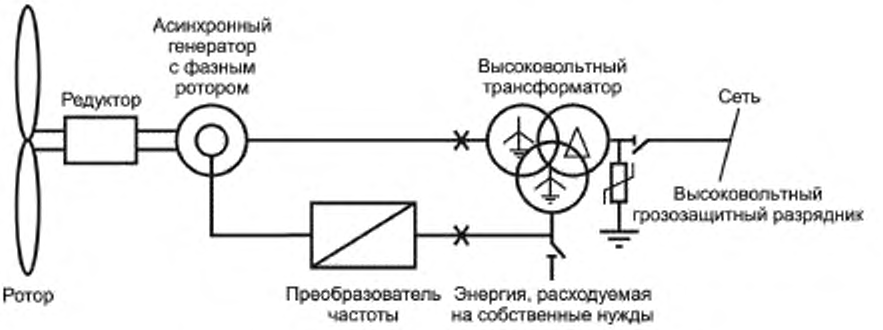


Рисунок 4б — асинхронный генератор с фазным ротором

Рисунок 4 — Примеры размещения высоковольтных разрядников в двух типовых основных электрических цепях ВЭУ

УЗП на низковольтной стороне высоковольтного трансформатора, скорее всего, будут являться общей мерой защиты, в частности, если значительное неустановившееся напряжение может проходить через трансформатор от высоковольтной стороны, и в этом случае необходимо подобрать тип УЗП для трансформатора (например, УЗП с высокой способностью поглощать энергию). Переходная емкостная и индуктивная связь высоковольтной и низковольтной сторон трансформатора, и, следовательно, переходные уровни, поступающие на низковольтную сторону, очень сильно зависят от конструкции трансформатора и, в частности, от заземляющего соединения обмотки низкого напряжения. Поэтому рекомендуется в качестве общей меры защиты устанавливать УЗП на низковольтной стороне трансформатора или же получить от производителя достаточно детализированную модель трансформатора для изучения переходных режимов и принятия решения о необходимости в установке УЗП на низковольтной стороне трансформатора.

Примечания

1 Должны соблюдаться общие требования для высоковольтных систем согласно стандарту [12].

2 Для получения более подробной информации о зависимости переходной емкостной и индуктивной связи высоковольтной и низковольтной сторон трансформатора и переходных уровней, поступающих на низковольтную сторону, от конструкции трансформатора и заземляющего соединения обмотки низкого напряжения следует обратиться к стандарту [13].

9 Заземление ветроэнергетических установок и ветроэлектрических станций

9.1 Общие положения

Для увода токов молнии и предотвращения повреждения ВЭУ необходимо использовать эффективную систему заземления для оборудования. Кроме того, система заземления должна защищать людей и скот от электрического удара. Когда происходит повреждение электрической сети, необходимо поддержать напряжение прикосновения и ступенчатое напряжение, а также повышение полного электрического потенциала земли на безопасном уровне до тех пор, пока защитные устройства не сработают и безопасно не прервут поток тока повреждения. Что касается вспышек молнии, система заземления должна уводить и проводить высокочастотный и высокоэнергетический ток молнии в землю без каких-либо опасных тепловых и/или электродинамических воздействий.

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

Что касается конструкции системы заземления по предотвращению напряжения прикосновения и ступенчатого напряжения вследствие неполадок в высоковольтных элементах, необходимо пользоваться электротехническими правилами и нормами по высокому напряжению и соответствующими государственными стандартами.

Примечание — В международной практике обеспечение безопасности персонала осуществляется в соответствии со стандартами [14], [15].

9.1.1 Основные требования

Система заземления ВЭУ должна обеспечить достаточную защиту от повреждений вследствие ударов молнии. Система заземления ВЭУ должна соответствовать уровню молниезащиты разработанной системы защиты ВЭУ.

Система заземления должна удовлетворять четырем основным техническим требованиям:

а) обеспечение персональной безопасности относительно напряжения прикосновения и ступенчатого напряжения, которые появляются во время замыканий на землю;

б) предотвращение повреждения оборудования;

в) выдерживание тепловых и электродинамических нагрузок, которые будут воздействовать во время короткого замыкания;

г) длительная достаточная механическая прочность и коррозийная стойкость.

9.1.2 Заземляющие электродные установки

Два основных типа заземляющих электродных установок, которые приводятся в настоящем стандарте, используются для ВЭУ:

- установка типа А — данная установка не рекомендуется для ВЭУ, но может использоваться для малых сооружений (например, зданий, в которых находится измерительная аппаратура, или подсобных сооружений, которые подсоединены к ветроэлектрической станции). Заземляющие установки типа А имеют горизонтальные или вертикальные электроды, подключенные как минимум к двум вертикальным молниеотводам на конструкциях;

- установка типа Б — данная установка рекомендуется для ВЭУ. Установка типа Б включает в себя либо внешний кольцевой заземляющий электрод, находящийся в контакте с землей на протяжении, как минимум, 80 % от его общей длины, или заземляющий электрод фундамента. Кольцевые электроды или металлические детали в фундаменте должны быть подсоединены к конструкции мачты.

Примечание — Информация по двум основным типам заземляющих электродных установок содержится в стандарте [1].

9.1.3 Полное сопротивление системы заземления

Полное сопротивление системы заземления не влияет на эффективность воздушной системы перехвата вспышек молнии и системы вертикальных молниеотводов. Система заземления должна иметь наиболее низкий возможный уровень полного импульсного сопротивления для снижения перепада полного на-

пряжения (например, уменьшения повышения полного электрического потенциала земли), для снижения неполного тока молнии, идущего в служебные линии, соединяющие ВЭУ, а также для снижения риска выбрасывания искр на другие служебные линии вблизи системы заземления.

Глубина укладывания и тип заземляющих электродов должны сводить на минимум коррозионные воздействия, высыхание почвы и замораживание, и, следовательно, стабилизировать условное сопротивление заземления. Рекомендуется первый метр вертикальных заземляющих электродов не рассматривать в качестве эффективных электродов в условиях мороза.

Элементы системы заземления должны выдерживать токи молнии, а также токи повреждения системы питания. Это должно обеспечиваться за счет элементов системы заземления. Система заземления должна уводить ток молнии в землю без тепловых или электродинамических повреждений, а длина проводников должна быть как можно меньше.

Примечание — В международной практике элементы системы заземления выбираются согласно стандарту [1].

Дополнительная информация приводится в I.1.2.2 (приложение I).

9.2 Эквипотенциальная металлизация

9.2.1 Общие положения

Эквипотенциальная металлизация обеспечивается путем соединения СМЗ с:

- конструкционными металлическими деталями;
- металлическими установками;
- внутренними системами;
- внешними токопроводящими элементами и служебными линиями, подведенными к конструкции.

Когда молниезащитная эквипотенциальная металлизация используется для внутренних систем, часть тока молнии может идти в эти системы, и это воздействие необходимо учитывать.

Способ, с помощью которого осуществляется молниезащитная эквипотенциальная металлизация служебных линий, 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 Молниезащитная эквипотенциальная металлизация металлических установок

Соединения молниезащитной эквипотенциальной металлизации должны быть по возможности непосредственными и прямыми.

Минимальные значения поперечного сечения шин, соединяющих различные контактные шины/точки, а также минимальные значения поперечного сечения проводников, соединяющих шины/точки с системой заземления, приводятся в таблице 5.

Минимальные значения поперечного сечения металлизационных шин, соединяющих внутренние металлические установки с контактными шинами/точками, приводятся в таблице 6.

Таблица 5 — Минимальные значения размера шин, соединяющих различные контактные шины/точки или соединяющих шины/точки с системой заземления

Класс СМЗ	Материал	Поперечное сечение, мм^2
I — IV	Медь	14
	Алюминий	22
	Сталь	50

Таблица 6 — Минимальные значения размера шин, соединяющих внутренние металлические установки с контактными шинами/точками

Класс СМЗ	Материал	Поперечное сечение, мм^2
I — IV	Медь	5
	Алюминий	8
	Сталь	16

9.2.3 СМЗ с электроизоляцией

Не рекомендуется использовать изолированную внешнюю СМЗ для ВЭУ.

9.3 Конструкционные элементы

9.3.1 Общие положения

В большинстве случаев все токопроводящие конструкционные элементы ВЭУ будут проводить часть тока молнии, и поэтому должна быть сделана эквипотенциальная металлизация токопроводящих конструкционных элементов.

9.3.2 Металлическая пустотелая мачта

Мачта должна рассматриваться как первичный защитный заземлитель и эквипотенциальная металлизация соединения.

Из-за большой высоты мачт возможно прямое касание молнии конструкции мачты, и поэтому оно должно учитываться при проектировании мачты. Все электрические токопроводящие элементы и все основные металлические детали, которые могут проводить ток, должны быть металлизированы с мачтой. Мачта должна использоваться в качестве вертикального молниеотвода и проектироваться таким образом, чтобы ток молнии мог беспрепятственно проходить вдоль мачты.

9.3.3 Металлическая железобетонная мачта

Мачта должна рассматриваться как первичный защитный заземлитель и эквипотенциальная металлизация соединения. Из-за большой высоты мачты возможно прямое касание молнии конструкции мачты, и поэтому оно должно учитываться при проектировании мачты. Для использования с железобетонными мачтами можно применять внешние системы молниезащиты, которые в этом случае всегда должны быть металлизированы со стальной арматурой мачты.

Выводы эквипотенциального соединения, соединенные со стальной арматурой, должны быть размещены в точках подключения внешнего проводника для металлизации оборудования внутри мачты. Железобетонная мачта должна быть разработана в соответствии с 9.3.6.

9.3.4 Решетчатая мачта

Решетчатая мачта защищает внутреннюю часть мачты от прямого касания молнии и обеспечивает некоторое ослабление грозового электромагнитного поля, следовательно, пространство внутри мачты определяется как ЗМЗ $0_в$. Вертикальное отведение молнии должно осуществляться через конструкционные элементы решетчатой мачты, которые должны в свою очередь соответствовать размерам, необходимым для вертикальных молниеотводов, как указано в стандарте [1], с учетом перераспределения тока по параллельным путям.

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

9.3.5 Системы внутри мачты

Внутренняя часть мачты должна определяться как одна или несколько зон молниезащиты (ЗМЗ), для которых уровень защиты, необходимый для внутреннего оборудования, должен задаваться согласно 8.5.

Лестничные системы должны быть металлизированы с мачтой на каждом конце, через каждые 20 м и на каждой платформе.

Перила, направляющие для подъемников, гидравлическая система, провода для персональной защиты и другие элементы, проходящие через мачту, должны быть металлизированы на каждом конце. Кроме того, для решетчатых мачт металлизация должна быть сделана по возможности через каждые 20 м.

Система заземления высоковольтного трансформатора должна быть металлизирована 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 мачтой фундамента, всегда должна рассматриваться как часть СМЗ.

Необходимо убедиться в непрерывном электрическом контакте стального каркаса железобетонных конструкций. Стальной каркас железобетонных конструкций имеет непрерывный электрический контакт, если соединены основные части вертикальных и горизонтальных стержней. Соединения деталей металлической арматуры должны быть либо сварными, клеммными, либо сделаны путем перекрытий, как минимум, в 20 раз больше их диаметров и металлизации с помощью токопроводящей шины или с помощью прочного

соединения. 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 дополнительной металлизации, измерения или расширения системы заземления должны быть сделаны в определенных местах фундамента.

9.3.7 Фундамент на скалистых участках

На скалистых участках самое низкое удельное сопротивление обычно наблюдается на поверхности скалы.

Должна использоваться система заземления типа Б. В I.1.1 приложения I представлена дополнительная информация о деталях конструкции.

Рекомендуется использовать, как минимум, два концентрических кольцевых электрода для защиты от напряжения прикосновения и ступенчатого напряжения, которые могут быть объединены с вертикальными электродами, засверленными в скалу.

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 установки очень протяженных систем заземления. На таких участках необходимо обратить особое внимание на контроль разницы электрических потенциалов поверхности для ограничения 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 служебных линий, соединяющих ВЭУ с токоприемником и системами связи (см. 8.5).

9.3.8 Фундамент на металлических сваях

Фундамент на металлических сваях по своей природе является большим заземляющим электродом. Он должен использоваться как первичный заземляющий электрод.

В зависимости от стабильности проводящих свойств почвы для контроля градиента потенциала поверхности вблизи фундамента могут понадобиться кольцевые электроды.

9.3.9 Фундамент в прибрежной зоне

В целом сопротивление морской воды значительно ниже, чем почвы. Поэтому для фундамента в прибрежной зоне, например, фундамент на металлических сваях или железобетонный фундамент, требования к системе заземления считаются достаточными, при этом дополнительные меры, такие как кольцевой электрод и т.п., не требуются. Межкомпонентные соединения у фундамента на металлических сваях, за исключением соединений экранов кабеля токоприемника, обычно не требуются.

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

9.4 Размеры электрода

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

Для удельного сопротивления почвы выше 500 Ом·м минимальная длина l_1 линейно увеличивается до 80 м при устойчивости почвы 3000 Ом·м.

Установка типа Б включает либо кольцевой проводник с внешней стороны защищаемой конструкции, который находится в контакте с землей на протяжении, как минимум, 80 % от его общей длины, или заземляющий электрод фундамента. Такие заземляющие электроды могут также быть сетчатыми.

Для кольцевого заземляющего электрода (или фундаментного заземляющего электрода) средний радиус r_e области, охватываемой кольцевым заземляющим электродом (или фундаментным заземляющим электродом), должен быть не менее l_1

$$r_e \geq l_1, \tag{17}$$

где значение l_1 представлено на рисунке Н.1 (приложение Н) в зависимости от уровней СМЗ I, II, III и IV.

Когда требуемая величина l_1 больше удобного значения r_e, необходимо добавить дополнительные горизонтальные или вертикальные (или наклонные) электроды длиной l_r (для горизонтальных) и l_v (для вертикальных), получаемых при помощи следующих уравнений:

$$l_r = l_1 - r_e; \quad (18)$$

$$l_v = (l_1 - r_e)/2. \quad (19)$$

Количество электродов должно быть не менее двух.

Дополнительные электроды следует подсоединить по возможности на равноудаленном расстоянии.

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, гармонических колебаниях низшего порядка.

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

Удельное сопротивление почвы будет сильно отличаться в зависимости от характера почвы. Методы определения необходимого заземляющего электрода в соответствии с его геометрическими и физическими формами приводятся в приложении I.

9.5 Ветроэлектрическая станция

Ветроэлектрическая станция обычно состоит из нескольких конструкций, таких как ВЭУ, здания, кабельные или воздушные сети, высоковольтные подстанции и сигнальные кабели.

Каждая ВЭУ должна иметь свою собственную систему заземления. Системы заземления отдельных ВЭУ и высоковольтной подстанции желательно соединить с горизонтальными проводами заземления для образования системы заземления всей ветроэлектрической станции. Это, в частности, полезно в случае трудностей с получением хорошего сопротивления заземления для каждой отдельной ВЭУ.

Примечание — Соединить системы заземления отдельных ВЭУ следует при помощи проводов заземления, проходящих вдоль токопроводящих кабелей, подведенных к ВЭУ.

Система заземления ветроэлектрической станции имеет большое значение для защиты электрических систем, т. к. низкоомная система заземления снижает разницу электрических потенциалов между различными конструкциями ветроэлектрической станции и, таким образом, уменьшает помехи, наводимые на электрические контакты.

Для снижения вероятности попадания прямых вспышек молнии в кабельные каналы, проложенные в земле, а также для уменьшения воздействия молнии на кабели провод заземления, или, в случае более широких кабельных каналов, несколько проводов заземления рекомендуется прокладывать поверх кабельных каналов.

9.6 Исполнение и техобслуживание системы заземления

Разработчик системы заземления должен подготовить план монтажных работ, в котором будет приведена схема системы заземления с подробностями по точкам контакта, использованию соединителей, клеммам и сварным швам, положению и количеству выводов, а также их типу и качеству.

Осмотр необходимо проводить во время строительных работ, в особенности, перед заливкой бетона.

Примечание — По электротехническим правилам и нормам может потребоваться измерение сопротивления заземления.

В руководстве по техническому обслуживанию и эксплуатации должно быть описано, как часто и каким образом проводить осмотр и техобслуживание системы заземления. Разработчик ВЭУ должен согласовать с оператором периодичность осмотров. Необходимо учитывать агрессивную среду, в зависимости от которой возможно понадобится проводить более частый осмотр. Если установлено, что элементы в системе заземления имеют определенный срок службы, то интервал между осмотрами 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, ВЭУ на воде 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 проводятся завершающие работы. В течение этого периода большое количество людей работает внутри, на и около 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 электротоком;
- незамедлительное использование переходных соединителей системы заземления;
- оборудование безопасных мест;
- осведомление всего персонала на площадке о сигналах оповещения о молниевой опасности;
- инструктирование персонала:
- по организации наблюдений за образованием грозовых облаков, слышимым громом и видимой молнией;
- о признаках, 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;
- о необходимости прекращения работы и перемещения в ближайшее безопасное место при наличии данных признаков или в случае получении 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 ТО и эксплуатации, предоставляемые поставщиком ВЭУ.

Метеобюро обычно составляют достаточно точные прогнозы грозовых дней и могут оказывать услуги по предупреждению о молниевой опасности по телефону, факсу или сети Интернет. 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.

Альтернативой оповещению метеобюро является приобретение локальных и переносных устройств обнаружения и предупреждения о приближении грозы.

Некоторые системы предупреждения о молниевой опасности могут не выдавать предупреждения по всем вспышкам молнии, особенно по первой вспышке молнии в образующейся грозе. 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 мачте ВЭУ, стоящие рядом с мачтой, 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 мачт в целом считаются безопасными местами, т. к. мачта образует практически идеальную клетку Фарадея. Людям, находящимся на ВЭУ, следует дать указание прекратить работу, идти до ближайшей платформы внутри мачты и оставаться там до тех пор, пока гроза не пройдет. Другие безопасные места — внутри металлических тележек на крыше, металлических контейнеров и т.п.

Примечания

1 Людям следует дать указание стоять или сидеть на платформе и избегать касания электропроводящих систем, проходящих вертикально внутри мачты, таких как электрические системы.

Чтобы не было трудностей с передачей сообщений на строительной площадке, возможно, необходимо ввести какой-нибудь акустический сигнал предупреждения, радио или подобные эффективные средства предупреждения для обширной территории (это может быть просто многократное звучание автомобильного или пневматического гудка).

2 В документации по ВЭУ должны быть определены безопасные места в ВЭУ, включая необходимые безопасные расстояния и другие меры предосторожности, которые необходимо принять, находясь в безопасном месте. В стандарте [1] приводится руководство, как провести подробный расчет безопасного расстояния.

11 Документация на систему молниезащиты

11.1 Общие положения

В данный раздел включена вся необходимая документация.

Документация, необходимая во время анализа конструкции, приводится в 11.2, а для анализа площадки в 11.3. Документация, необходимая до начала проведения осмотра систем молниезащиты, приводится в 11.4, а руководства перечислены в 11.5.

Документация может включать либо единичный документ, либо ссылки на стандартную документацию.

11.2 Документация, необходимая во время анализа конструкции

Центром внимания общих документов (11.2.1) должна быть ВЭУ в целом, с описанием используемого принципа защиты. Они должны включать ссылки на другие, более подробные документы по лопастям ротора, механическим, электрическим системам, системам металлизации, заземления и другим системам (11.2.2 — 11.2.6).

11.2.1 Общая документация

а) общий чертеж (однолинейное представление) молниезащиты ВЭУ, включающий:

1) отдельные конструкции и соединения;

2) электрические схемы с указанием ЗМЗ и их границ, в приложении Е приводятся основные примеры такой документации;

3) воздушные системы перехвата вспышек молнии;

4) расположение вертикальных молниеотводов;

5) заземляющие электроды и контроль поверхностного потенциала;

6) расположение шин металлизации и контактных шин;

7) расположение УЗП;

8) точки металлизации экрана кабеля;

б) проектирование:

1) описание того, каким образом ток молнии выводится из точек перехвата;

2) уровень молниезащиты, используемый для конструкции;

3) если используется уровень молниезащиты ниже УМЗ-I, анализ риска должен быть отражен в документах;

4) анализ распределения тока молнии по ВЭУ;

5) выбор и проверка согласования электроэнергии УЗП;

в) правила техники безопасности относительно молнии.

11.2.2 Документация по лопасти ротора

а) чертеж лопастей ротора, включающий:

1) площади поперечного сечения вертикального молниеотвода;

2) любые дополнительные токопроводящие элементы;

3) элементы металлизации;

б) описание, включающее:

1) монтаж воздушной системы перехвата вспышек молнии и системы вертикальных молниеотводов;

2) меры, предпринимаемые во избежание внутреннего дугового пробоя в лопасти;

3) определение необходимого осмотра и техобслуживания воздушной системы перехвата вспышек молнии, искровых зазоров или скользящих контактов;

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

5) инструкции по осмотру и техобслуживанию;

в) документация по методу проверки, подтверждающему способность воздушной системы перехвата вспышек молнии перехватывать удары молнии и проводить токи молнии.

11.2.3 Документация на механические системы

а) данные по прохождению тока молнии;

б) 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;

в) 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 на электрические и электронные системы

а) план экранирования и установки электрических и электронных систем;

б) выбор и согласование УЗП;

в) уровни устойчивости оборудования в ЗМЗ;

г) план ТО для УЗП;

д) анализ, определяющий необходимость использования высоковольтных разрядников.

11.2.5 Документация на системы заземления и металлизации

а) общий план электрической эквипотенциализации для всех систем металлизации и заземления в ВЭУ, показывающий общую систему электрической эквипотенциальной металлизации;

б) описания и чертежи, включающие соответствующие данные;

в) описание контроля за обеспечением качества соединений.

11.2.6 Документация на системы молниезащиты корпуса гондолы, ступицы и мачты

а) чертеж, содержащий следующую информацию:

1) кожух гондолы, обтекатель с показом металлических элементов, используемых в качестве воздушной системы перехвата вспышек молнии;

2) воздушные системы перехвата вспышек молнии;

3) металлизация;

4) металлические сети или закрытые металлические каналы, если есть;

5) средства экранирования ступицы и гондолы.

б) отчеты по испытаниям, если необходимо;

в) металлизация внешних молниезащитных систем для бетонных мачт с металлической арматурой мачты;

г) размеры конструкционных элементов решетчатой мачты.

11.3 Специальная информация о площадке

а) частота возникновения молнии в месте нахождения ветроэлектрической станции;

б) дополнительно для документации по заземлению:

1) стабильность проводящих свойств почвы;

2) ток замыкания на землю;

3) время отключения КЗ на землю;

в) план по охране здоровья и технике безопасности для строительной площадки.

11.4 Документация, предоставляемая для проведения проверок СМЗ

а) описание СМЗ;

б) описание системы заземления;

в) отчеты по предыдущим проверкам (если применимо).

По результатам проверок СМЗ должны быть оформлены отчеты (отчеты по внешнему осмотру СМЗ, отчеты по полной проверке СМЗ и т. д.).

11.5 Руководства

Вопросы, касающиеся систем молниезащиты и заземления должны раскрываться в следующих руководствах:

а) по обеспечению качества;

б) по монтажу фундамента;

в) по техобслуживанию фундамента;

г) по установке ВЭУ,

д) по ТО и эксплуатации ВЭУ.

12 Проверки системы молниезащиты

12.1 Объем проверок

Программа проверок должна быть установлена как часть концепции молниезащиты. Цель проверок — убедиться, что:

- СМЗ продолжает соответствовать первоначальному варианту конструкции, основанной на данном стандарте;
- все элементы СМЗ находятся в хорошем состоянии и способны выполнять свои функции.

СМЗ должна быть разработана таким образом, чтобы у оператора была возможность осмотреть ответственные элементы системы.

Производитель ВЭУ несет ответственность за составление плана проверок/инструкций по осмотру и включение мест с автоматическим управлением в инструкции по эксплуатации, руководства по ТО и эксплуатации, а также в руководства по техобслуживанию фундамента и т. д.

12.2 Порядок проверок

12.2.1 Общие положения

Должна быть составлена программа поверок. Проверки должны проводиться в соответствии с 12.1 и во время:

- изготовления ВЭУ;
- монтажа ВЭУ;
- ввода ВЭУ в эксплуатацию; а также
- через определенные промежутки времени в зависимости от места расположения ВЭУ (общие максимальные промежутки времени между регулярными проверками приводятся в таблице 7);
- после демонтажа или ремонта частей ВЭУ (например, лопастей, основных элементов, систем управления и т. п.).

12.2.2 Проверки во время изготовления ветроэнергетических установок

Программа проверок может быть составлена контролерами ОТК 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 инструкции по эксплуатации и т. п.

12.2.3 Проверки во время монтажа ветроэнергетических установок

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

- механическое повреждение во время экскаваторных работ и засыпки вынутым грунтом;
- механическую устойчивость во время заливки бетона;
- электрическую совместимость с другими стальными деталями (например, ступеньки с наружной стороны);
- соединение с системами заземления фундамента;
- соединение с внешними системами заземления;
- электрохимическую коррозию.

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

12.2.4 Проверки во время ввода ветроэнергетической установки в эксплуатацию и периодические проверки

Частью ввода ВЭУ в эксплуатацию является проверка системы молниезащиты. Она должна быть проведена, по меньшей мере, путем осмотра, а также измерения непрерывности в местах, где система молниезащиты не может быть проверена.

Когда план проверок составлен, необходимо обратить внимание на следующие моменты:

- эрозия и коррозия элементов воздушного перехвата вспышек молнии (только периодическая проверка);
- механические и электрические свойства проводников, соединений, искровых зазоров или скользящих контактов;
- состояние соединений, эквипотенциальной металлизации, креплений и т. п.;
- состояние УЗП;
- коррозию заземляющих электродов (только периодическая проверка).

Через определенные промежутки времени (приведенные в таблице 7) должна проводиться полная проверка, включая измерения непрерывности в ответственных элементах СМЗ и проверку УЗП, 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 вспышек молнии в год, на основе прочности молниезащитной конструкции, проверенной путем анализа и испытаний.

Измерения непрерывности можно провести с использованием постоянного тока или подобными методами. Основная цель — убедиться в целостности соединения, а не определенного конкретного значения. Удельные величины могут использоваться в качестве опорных между проведением периодических измерений. Измерительные точки и пределы измерений должны быть четко установлены в руководстве по ТО и эксплуатации.

Непрерывность вертикальных молниеотводов в лопастях ВЭУ должна обеспечиваться благодаря конструкции системы и проверяться во время изготовления, таким образом, нет необходимости проводить измерения непрерывности в полевых условиях.

Таблица 7 — Периодичность общих проверок СМЗ

Уровень защиты	Внешний осмотр (каждый X год)	Полная проверка, включающая измерения непрерывности (каждый X год)
I и II	1	2
III и IV	1	4

12.2.5 Проверка после демонтажа и ремонта основных частей

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 местной окружающей среды, но проводить проверку ВЭУ следует с частотой, не реже указанной в таблице 7.

12.3 Техобслуживание

Регулярные проверки являются основополагающим условием для надежной эксплуатации СМЗ ВЭУ.

Если конструкция СМЗ содержит изнашиваемые детали (точки воздушного перехвата вспышек молнии, механические скользящие контакты, искровые зазоры, устройства защиты от перенапряжений и т.п.), необходимо гарантировать, что эти детали проходят регулярный техосмотр во время регулярных проверок, а также в соответствии с ожидаемым сроком их эксплуатации, или же необходимо гарантировать, что за их состоянием следит система автоматического контроля, которая информирует оператора ВЭУ о неисправности элемента.

Все изношенные или неисправные элементы должны быть немедленно заменены.

Приложение А
(справочное)

Воздействие молнии на ветроэнергетическую установку

А.1 Молниевая обстановка для ВЭУ

А.1.1 Общие положения

Цель настоящего приложения заключается в представлении наиболее значимой информации по молниевой обстановке, которая требуется для понимания молниевого явления и процессов, связанных со взаимодействием молнии с ВЭУ.

А.1.2 Параметры молнии

Молнию можно расценивать как источник тока. Четыре параметра тока молнии, представляющие интерес для проектирования и определения размера молниезащиты, — это пиковый ток молнии (*I*), скорость нарастания импульсов тока удара молнии (d*i*/d*t*), передаваемый разряд (*Q*) и удельная энергия *(W/R)*.

Максимально замеренное значение тока молнии, производимое отдельным ударом, лежит в диапазоне от 2 кА до 300 кА. Максимально замеренные значения переноса заряда и удельной энергии составляют несколько сотен Кулон (Кл) и, в крайне редких случаях, до 20 МДж/Ом соответственно. Эти параметры тока молнии влияют на величину физического ущерба, причиняемого лопастям ВЭУ и/или аппаратуре системы молниезащиты. 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. Влияния четырех параметров тока молнии на системы молниезащиты сведены в таблицу А.3.

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

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

А.1.3 Формирование молниевого разряда и электрические параметры

Вспышки молнии образуются после отделения разряда в грозовых облаках вследствие процессов, описанных в научной литературе (например, [16]). 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 вспышек молнии, поражающих землю, что приводит к передаче заряда между грозовым облаком и землей.

Вспышка молнии обычно состоит из нескольких составляющих. Всю ветвь, проходящую один ионизированный путь, называют вспышкой молнии, которая длится до 1 с. Отдельные элементы вспышки называют короткими и длинными ударами молнии, которые более известны как непрерывные токи.

Существует два базовых типа вспышек молнии — инициированные сверху вниз или снизу вверх. Инициированная сверху вниз вспышка молнии берет начало в грозовой туче и направлена к земле. И наоборот, инициированная снизу вверх вспышка молнии берет начало в отдельной возвышенности на земле (например, на вершине горы) или наверху высокой заземленной конструкции и направлена в грозовую тучу. Как правило, эти базовые типы соответственно называют «вспышка грозовая туча — земля» или «нисходящая вспышка» и «вспышка земля — грозовая туча» или «восходящая (инициированная) вспышка».

Оба типа вспышек молнии далее подразделяют в зависимости от полярности заряда, снимаемого с грозовой тучи. Отрицательная вспышка уменьшает отрицательный разряд от грозовой тучи до земли. Положительная вспышка приводит к переносу положительного заряда от грозовой тучи до земли. Большинство вспышек молнии отрицательные и составляют до 90 % вспышек «грозовая туча — земля». Положительные разряды составляют оставшиеся 10 % вспышек «грозовая туча — земля». Как правило, положительные вспышки отличают самые мощные параметры тока (т. е. более высокие *I*, *Q* и *W/R)*, а отрицательные вспышки характеризуют самые крутые импульсы тока (т. е. самые высокие отношения d*i*/d*t*).

Вспышки 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 вспышка молнии, идущая к конкретной конструкции, будет иметь пиковый ток заданной величины. Можно лишь сказать, что конструкция имеет заданную вероятность поражения вспышкой молнии с параметрами тока, превышающими конкретную величину.

Распределения вероятности электрических параметров, используемых для описания удара молнии, были получены благодаря прямым измерениям реальных ударов молний в высокие башни [17], [18]. Эти статистические данные параметров тока молнии используют в стандартах молниезащиты группы МЭК 62305 (см. таблицу А.1). По всему миру появляется дополнительная информация с 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.

А.1.4 Вспышки «грозовая туча — земля»

Вспышка «грозовая туча — земля» (нисходящий инициированный разряд) первоначально образует 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.

А.1.4.1 Отрицательные вспышки «грозовая туча — земля»

При отрицательной вспышке смещающийся лидер нисходит с грозовой тучи на землю 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 соединительными лидерами. Соединительные лидеры играют важную роль в определении точки приложения вспышки молнии к объекту.

Когда нисходящий смещающийся лидер встречает движущийся вверх соединительный 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 А.1.

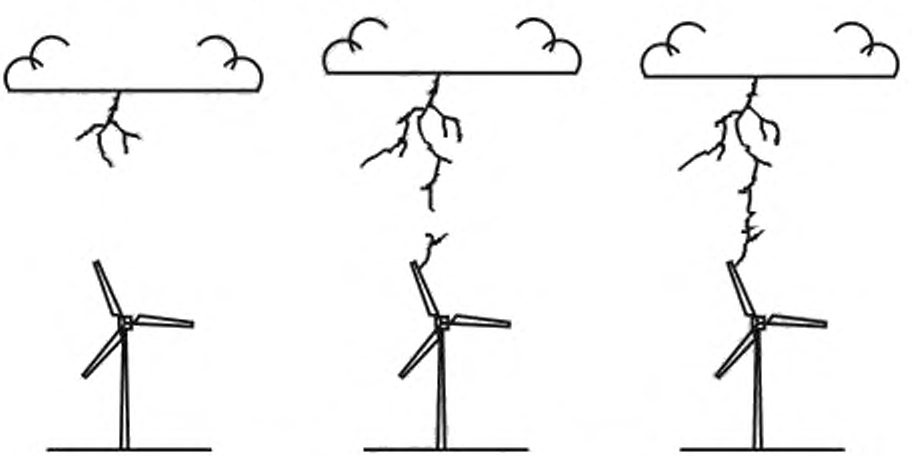


Рисунок А.1 — Процессы при формировании вспышки «грозовая туча — земля»

После временного интервала от порядка 10 мс до нескольких сотен мс 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 вспышка молнии содержит от трех до четырех обратных ударов молнии (включая первый). Обратные удары молнии имеют видимую часть вспышки молнии.

После одного или нескольких обратных ударов молнии непрерывный ток (называемый также длинным ударом молнии) может протекать через все еще ионизированный канал. Непрерывные токи значительно отлича-

ются 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. Непрерывные токи переносят большие заряды непосредственно от грозовой тучи на землю.

Порядка половины вспышек «грозовая туча — земля» содержат непрерывный ток.

На рисунке А.2 показан характерный профиль тока молнии в отрицательной вспышке «грозовая туча — земля». Вслед за контактом ступенчатого лидера с соединительным лидером появляется первый обратный удар молнии, приводящий к появлению (на земле) импульсного тока с высокой амплитудой, длящегося несколько сотен микросекунд. Пиковое значение тока находится в диапазоне от нескольких кА до 100 кА, среднее значение составляет порядка 30 кА (таблица А.1). Вслед за первыми обратными ударами молнии могут возникнуть последующий(-е) обратный(-е) удар(-ы) молнии и непрерывный(-е) ток(-и). 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 разряды «грозовая туча — земля» могут состоять из комбинаций различных ранее упомянутых компонентов тока, как показано на рисунке А.5.

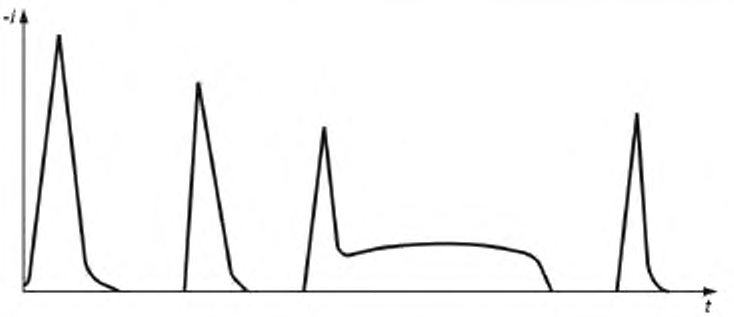
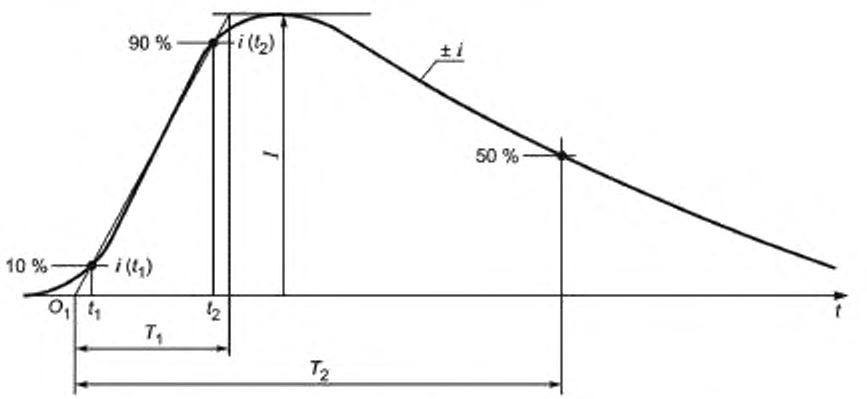


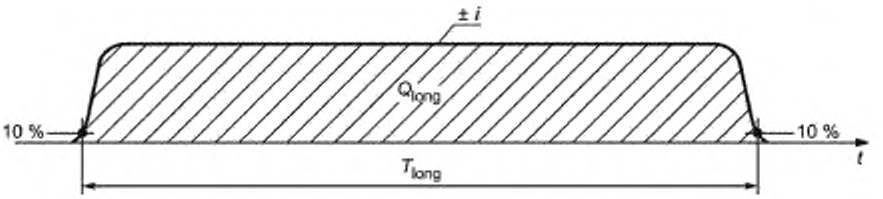
Рисунок А.2 — Характерный профиль отрицательной вспышки «грозовая туча — земля» (не в масштабе)

Ток молнии состоит из одного или более различных ударов молнии:
- короткие удары молнии продолжительностью менее 2 мс (рисунок А.3);
- короткие удары молнии продолжительностью более 2 мс (рисунок А.4).



O_1 — виртуальное начало координат; I — пиковый ток; z — ток; t — время; T_1 — время нарастания импульса; T_2 — время до половины значения

Рисунок А.3 — Определение параметров короткого удара молнии (обычно $T_2 < 2$ мс)



T_{long} – продолжительность удара молнии; Q_{long} – заряд длинного удара молнии

Рисунок А.4 — Определение параметров длинного удара молнии (обычно 2 мс < $T/_{long}$ < 1 с)

Таблица А.1 — Параметры вспышки молнии «грозовая туча — земля» (адаптирована из таблицы А.1 в ГОСТ Р МЭК 62305-1)

Параметр	Фиксированные значения для УМЗ-I	Значения			Тип удара молнии
		95 %	50 %	5 %	
I(кА)	50 200	4 (98 %)	20 (80 %)	90	Первый отрицательный короткий удар молнии
		4,9	11,8	28,6	Последующий отрицательный короткий удар молнии
		4,6	35	250	Первый положительный короткий (единичный) удар молнии
Q_{flash} (Кл)	300	1,3	7,5	40	Отрицательная вспышка
		20	80	350	Положительная вспышка
Q_{short} (Кл)		1,1	4,5	20	Первый отрицательный короткий удар молнии
	100	0,22	0,95	4	Последующий отрицательный короткий удар молнии
		2	16	150	Первый положительный короткий (единичный) удар молнии
W/R (кДж/Ом)	10000	6	55	550	Первый отрицательный короткий удар молнии
		0,55	6	52	Последующий отрицательный короткий удар молнии
		25	650	15 000	Первый положительный короткий удар молнии
di/dt_{max} (кА/мкс)	20	9,1	24,3	65	Первый отрицательный короткий удар молнии
		9,9	39,9	161,5	Последующий отрицательный короткий удар молнии
		0,2	2,4	32	Первый положительный короткий удар молнии
$di/dt_{30/90\ \%}$ (кА/мкс)	200	4,1	20,1	98,5	Последующий отрицательный короткий удар молнии
Q_{long} (Кл)	200				Длинный удар молнии
t_{long} (с)	0,5				Длинный удар молнии

Окончание таблицы А.1

Параметр	Фиксированные значения для УМЗ-I	Значения			Тип удара молнии
		95 %	50 %	5 %	
Длительность нарастания импульса (кА/мкс)		1,8	5,5	18	Первый отрицательный короткий удар молнии
		0,22	1,1	4,5	Последующий отрицательный короткий удар молнии
		3,5	22	200	Первый положительный короткий (единичный) удар молнии
Продолжительность фронта импульса тока (мкс)		30	75	200	Первый отрицательный короткий удар молнии
		6,5	32	140	Последующий отрицательный короткий удар молнии
		25	230	2 000	Первый положительный короткий (единичный) удар молнии
Временной интервал (мс)		7	33	150	Множество отрицательных ударов молнии
Общая продолжительность удара (мс)		0,15	13	1 100	Отрицательная вспышка (все)
		31	180	900	Отрицательная вспышка (без единичной)
		14	85	500	Положительная вспышка
Примечание — Значения I = 4 кА и I = 20 кА соответствуют значениям вероятности 98 % и 80 % соответственно.					

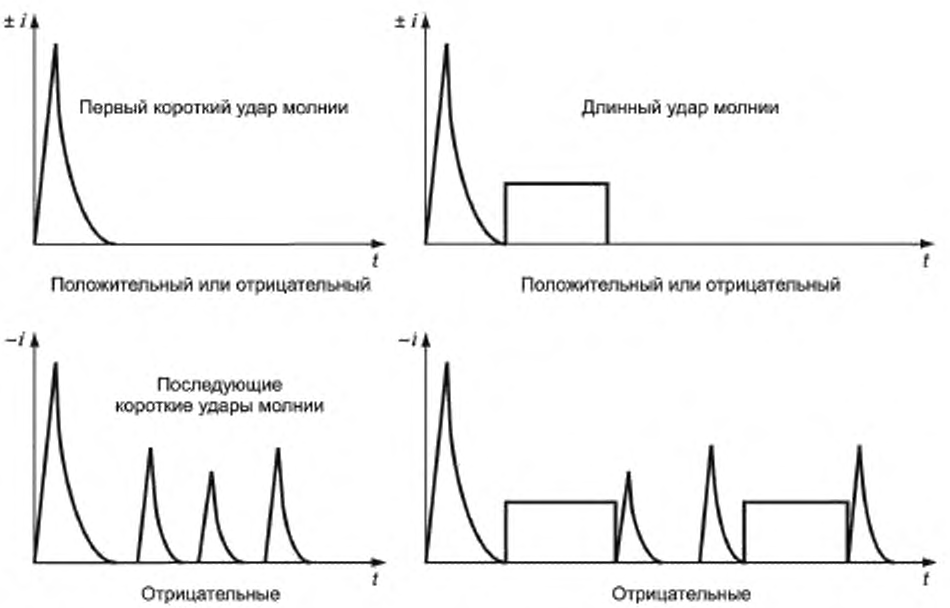


Рисунок А.5 — Возможные элементы нисходящих вспышек (характерны для плоских территорий и низких конструкций)

А.1.4.2 Положительные вспышки «грозовая туча — земля»

В отличие от отрицательных вспышек положительные вспышки «грозовая туча — земля» инициирует непрерывно распространяющийся нисходящий лидер, который не выявляет явных ступеней. Этапы соединительного лидера и обратного удара молнии подобны процессам, описанным выше для отрицательных вспышек. Положительная вспышка «грозовая туча — земля» обычно состоит только из одного обратного удара молнии, за которым может следовать непрерывный ток.

Положительные вспышки «грозовая туча — земля» очень важны для практической молниезащиты, т. к. пиковое значение тока *(I)*,общий перенос заряда *(Q)*,и удельная энергия *(W/R)*могут быть больше по сравнению с отрицательной вспышкой. Обратный удар молнии стремится к меньшей скорости роста тока по сравнению с отрицательным первым обратным ударом молнии. Характерный профиль тока для положительной вспышки «грозовая туча — земля» показан на рисунке А.6. Характерные электрические параметры сведены вместе с параметрами отрицательных разрядов в таблицу А.1 [17] [18].

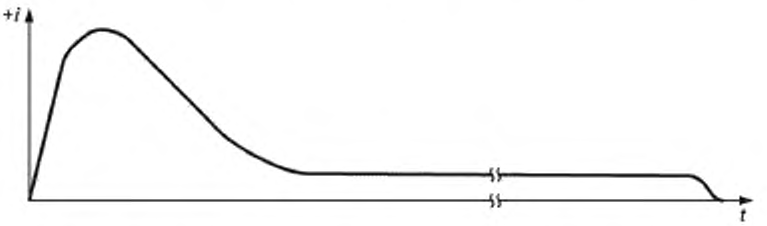


Рисунок А.6 — Характерный профиль положительной вспышки «грозовая туча — земля»

А.1.5 Восходящие инициированные вспышки

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. 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 окружающей местности (например, современная ВЭУ), особенно подвержены воздействию инициируемых вверх вспышек.

Инициируемая вверх вспышка начинается с этапа непрерывного тока. В импульсе непрерывного тока токи могут накладываться (рисунок А.7). За этапом непрерывного тока может следовать последующий(-е) обратный(-е) удар(-ы) молнии по тому же каналу. Эти обратные удары молнии достаточно похожи на последующие обратные удары молнии вспышек «грозовая туча — земля». Инициированные вверх вспышки не содержат компонента, аналогичного первому обратному удару молнии вспышек «грозовая туча — земля». Место приложения к конструкции восходящей вспышки молнии просто совпадает с точкой формирования восходящего лидера.

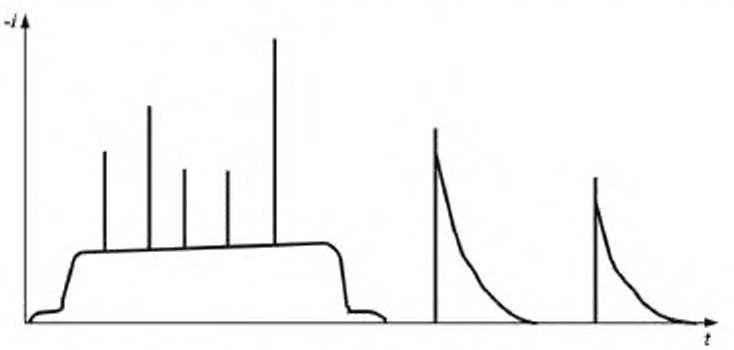


Рисунок А.7 — Характерный профиль инициированной вверх отрицательной вспышки

Параметры инициируемой вверх вспышки измеряют на высоких объектах, которые склонны к появлению вспышек этого типа. Подробную информацию о всемирных наблюдениях и всесторонних обсуждениях восходящих вспышек Раковым и Уманом можно найти в [16]. В последние годы восходящие вспышки изучают благодаря измерениям на ВЭУ [19].

Следующая информация о параметрах тока относится к восходящим отрицательным вспышкам, т. к. инициируемые вверх положительные вспышки, хотя и наблюдаются, очень редки.

Хотя пиковые значения порядка 10 кА относительно низкие, перенос заряда, связанный с начальным непрерывным током, в редких случаях составляет 300 Кл, как показано в таблице А.2 [16]. Инициируемые вверх вспышки могут также состоять из различных комбинаций ранее упомянутых разных составляющих тока, как показано на рисунке А.8.

Таблица А.2 — Параметры тока инициируемых вверх вспышек молнии

Параметр	Максимальное значение
Общий перенос заряда, Кл	300
Общая продолжительность, с	от 0,5 до 1,0
Пиковый ток, кА	20
Средняя скорость нарастания наложенных импульсных токов, кА/мкс	20
Количество наложенных импульсных токов	50

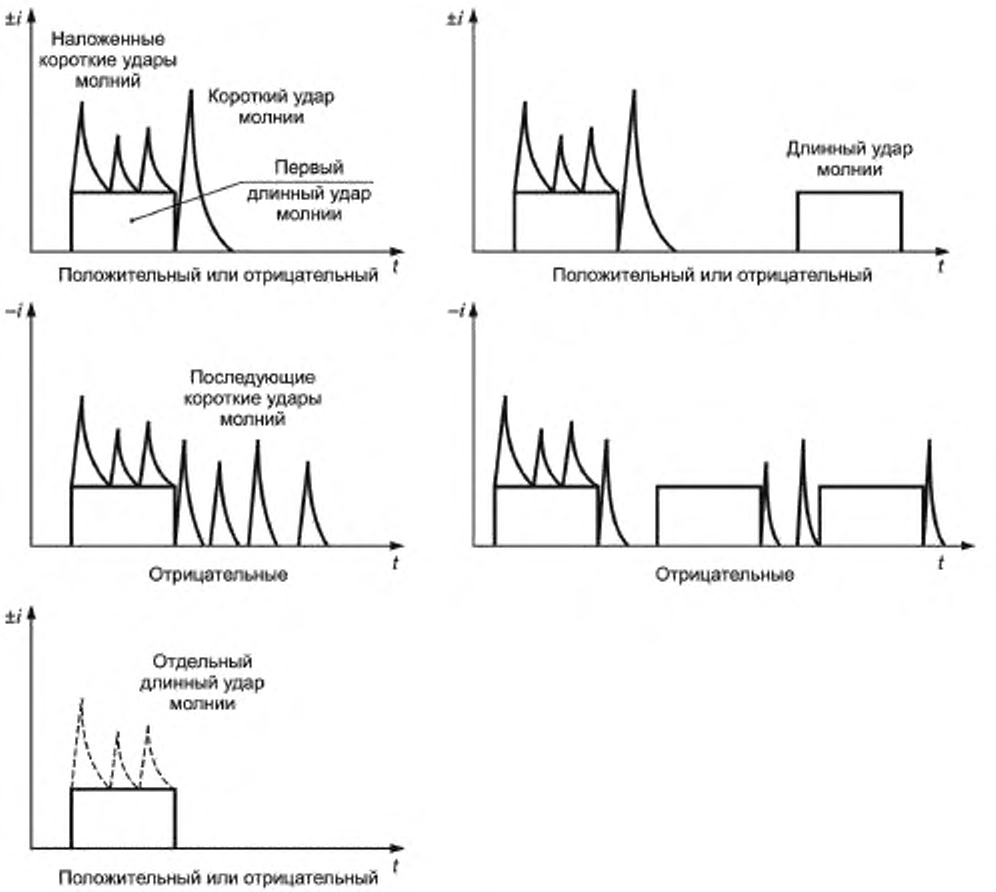


Рисунок А.8 — Возможные элементы восходящих вспышек (характерно для поражаемых и/или высотных конструкций) (рисунок А.4 в ГОСТ Р МЭК 62305-1)

В общем, инициируемые вверх вспышки имеют низкие значения параметров тока по сравнению с нисходящими вспышками молнии, возможно за исключением общего перенесенного заряда. Более того, очевидно, что высокие объекты, расположенные на поражаемых территориях, могут очень часто поражаться восходящими вспышками молнии, особенно во время зимних гроз, когда на очень часто поражаемых высоких объектах наблюдаются десятки восходящих вспышек молний. 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 этот риск восходящих вспышек молний, а разработчикам рекомендуют искать информацию о грозовых условиях зимой на предполагаемых площадках. Поскольку восходящие вспышки молнии исходят от выступающих частей ВЭУ (т. е., лопастей и воздушных систем перехвата вспышек молнии, защищающих расположенные в гондоле метеорологические приборы), дается точка приложения, и при условии правильно разработанной молниезащиты ожидают, что она также хорошо сработает и для восходящих вспышек молнии.

Однако частые зимние грозы могут потребовать более надежных воздушных систем перехвата вспышек молнии или их периодической замены.

А.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 скорость нарастания тока di/t. Каждый параметр стремится запустить свой механизм разрушения. Параметры тока, которые необходимо учитывать для испытаний, — это сочетания этих значений, подбираемые для воспроизведения реального механизма разрушения части испытываемого СМЗ в лаборатории. В таблице А.3 записаны максимальные значения I, Q, W/R, Tи di/t, которые необходимо учесть для испытаний в зависимости от требуемого уровня защиты (см. ГОСТ Р МЭК 62305-1 (приложение D) для получения дополнительной информации).

Таблица А.3 — Сводка угрожающих параметров молнии, которые необходимо учесть при расчете значений для испытаний различных элементов СМЗ и различных УМЗ

Элемент	Основная проблема	Угрожающие параметры молнии					Примечания
Воздушная система перехвата вспышек молнии (молниеприемник)	Эрозия в соединениях (например, тонкие металлические листы)	УМЗ	Q_{long}, Кл	T	—	—	
		I	200	<1 с (приложить Q_{long} в отдельном ударе молнии)			
		II	150		—	—	
		III — IV	100				
Воздушная система перехвата вспышек молнии (молниеприемник) и нисходящий проводник (токоотвод)	Нагрев элементов электрической цепи	УМЗ	W/R, кДж/Ом	T	—	—	Определение размеров по [1] помогает сократить количество испытаний
		I	10000	Применение W/R в адиабатической конфигурации			
		II	5600		—	—	
		III – IV	2500				
	Механические воздействия	УМЗ	I, кА	W/R *кДж/Ом*	—	—	
		I	200	10 000			
		II	150	5600			
		III — IV	100	2500			

Окончание таблицы А.3

Элемент	Основная проблема	Угрожающие параметры молнии					Примечания
Соединительные элементы	Комбинированное воздействие (тепловое, механическое и электрическое)	УМЗ	I, кА	W/R , кДж/Ом	t	—	
		I	200	10000	< 2 мс (применение I и W/R в одиночном импульсе)	—	
		II	150	5600			
		III — IV	100	2500			
Система заземления	Эрозия в точке установки	УМЗ	Q_{long}, Кл	T	—	—	Определение размеров обычно основано на механических или химических свойствах (например, коррозия)
		I	200	< 1 с (применение Q_{long} в одиночном импульсе)	—	—	
		II	150				
		III — IV	100				
УЗП от импульсных перенапряжений, содержащее разрядник искрового разряда	Комбинированное воздействие (тепловое, механическое и электрическое)	УМЗ	I, кА	Q_{short}, Кл	W/R , кДж/Ом	di/dt кА/мкс	Применяют I, Q_{short} и W/R в одиночном импульсе (длительность T < 2 мс); применяют di/dt в отдельном импульсе
		I	200	100	10 000	200	
		II	150	75	5 600	150	
		III — IV	100	50	2 500	100	
УЗП от импульсных перенапряжений, содержащее блоки металооксидных варисторов	Воздействие электрической энергии (перегрузка цепи)	УМЗ	Q_{short}, Кл	—	—	—	Необходимо проверить оба аспекта
		I	100	—	—	—	
		II	75				
		III — IV	50				
	Диэлектрическое воздействие (пробой диэлектрика/ образование трещин)	УМЗ	I, кА	T	—	—	Необходимо провести раздельные испытания
		I	200	< 2 мс (применить I в отдельном импульсе)	—	—	
		II	150				
		III — IV	100				

А.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 кА и могут доходить до 10 кА. Лидеры могут появляться лишь там, где могут образовываться высокие электростатические поля.

А.4 Воздействия 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;
- вспышками молнии вблизи ВЭУ;
- перенесением линий (силовыми и/или линиями связи из-за вспышек молнии в этих линиях или вблизи них).

Приложение В
(справочное)

Оценка воздействия молнии

В.1 Общие положения

В В.2 разъясняют термины, используемые при повреждении и ущербе (В.2.1), для риска и элементов риска (В.2.2), для состава элементов риска, относящихся к ВЭУ (В.2.3), для состава элементов риска, относящихся к служебным линиям (В.2.4).

В В.3 дана оценка значений вероятности, P_X, для различных типов повреждений согласно ГОСТ Р МЭК 62305-2 (приложение В) и комментарии по возможности применения для ВЭУ.

В В.4 дана оценка размера убытка, L_X, согласно ГОСТ Р МЭК 62305-2 (приложение С) и комментарии по уместности применения для ВЭУ.

В В.5 дана оценка вероятности, P'_X, повреждения для служебной линии.

В В.6 дана оценка размера ущерба, L'_X, для служебной линии.

В В.7 дана оценка стоимости ущерба.

В.2 Пояснение терминов

В.2.1 Повреждение и ущерб

В этот раздел включены термины и темы, которые считаются подходящими для ВЭУ.

Ток молнии является первичным источником повреждения. Определяют следующие источники в зависимости от точки удара молнии (таблица В.1):

- S1: молния, поражающая ВЭУ;
- S2: молния, ударяющая вблизи ВЭУ;
- S3: молния, поражающая служебную линию (например, силовой кабель или кабель телекоммуникации);
- S4: молния, ударяющая вблизи служебного кабеля.

Примечания

1 Удар молнии вблизи ВЭУ (S2) не считается угрозой при условии наличия защиты от прямого разряда молнии.

2 Удар молнии вблизи служебной линии (S4) не считается угрозой при условии наличия защиты от прямого разряда молнии. Рассматриваются три основных типа повреждения из-за молнии (таблица Б.2):

- D1: травмирование живых существ;
- D2: физическое повреждение;
- D3: повреждение электрических и электронных систем.

Повреждение ВЭУ молнией может быть ограничено частью ВЭУ или может распространяться на всю ВЭУ. Молния, попавшая в служебную линию, может вызвать повреждение самой служебной системы (например, служебного кабеля) или электрической и электронной систем, связанных со служебной линией. Каждый тип повреждения, одиночного или в сочетании с другими, может вызвать последующий ущерб ВЭУ. Типы ущерба, которые возможны на ВЭУ:

- L1: потеря человеческой жизни;
- L4: потеря экономической ценности (ремонтные расходы на ликвидацию повреждений ВЭУ и снижение дохода).

3 Ущерб служебной линии для общества (L2) и ущерб культурному наследию (L3) не рассматриваются по отношении к ВЭУ. Типы ущерба, которые возможны для служебной линии (например, силовой кабель или кабель телекоммуникации):

- L'4: потеря экономической ценности (ремонтные расходы на ликвидацию повреждений ВЭУ и снижение дохода).

4 Ущерб служебной линии для общества (L'2) не рассматривается.

Таблица В.1 — Источники повреждения, типы повреждения и типы ущерба согласно точки поражения

Точка удара молнии	Источник повреждения	Ветроэнергетическая установка		Служебная линия	
		Тип повреждения	Тип ущерба	Тип повреждения	Тип ущерба
Поражаемая ВЭУ	S1	D1 D2 D3	L1, L4[b)] L1, L4[b)] L1[a)], L4	 D2 D3	 L'4 L'4

Окончание таблицы В.1

Точка удара молнии	Источник повреждения	Ветроэнергетическая установка		Служебная линия	
		Тип повреждения	Тип ущерба	Тип повреждения	Тип ущерба
Поражение вблизи ВЭУ	S2	D3	L1[a], L4		
Поражение служебной линии	S3	D1	L1, L4[b]		
		D2	L1, L4[b]	D2	L'4
		D3	L1[a], L4	D3	L'4
Поражение вблизи служебной линии	S4	D3	L1[a], L4	D3	L'4

[a] Только если отказы внутренних систем непосредственно угрожают жизни людей.
[b] Только если могут погибнуть животные (например, если домашний скот может быть в зоне 3 м от башни ВЭУ).

Таблица В.2 — Риск, возникший в ВЭУ, для каждого типа повреждения или ущерба

Ущерб/Повреждение	L1 Потеря человеческой жизни	L4 Потеря экономической ценности
D1 Травмирование живых существ	R_S	R_S[b]
D2 Физическое повреждение	R_F	R_F
D3 Повреждение электрических и электронных систем	R_O[a]	R_O

[a] Только если отказы внутренних систем непосредственно угрожают жизни людей.
[b] Только если могут погибнуть животные (например, если домашний скот может быть в зоне 3 м от башни ВЭУ).

В.2.2 Риск и составляющие риска

Риск R является величиной вероятного среднего годового ущерба. Для каждого типа ущерба, который может возникнуть в ВЭУ или служебной линии, необходимо оценить соответствующий риск. Риски, которые необходимо оценить для ВЭУ, могут быть следующими:

R_1 — риск потери человеческой жизни;

R_4 — риск потери экономических показателей.

Риски, которые необходимо оценить в служебной линии, могут быть следующими:

R'_4 — риск потери экономических показателей.

Для оценки рисков, R, необходимо определить и подсчитать соответствующие элементы риска (частичные риски в зависимости от источника и типа повреждения).

Каждый риск, R, является суммой элементов этого риска. При расчете риска элементы риска могут быть сгруппированы по источнику и типу повреждения.

Элементы риска для ВЭУ при ударе молнии в ВЭУ:

R_A — элемент, относящийся к травмированию лиц внутри ВЭУ и травмированию живых существ напряжением прикосновения и ступенчатым напряжением в зонах до 3 м за пределами башни ВЭУ. Может возникнуть ущерб типа L1 и, в случае домашнего скота, также L4;

R_B — элемент, относящийся к физическому повреждению, вызванному опасным искрообразованием в поражающей конструкцию вспышке. Может возникнуть ущерб типа L1 и L4;

R_C — элемент, связанный с отказом внутренних систем, вызванный электромагнитным импульсом от грозовых разрядов. Может возникнуть ущерб типа L4 или L1, если отказ внутренних систем непосредственно угрожает человеческой жизни.

Элементы риска для ВЭУ при ударе молнии в служебную линию, связанную с ВЭУ:

R_U — элемент, связанный с травмированием лиц напряжением прикосновения внутри ВЭУ из-за тока молнии, появляющегося в служебной линии, идущей к ВЭУ. Может возникнуть ущерб типа L1;

R_V — элемент, относящийся к физическому повреждению (пожар, возникающий из-за опасной искры между внешними строениями и металлическими частями обычно в точке входа линии в ВЭУ), вследствие тока молнии, передающегося через или вдоль входящей служебной линии. Может возникнуть ущерб типа L1 и L4;

R_W — элемент, относящийся к отказу внутренних систем, вызванный перенапряжениями, наводимыми во входящих служебных линиях и передающихся к ВЭУ. Может возникнуть ущерб типа L4 или L1, если отказ внутренних систем непосредственно угрожает человеческой жизни.

Элементы риска для ВЭУ при ударе молнии вблизи служебной линии, связанной с ВЭУ:

R_Z — элемент, относящийся к отказу внутренних систем, вызванный перенапряжениями, наводимыми во входящих служебных линиях и передающихся к ВЭУ. Может возникнуть ущерб типа L4 или L1, если отказ внутренних систем непосредственно угрожает человеческой жизни.

Элементы риска для служебной линии при ударе молнии в служебную линию, связанную с ВЭУ:

R'_V — элемент, относящийся к физическому повреждению, вследствие механических и тепловых воздействий тока молнии. Может возникнуть ущерб типа L4;

R'_W — элемент, относящийся к отказу служебных линий и соединенного оборудования вследствие наведенных в линиях перенапряжений. Может возникнуть ущерб типа L4.

Элементы риска для служебной линии при ударе молнии вблизи служебной линии, связанной с ВЭУ:

R'_Z — элемент, относящийся к отказу служебных линий и соединенного оборудования вследствие наведенных в линиях перенапряжений. Может возникнуть ущерб типа L'4.

Элементы риска для служебной линии при ударе молнии в ВЭУ, к которой подключена служебная линия:

R'_B — элемент, относящийся к физическому повреждению вследствие механических и тепловых воздействий тока молнии, проходящего по линии. Может возникнуть ущерб типа L'4;

R'_C — элемент, относящийся к отказу соединенного оборудования вследствие перенапряжений, вызванных резистивной связью. Может возникнуть ущерб типа L'4.

B.2.3 Состав элементов риска, связанных с ВЭУ

Элементы риска, которые необходимо учесть для потерь каждого типа в ВЭУ, перечислены ниже:

R_1 — риск потери человеческой жизни

$$R_1 = R_A + R_B + R_C{}^{3)} + R_U + R_V + R_W{}^{3)} + R_Z{}^{3)}. \quad (B.1)^1$$

R_4 — Риск потери экономических показателей

$$R_4 = R_A{}^{4)} + R_B + R_C + R_U{}^{4)} + R_V + R_W + R_Z. \quad (B.2)^2$$

Состав элементов риска со ссылкой на источник повреждения

$$R = R_D + R_I, \quad (B.3)$$

где R_D — риск из-за молнии, попадающей в ВЭУ (источник S1), который определяют как сумму

$$R_D = R_A + R_B + R_C. \quad (B.4)$$

R_I — риск из-за молнии, влияющей на работу ВЭУ, но не попадающей в нее (источники: S3 и S4), который определяют как сумму

$$R_I = R_U + R_V + R_W + R_Z. \quad (B.5)$$

Состав элементов риска со ссылкой на тип повреждения

$$R = R_S + R_F + R_O, \quad (B.6)$$

где R_S — риск травмирования живых существ (D1), который определяют как сумму

$$R_S = R_A + R_U. \quad (B.7)$$

R_F — риск физического повреждения (D2), который определяют как сумму:

$$R_F = R_B + R_V. \quad (B.8)$$

R_O риск из-за отказа внутренних систем (D3), который определяют как сумму

$$R_O = R_C + R_W + R_Z. \quad (B.9)$$

B.2.4 Состав элементов риска, связанных со служебной линией

Элементы риска, которые необходимо учесть для потерь каждого типа в служебной линии, перечислены ниже:

R'_4 — риск потери экономической ценности

$$R'_4 = R'_V + R'_W + R'_Z + R'_B + R'_C. \quad (B.10)$$

---

[1] Только в случае, если отказ внутренних систем непосредственно угрожает человеческой жизни.

[2] Только для ВЭУ, где может быть нанесен ущерб животным (например, если скот может быть в пределах 3 м от башни ВЭУ).

Состав элементов риска со ссылкой на источник повреждения

$$R' = R'_D + R'_I, \quad (B.11)$$

где R'_D — риск из-за вспышек, попадающих в служебную линию (источник S3), определяют как сумму

$$R'_D = R'_V + R'_W. \quad (B.12)$$

R'_I — риск из-за вспышек, влияющих на служебную линию (источники S1 и S4); определяют как сумму

$$R'_I = R'_B + R'_C + R'_Z. \quad (B.13)$$

Состав элементов риска со ссылкой на тип повреждения

$$R'' = R'_F + R'_O, \quad (B.14)$$

где R'_F — риск физического разрушения (D2), который определяют как сумму

$$R'_F = R'_V + R'_B. \quad (B.15)$$

R'_O — риск из-за отказа внутренних систем (D3), который определяют как сумм

$$R'_O = R'_W + R'_Z + R'_C. \quad (B.16)$$

В.3 Оценка вероятности повреждения ветроэнергетической установки

В.3.1 Вероятность (P_A) травмирования живых существ от удара молнии в ветроэнергетическую установку

Значения вероятности, P_A, электрического удара живых существ напряжением прикосновения и ступенчатым напряжением от удара молнии в конструкцию (т. е., ВЭУ), как функции стандартных мер защиты даны в таблице Б.3. Если принято более одной меры защиты, значение P_A является произведением соответствующих значений P_A.

Таблица В.3 — Значения вероятности, P_A, того, что удар молнии в ВЭУ приведет к электрическому удару живых существ напряжением прикосновения и ступенчатым напряжением

Мера защиты	P_A	Элементы
Отсутствуют меры защиты	1	
Электрическая изоляция поражаемого вертикального молниеотвода (например, структурированного поли-этилена не менее 3 мм)	10^{-2}	Не подходит для ВЭУ, которые используют конструкцию мачты в качестве вертикального молниеотвода
Эффективная эквипотенциализация почвы	10^{-2}	Обязательно для ВЭУ, имеющим высоковольтное оборудование согласно стандартным электрическим правилам и нормам
Предупреждения	10^{-1}	

В.3.2 Вероятность (P_B) того, что удар молнии, попадающий в ветроэнергетическую установку, приведет к физическому повреждению

Значения вероятности, P_B, физического повреждения, вызванного ударом молнии в ВЭУ, в зависимости от уровня молниезащиты (УМЗ) даны в таблице В.4.

Таблица В.4 — Значения вероятности, P_B, в зависимости от мер защиты для снижения физического повреждения

Характеристики ВЭУ	Класс СМЗ	P_B
ВЭУ, не защищенная СМЗ	—	1
ВЭУ, защищенная СМЗ	IV	0,2
	III	0,1
	II	0,05
	I	0,02

Окончание таблицы В.4

Характеристики ВЭУ	Класс СМЗ	P_B
ВЭУ с молниезащитой лопастей и гондолы, соответствующей СМЗ-I, и башней, служащей непрерывным естественным вертикальный молниеотводом		0,01
ВЭУ с молниезащитой лопастей, гондолой с металлической крышей (или эквивалентной металлической сеткой), с полной защитой любых установок на крыше гондолы против прямого попадания и башней, служащей непрерывным естественным вертикальный молниеотводом		0,001
Примечание — Значения P_B, отличные от приведенных в таблице Б.4, возможны, если основаны на подробных проработках (см. ГОСТ Р МЭК 62305-2, приложение В (В.2)).		

В.3.3 Вероятность (P_C) того, что удар молнии, попадающий в ветроэнергетическую установку, приведет к отказу внутренних систем

Значения вероятности, P_C, отказа внутренних систем, вызванного ударом молнии в ВЭУ, зависят от принятой согласованной защиты УЗП:

$$P_C = P_{SPD}. \quad (В.17)$$

Значения P_{SPD} зависят от уровня молниезащиты (УМЗ), для которых УЗП проектируют, как показано в таблице Б.5.

Таблица В.5 — Значения вероятности P_{SPD} как функция УМЗ, для которой проектируют УЗП

Уровень молниезащиты	P_{SPD}
Нет согласованной защиты УЗП	1
III-IV	0,03
II	0,02
I	0,01
См. примечание 3 (Б.3.3)	от 0,005 до 0,001

Примечания

1 Только «согласованная защита УЗП» приемлема в качестве меры по защите для снижения P_C. Согласованная защита УЗП эффективна для снижения P_C лишь в том случае, если ступица, гондола и мачта ВЭУ защищены СМЗ или если конструкции с непрерывным металлическим или силовым железобетонным каркасом служат естественным СМЗ при выполнениия требований стандарта [1] по металлизации и заземлению.

2 Экранирование внутренних систем, соединенных к внешним линиям, имеющим молниезащитные кабель или системы, провода которых проложены в молниезащищенных кабель-каналах, металлических трубопроводах или трубах, может не потребовать использования согласованной защиты.

3 Меньшие значения P_{SPD} возможны в том случае, когда УЗП имеет лучшие характеристики защиты (способность выдерживать больший ток, более низкие уровни защиты и т. д.) по сравнению с требованиями, определенными для УМЗ-I в соответствующих местах установки.

В.3.4 Вероятность (P_M) того, что удар молнии, попадающий в ветроэнергетическую установку, приведет к отказу внутренних систем

Из-за высоты ВЭУ большинство вспышек молнии попадает непосредственно в ВЭУ, а не в зоны около ВЭУ. Более того, большие металлические конструкции будут экранировать внутренние системы. Таким образом, вероятность того, что вспышка молнии вызовет отказ внутренних систем можно считать ничтожной, если ступица, гондола и мачта ВЭУ защищены СМЗ или если конструкции с непрерывным металлическим или силовым железобетонным каркасом служат естественным СМЗ при выполнении требований [1] по металлизации и заземлению.

В.3.5 Вероятность (P_U) того, что удар молнии в служебную линию приведет к травмированию живых существ

Значения вероятности, P_U, травмирования живых существ напряжением прикосновения от вспышек молнии в служебной линии (силовой кабель или кабель телекоммуникации), входящей в ВЭУ, зависит от характеристик экрана служебной линии, импульсного выдерживаемого напряжения внутренних систем, подключенных к служебной линии, стандартных мер защиты (физические ограничения, предупреждения и т. д. (таблица Б.3) и УЗП, находящихся в начале служебной линии.

Когда УЗП не используют для эквипотенциальной металлизации в соответствии с международным стандартом [1], значение P_U равно значению P_{LD}, где P_{LD} — вероятность отказа внутренних систем из-за удара молнии, попавшей в соединенной служебной линии.

Значения P_{LD} приведены в таблице В.6.

При использовании УЗП для эквипотенциальной металлизации значение P_U ниже P_{SPD} (таблица В.5).

Таблица В.6 — Значения вероятности, P_{LD}, в зависимости от сопротивления, Rs, экрана кабеля и импульсного выдерживаемого напряжения, U_w, оборудования

U_w кВ	$5 < R_S \le 20$ Ом/км	$1 < R_S \le 5$ Ом/км	$R_S \le 1$ Ом/км
1,5	1	0,8	0,4
2,5	0,95	0,6	0,2
4	0,9	0,3	0,04
6	0,8	0,1	0,02
Примечание — R_S — сопротивление экрана кабеля, Ом/км.			

Для неэкранированной служебной линии принять $P_{LD} = 1$.

Когда предусмотрены меры защиты, подобно физическим ограничениям, предупреждениям и т. д., вероятность, P_U, необходимо далее снизить, умножив их на значения вероятности, P_A (см. таблицу В.3).

В.3.6 Вероятность (P_V) физического повреждения из-за удара молнии, попавшей в служебную линию

Значения вероятности, P_V, физического повреждения от вспышки молнии, попавшей в служебную линию, входящую в ВЭУ, зависят от характеристик экрана служебной линии, импульсного выдерживаемого напряжения внутренних систем, подключенных к служебной линии и имеющих УЗП.

Когда УЗП не используют для эквипотенциальной металлизации в соответствии с международным стандартом [1], значение P_V равно значению P_{LD}, где P_{LD} — вероятность отказа внутренних систем из-за вспышки молнии, попавшей в присоединенную служебную линию.

Значения P_{LD} приведены в таблице В.6.

При использовании УЗП для эквипотенциальной металлизации значение P_V ниже P_{SPD} (таблица В.5) и P_{LD}.

В.3.7 Вероятность (P_W) отказа внутренних систем из-за вспышки молнии, попавшей в служебную линию

Значения вероятности, P_W, отказа внутренних систем вследствие попадания вспышки молнии в служебную линию, входящую в ВЭУ, зависят от характеристик экрана служебной линии, импульсного выдерживаемого напряжения внутренних систем, подключенных к служебной линии и имеющих УЗП.

Когда не используют согласованную защиту УЗП, отвечающую требованиям международного стандарта [7], значение P_W равно значению P_{LD}, где P_{LD} — вероятность отказа внутренних систем вследствие попадания вспышки молнии в присоединенную служебную линию.

Значения P_{LD} приведены в таблице В.6.

Когда согласованную защиту УЗП, отвечающую требованиям [7], не используют, значение P_W ниже P_{SPD} (см. таблицу В.5) и P_{LD}.

В.3.8 Вероятность (P_Z) отказа внутренних систем из-за удара молнии у входящей служебной линии

Значения вероятности, P_Z, отказа внутренних систем из-за удара молнии у служебной линии, входящей в конструкцию, зависят от характеристик экрана служебной линии, импульсного выдерживаемого напряжения систем, подключенных к служебной линии и имеющих УЗП.

Когда не используют согласованную защиту УЗП, значение P_Z равно значению P_{LI}, где P_{LI} — вероятность отказа внутренних систем из-за вспышки молнии у присоединенной служебной линии. Значения P_{LI} даны в таблице В.7.

Когда не используют согласованную защиту УЗП, значение P_Z ниже значений P_{SPD} (см. таблицу В.5) и P_{LI}.

Таблица В.7 — Значения вероятности, P_{LI}, в зависимости от сопротивления, R_S, экрана кабеля и импульсного выдерживаемого напряжения, U_w, оборудования

U_w, кВ	Без экрана	Экран, не металлизированный с эквипотенциальной контактной шиной, к которой подключено оборудование	Экран, металлизированный с эквипотенциальной контактной шиной и оборудованием подключенным к той же контактной шине		
			$5 < R_S \le 20$, Ом/км	$1 < R_S \le 5$, Ом/км	$R_S \le 1$, Ом/км
1,5	1	0,5	0,15	0,04	0,02
2,5	0,4	0,2	0,06	0,02	0,008
4	0,2	0,1	0,03	0,008	0,004
6	0,1	0,05	0,02	0,004	0,002
Примечание — R_S — сопротивление экрана кабеля, Ом/км.					

В.4 Оценка размера ущерба (L_X) в ветроэнергетической установке

В.4.1 Общие положения

Значения размера ущерба, L_X, должен оценить и установить разработчик молниезащиты (или владелец ВЭУ). Здесь приведены рекомендуемые стандартные средние значения. Другие значения могут быть назначены любым государственным комитетом (или согласованы между покупателем и заказчиком).

В.4.2 Среднее относительное значение размера ущерба в год

Ущерб, L_X, имеет средний относительный размер конкретного типа разрушения, который может быть вызван вспышкой молнии, с учетом его силы и влияний.

Его значение зависит от:

- количества человек и времени, в течение которого они остаются в опасном месте;
- числа поврежденных изделий;
- числа элементов ВЭУ, подвергшихся разрушению.

Ущерб, L_X, меняется с типом ущерба (L1, L2, L3 и L4) и, для каждого типа ущерба — с типом разрушения (D1, D2 и D3), вызывающим ущерб. Используются следующие обозначения:

- L_t — ущерб вследствие травмирования напряжением прикосновения и ступенчатым напряжением;
- L_f — ущерб вследствие физического разрушения;
- L_o — ущерб вследствие отказа внутренних систем.

В.4.3 Потеря человеческой жизни

Значения L_t, L_f и L_o можно определить по относительному числу жертв по следующему приближенному равенству

$$L_X = (n_p/n_t)\cdot(t_p/8760), \tag{В.18}$$

где n_p — число возможных лиц (жертв), которым угрожает опасность;

n_t — ожидаемое общее число человек (в ВЭУ);

t_p — время в часах в год, в течение которого люди находятся в опасном месте вне ВЭУ (только L_t) или внутри ВЭУ (L_t, L_f и L_o).

Потеря человеческой жизни вызвана характеристиками конструкции ВЭУ. Это учтено увеличением (h_Z) и уменьшением (r_t, r_p, r_a, r_u) коэффициентов следующим образом:

$$L_A = r_A \cdot L_t; \tag{В.19}$$

$$L_U = r_u \cdot L_t; \tag{В.20}$$

$$L_B = L_V = r_p \cdot h_Z \cdot r_f \cdot L_f; \tag{В.21}$$

$$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_O. \tag{В.22}$$

где L_A — ущерб, связанный с травмированием живых существ;

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

L_C — ущерб, связанный с повреждением внутренних систем (удары молнии, попадающие в служебную линию);

L_M — ущерб, связанный с повреждением внутренних систем (удары молнии у конструкции);

L_U — ущерб, связанный с травмированием живых существ (удары молнии, попадающие в служебную линию);

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

r_a — коэффициент, снижающий потерю человеческой жизни в зависимости от типа почвы (таблица В.8);

r_u — коэффициент, снижающий потерю человеческой жизни в зависимости от типа площадки (таблица В.8);

r_p — коэффициент, снижающий ущерб от физического повреждения в зависимости от мер, принимаемых для снижения последствий пожара (таблица В.9);

r_f — коэффициент, снижающий ущерб от физического повреждения в зависимости от риска пожара в ВЭУ (таблица В.10);

h_z — коэффициент, увеличивающий ущерб от физического разрушения при наличии особой опасности (таблица В.11).

Таблица В.8 — Значения коэффициентов снижения r_a и r_u в зависимости от типа поверхности почвы или площадки

Тип поверхности	Сопротивление контакта кОм [a)]	r_a и r_u
Земельный бетон	≤1	10^{-2}
Мрамор, керамика	от 1 до 10	10^{-3}
Гравий	от 10 до 100	10^{-4}
Асфальт, древесина	≥ 100	10^{-5}
[a)] Значения, замеренные между электродом площадью 400 см^2, сжатым с силой 500 Н в точке бесконечности.		

Таблица В.9 — Значения коэффициента снижения r_p в зависимости от мер, принимаемых для снижения последствий пожара

Меры	r_p
Нет мер	1
Одна из следующих мер: огнетушители; стационарные обслуживаемые вручную противопожарные установки; ручные системы сигнализации; пожарные краны; огнеупорные помещения; защищенные маршруты эвакуации	0,5
Одна из следующих мер: стационарные автоматически обслуживаемые противопожарные установки; автоматические системы сигнализации [a]	0,2
[a] Только при условии защиты от перенапряжений и другого повреждения и в том случае, когда пожарные смогут приехать менее, чем в течение 10 мин.	

В случае принятия более одной меры значение r_p нужно брать самым низким из соответствующих значений.

Примечание — Риск взрыва не считается относящимся к ВЭУ.

Таблица В.10 — Значения коэффициента снижения r_f в зависимости от риска пожара ВЭУ

Риск пожара	r_f
Высокий	10^{-1}
Обычный	10^{-2}
Низкий	10^{-3}
Отсутствует	0

Примечания

1 К конструкциям, которые считают имеющими высокий риск пожара, можно отнести конструкции с горючими материалами (лопасти или крыши гондолы) с удельной горючей нагрузкой более 800 МДж/м^2.

2 К конструкциям, которые считают имеющими обычный риск пожара, можно отнести конструкции с горючими материалами (лопасти или крыши гондолы) с удельной горючей нагрузкой между 800 МДж/м^2 и 400 МДж/м^2.

3 К конструкциям, которые считают имеющими низкий риск пожара, можно отнести конструкции с горючими материалами (лопасти или крыши гондолы) с удельной горючей нагрузкой менее 400 МДж/м^2.

4 Удельная горючая нагрузка является отношением количества горючего материала в конструкции ко всей поверхности конструкции.

Таблица В.11 — Значения коэффициента h_Z, повышающего относительное количество ущерба в присутствии особой опасности

Вид особой опасности	h_Z
Отсутствует особая опасность	1
Низкий уровень паники (несколько профессионалов)	2
Сложность эвакуации	5

Примечания

1 Ущерб служебной линии общего назначения не считают относящимся к ВЭУ, т. к. снижение дохода от производимого электричества необходимо относить только к экономическому ущербу.

2 Риск невозмещения культурного наследия не считается относящимся к ВЭУ.

В.4.4 Экономический ущерб

Значения L_t, L_f и L_o можно определить по соответствующему размеру возможного ущерба по следующему приближенному равенству

$$L_X = c/c_t, \tag{B.23}$$

где c — среднее значение возможного ущерба ВЭУ (включая его содержимое, заработанный доход и последствия) в денежных единицах;

c_t — общая ценность ВЭУ (включая его содержимое и заработанный доход) в денежных единицах.

Стандартные средние значения L_t, L_f и L_o для использования, когда определение c и c_t является сомнительным или сложным, представлены в таблице В.12.

Таблица В.12 — Стандартные средние значения L_t, L_f и L_o

Ветроэнергетическая установка	Значение
L_t внутри	10^{-4}
L_t снаружи	10^{-2}
L_f	10^{-1}
L_o	10^{-4}

На ущерб экономической ценности влияют характеристики конструкции. Это учтено увеличением (h_Z) и уменьшением (r_p, r_a ,r_f ,r_u) коэффициентов следующим образом

$$L_A = r_A \cdot L_t; \tag{B.24}$$

$$L_U = r_u \cdot L_t; \tag{B.25}$$

$$L_B = L_V = r_p \cdot h_Z \cdot r_f \cdot L_f; \tag{B.26}$$

$$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_O. \tag{B.27}$$

где L_A — ущерб, связанный с травмированием живых существ;

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

L_C — ущерб, связанный с повреждением внутренних систем (удары молнии, попадающие в служебную линию);

L_M — ущерб, связанный с повреждением внутренних систем (удары молнии у служебной линии);

L_U — ущерб, связанный с травмированием живых существ (удары молнии, попадающие в служебную линию);

L_V — ущерб конструкции, связанный с физическим повреждением (вспышки молнии, попадающие в служебную линию);
r_a — коэффициент, снижающий потерю человеческой жизни в зависимости от типа почвы (таблица В.8);
r_a — коэффициент, снижающий потерю человеческой жизни в зависимости от типа почвы (таблица В.8);
r_u — коэффициент, снижающий потерю человеческой жизни в зависимости от типа площадки (таблица В.8);
r_p — коэффициент, снижающий ущерб вследствие физического повреждения в зависимости от мер, принимаемых для снижения последствий пожара (таблица В.9);
r_f — коэффициент, снижающий ущерб вследствие физического повреждения в зависимости от риска пожара в ВЭУ (таблица В.10);
h_z — коэффициент, увеличивающий ущерб от физического разрушения при наличии особой опасности (таблица В.11).

В.5 Оценка вероятности P'_X повреждения служебной линии

В.5.1 Служебная линия с металлическими проводниками

В.5.1.1 Вероятности P'_B и P'_C разрушения служебной линии, к которой присоединена ветроэнергетическая установка, из-за попадания вспышки молнии в ветроэнергетическую установку

Вероятность, P'_a, того, что вспышка молнии в ВЭУ, к которой присоединена служебная линия, вызовет физические повреждения, и вероятность, P'_c, того, что вспышка молнии в ВЭУ, к которой присоединена служебная линия, вызовет отказ оборудования служебной линии связаны с током повреждения I_a, который, в свою очередь, зависит от характеристик служебной линии, числа входящих в ВЭУ служебных линий и принятых мер защиты. Для неэкранированных служебных линий необходимо принять I_a = 0 кА.

Для экранированных служебных линий ток повреждения I_a (кА) необходимо оценить по следующей формуле

$$I_a = 25n \cdot U_W/(R_S \cdot K_d \cdot K_p), \quad (B.28)$$

где K_d — коэффициент, зависящий от характеристик служебной линии (см. таблицу В.13);
K_p — коэффициент, учитывающий влияние принятых мер защиты (см. таблицу В.14);
U_W — импульсное выдерживаемое напряжение, кВ (см. таблицу В.15 для кабелей и таблицу В.16 для аппаратуры);
R_S — сопротивление экрана кабеля, Ом/км;
n — количество служебных линий, подходящих к ВЭУ.

Примечание — УЗП в точке входа в ВЭУ повышают ток повреждения I_a и могут иметь эффект положительной защиты.

Таблица В.13 — Значения коэффициента K_d в зависимости от характеристик экранированной служебной линии

Служебная линия	K_d
С экраном с контактом с почвой	1
С экраном без контакта с почвой	0,4

Таблица В.14 — Значения коэффициента K_p в зависимости от мер защиты

Мера защиты	K_p
Отсутствуют меры защиты	1
Дополнительные экранирующие провода — один проводник[a)]	0,6
Дополнительные экранирующие провода — два проводника[a)]	0,4
Молниезащищенный кабель-канал	0,1
Молниезащищенный кабель	0,02
Дополнительные экранируемые провода — стальная трубка	0,01

[a)] Экранирующий провод помещают на высоте порядка 30 см над кабелем; два экранирующих провода расположены на высоте 30 см над кабелем симметрично относительно оси кабеля.

Таблица В.15 — Импульсное выдерживаемое напряжение U_W в зависимости от типа кабеля

Тип кабеля	U_n, кВ	U_W, кВ
TLC — изолированный бумагой	—	1,5
TLC — изолированный поливинилхлоридом, пентаэритритом	—	5
Мощность	< 1	15
Мощность	3	45
Мощность	6	60
Мощность	10	75
Мощность	15	95
Мощность	20	125

Таблица В.16 — Импульсное выдерживаемое напряжение U_W в зависимости от типа аппаратуры

Тип аппаратуры	U_W, кВ
Электронная	1,5
Электронная аппаратура пользователя (U_n < 1 кВ)	2,5
Электронная аппаратура сети (U_n < 1 кВ)	6

Значения P'_B и P'_C в зависимости от тока повреждения I_a приведены в таблице В.17.

Таблица В.17 — Значения вероятности P'_B, P'_C, P'_V и P'_W в зависимости от тока повреждения I_a

I_a, кА	P'_B, P'_C, P'_V, P'_W	I_a, кА	P'_B, P'_C, P'_V, P'_W
0	1	60	0,2
3	0,99	80	0,1
5	0,95	100	0,05
10	0,9	150	0,02
20	0,8	200	0,01
30	0,6	300	0,005
40	0,4	400	0,002
50	0,3	600	0,001

В.5.1.2 Вероятности (P'_V) и (P'_W) повреждения от вспышки молнии, попавшей в служебную линию

Вероятность, P'_V, того, что вспышка молнии, попавшая в служебную линию, вызовет физическое повреждение и вероятность, P'_W, того, что вспышка молнии, попавшая в служебную линию, вызовет отказ оборудования служебной линии связаны с током повреждения I_a, который, в свою очередь, зависит от характеристик служебной линии и принятых мер защиты.

Для неэкранированных служебных линий необходимо принять I_a = 0 кА.

Для экранированных служебных линий ток повреждения I_a (кА) необходимо оценить по формуле

$$I_a = 25 \cdot U_W / (R_S \cdot K_d \cdot K_p), \quad (B.29)$$

где K_d — коэффициент, зависящий от характеристик служебной линии (см. таблицу В.13);

K_p — коэффициент, учитывающий влияние принятых мер защиты (см. таблицу В.14);

U_w — импульсное выдерживаемое напряжение (смотри таблицу В.15 для кабелей и таблицу В.16 для аппаратуры), кВ;

R_S — сопротивление экрана кабеля, Ом/км.

При оценке, P'_V, для линий телекоммуникации максимальные значения допускаемого тока повреждения I_a следующие:

- I_a = 40 кА — для кабелей со свинцовым экраном;
- I_a = 20 кА — для кабелей с алюминиевым экраном.

Примечание — Эти значения являются грубой оценкой испытательного тока (I_t), разрушающего стандартные кабели телекоммуникации в точке поражения молнией. Если существует какое-либо доказательство, что эти значения не применимы для данной конструкции кабеля, можно использовать другие значения. В этом случае для оценки тока поражения необходимо проводить испытания.

Значения P_V и P_W в зависимости от тока поражения I_a приведены в таблице В.17.

В.5.1.3 Вероятность (P'_Z) того, что попадание вспышки молнии около служебной линии вызовет повреждение

Вероятность, P'_Z, того, что попадание вспышки молнии около служебной линии вызовет отказ подключенной аппаратуры, зависит от характеристик служебной линии и принятых мер защиты.

Когда УЗП, соответствующую [7], не используют, значение P'_Z равно значению P_{LI}.

Значения P_{LI} приведены в таблице В.7.

Когда используют УЗП, отвечающую требованиям [7], значение P_Z ниже P_{SPD} (см. таблицу В.5) и P_{LI}.

В.5.1.4 Оптико-волоконные линии

Оптико-волоконные линии в настоящем стандарте не рассматриваются.

В.6 Оценка количества ущерба, L'_X, в служебной линии

В.6.1 Общие положения

Ущерб, L'_X, имеет средний относительный размер конкретного типа разрушения, который может быть вызван вспышкой молнии с учетом его силы и последствий.

Его значение зависит от:

- типа и важности услуги, предоставляемой населению;
- ценности товаров, подвергшихся разрушению.

Ущерб, L'_X, меняется с типом рассматриваемого ущерба (L'_1, L'_2 и L'_4) и для каждого типа ущерба — с типом разрушения (D2 и D3), вызывающего ущерб. Используются следующие обозначения:

L_f — ущерб вследствие физического разрушения;

L_o — ущерб вследствие отказа внутренних систем.

Примечание — Ущерб предоставляемой населению услуги не считают имеющим отношение к ВЭУ, следовательно, ущерб, L'_X, услуги рассматривается только как экономический.

В.6.2 Экономический ущерб

Значение L_t, L_f and L_o можно определить по соответствующему относительному размеру возможного ущерба по следующему приближенному равенству

$$L_X = c/c_t, \tag{B.30}$$

где c — среднее значение возможного ущерба ВЭУ, его содержимое и соответствующие работы в денежных единицах;

c_t — итоговые значения L'_f и L'_o, для использования для всех типов служебных линий, когда определение c и c_t представляет сложность или точно не известно

$$L'_f = 10^{-1} \quad L'_o = 10^{-3};$$

$$L'_B = L'_V = L'_f; \tag{B.31}$$

$$L'_C = L'_W = L'_Z = L'_o. \tag{B.32}$$

В.7 Оценка экономического ущерба

Стоимость общего ущерба C_L можно рассчитать по формуле:

$$C_L = (R_A + R_U)\cdot C_A + (R_B + R_V)(C_A + C_B + C_S + C_C) + (R_C + R_M + R_W + R_Z)\cdot C_S, \tag{B.33}$$

где R_A и R_U — составляющие риска, связанного с гибелью животных без принятия мер защиты;

R_B и R_V — составляющие риска, связанного с физическим повреждением без принятия мер защиты;

R_C, R_M, R_W, R_Z — составляющие риска, связанного с отказом электрических и электронных систем без принятия мер защиты;

C_A — стоимость животных;

C_B — стоимость систем в ВЭУ;

C_S — стоимость ВЭУ;

C_C — стоимость содержимого ВЭУ.

Общую стоимость, C_{RL}, остаточного ущерба несмотря на меры по защите можно оценить по следующей формуле

$$C_{RL} = (R'_A + R'_U) \cdot C_A + (R'_B + R'_V) \cdot (C_A + C_B + C_S + C_C) + (R'_C + R'_M + R'_W + R'_Z) \cdot C_S, \quad (B.34)$$

где R'_A и R'_U — составляющие риска, связанного с гибелью животных с принятием мер защиты;
R'_B и R'_V — составляющие риска, связанного с физическим повреждением с принятием мер защиты;
R'_C, R'_M, R'_W, R'_Z — составляющие риска, связанного с отказом электрических и электронных систем с принятием мер защиты.

Годовую стоимость, C_{PM}, мер защиты можно оценить с помощью равенства

$$C_{PM} = C_P \cdot (i + a + m), \quad (B.35)$$

где C_P — стоимость мер производства;
i — процентная ставка;
a — амортизационные отчисления;
m — периодичность регламентных работ.

Экономия денежных средств в год S составляет

$$S = C_L - (C_{PM} + C_{RL}). \quad (B.36)$$

Защита адекватна, если экономия денежных средств в год $S > 0$.

B.8 Анализ проблем

Анализ проблем в настоящем стандарте не рассматривается.

Приложение С
(справочное)

Методы защиты лопастей

С.1 Общие положения

С.1.1 Типы лопастей и методы защиты для лопастей

Современные лопасти ветроэнергетических установок представляют собой большие полые конструкции, изготовленные из композиционных материалов, таких как стеклопластик, дерево, древесно-слоистый пластик и углепластик из углеродного волокна. 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, подшипники, тросы, электрические провода, пружины и крепежные элементы сделаны из металла.

Одно время считалось, что молния не ударит в лопасти, сделанные исключительно из непроводящего материала, но практический опыт показал, что это не так. На самом деле молния ударяет в лопасти, не содержащие какие-либо металлические элементы, и когда в лопасти образуется дуга молнии, возникает серьезное повреждение. Две стороны или покрытия поверхности лопасти обычно изготавливаются в виде отдельных листов из стекловолокна или других композиционных 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. С другой стороны, покрытия лопасти обеспечивают также механическую прочность лопасти, что позволяет не использовать силовой лонжерон. В итоге лопасти могут быть соединены в одно целое, и, следовательно, такие лопасти могут быть без выше указанных клеевых соединений. Существует несколько типов лопастей в зависимости от применяемого механизма управления и тормозного устройства, а также использования изоляционного и проводящего композиционного материала. Пять основных типов представлены на рисунке С.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.

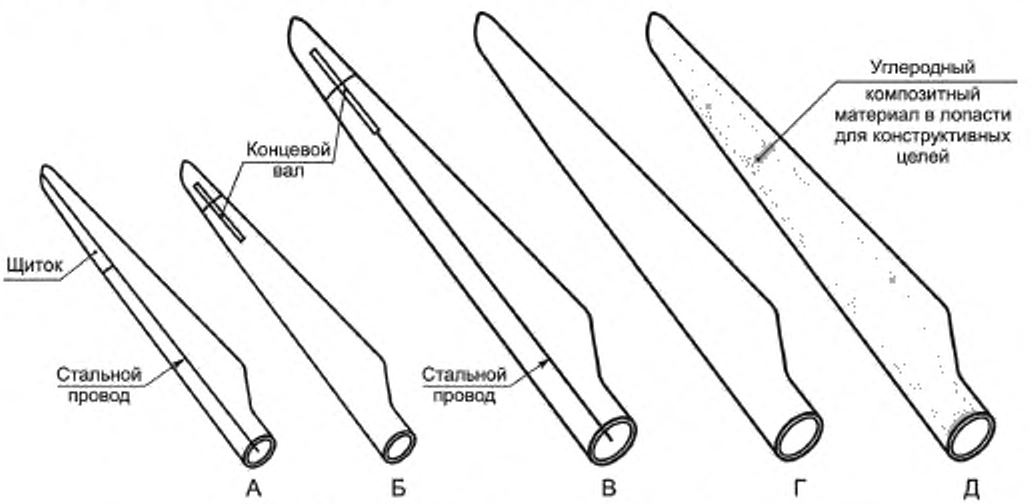


Рисунок С.1 — Типы лопастей ветроэнергетических установок

В лопастях типа Б используется тормоз на концевой части, который удерживается пружиной и отпускается при чрезмерной скорости вращения от центробежной силы. Что касается лопастей типа Б, 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 комеле лопасти. Такие внутренние дуги неизменно ведут к катастрофическому разрушению лопасти. Лопасти типа А и Б широко применялись для ветроэнергетических установок более старого образца мощностью 100 кВт.

Лопасть типа В — 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 В, также как и у типа Б 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 мм 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. В.6 с дальнейшим описанием определения размеров систем защиты).

Лопасть типа Г — 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 Д — это лопасть, у которой некоторые элементы конструкции заменены углеродным композитным материалом, поскольку он обладает наиболее подходящими механическими свойствами. В зависимости от конкретной конструкции углеродный композиционный материал может использоваться в качестве элемента упрочнения покрытия лопасти, а также для несущих элементов конструкции в виде силового лонжерона и основного слоистого пластика. Благодаря его электрическим свойствам он может быть включен в элементы вертикального молниеотвода СМЗ. Вопросы по молниезащите лопастей ветроэнергетических установок, содержащих углеродный композиционный материал, рассмотрены в С.3.

Вспышки молнии, попадающие в непроводящие лопасти или изоляционные части лопастей, содержащие проводимые части, можно по меньшей мере объяснить тем, что загрязнения и вода со временем делают такие лопасти более проводимыми. Лабораторные испытания высоким напряжением показали, что дуговой разряд попадает в непроводящие лопасти, фактически обрызганные соленой водой, как если бы лопасть была металлической [20]. Другое объяснение заключается в том, что лопасти просто находятся на пути удара молнии в ветровую турбину. Кроме того, известно, что разряды на поверхности образуются легче, чем в воздухе, и особенно, если на поверхности есть соль и вода. В любом случае практический опыт показывает, что серьезное повреждение молнией как непроводящих лопастей (тип Г), так и лопастей, содержащих углеродный композиционный материал (тип Е), возникает довольно часто, и поэтому необходима молниезащита.

Примечание — Ссылки на литературные источники указаны цифрами (х) в данном приложении и представлены в библиографическом списке.

С.1.2 Механизм разрушения лопасти

Типичными видами разрушений в точках попадания молнии являются расслоение и сжигание композиционного материала поверхности, а также нагревание или плавление металлических элементов, служащих точками крепления.

Наиболее серьезные повреждения лопастей ветроэнергетических установок 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 композиционных 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 каким-либо токопроводящим элементом внутри лопасти. Что касается типа В, повреждение часто сводится к повреждению концевой части, а основная часть лопасти не повреждается. Повреждение основных частей лопастей типа В 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 С.2.4.

С.2 Методы защиты

С.2.1 Общие положения

Общей проблемой молниезащиты лопастей ВЭУ является безопасное проведение тока молнии от точки попадания до ступицы таким образом, чтобы избежать образования дуги молнии внутри лопасти. Этого можно достичь путем увода тока молнии от точки попадания по поверхности к комелю 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 токопроводящей для безопасного прохода тока молнии к комелю лопасти. Варианты этих двух методов используются для лопастей ВЭУ (рисунок С.2).

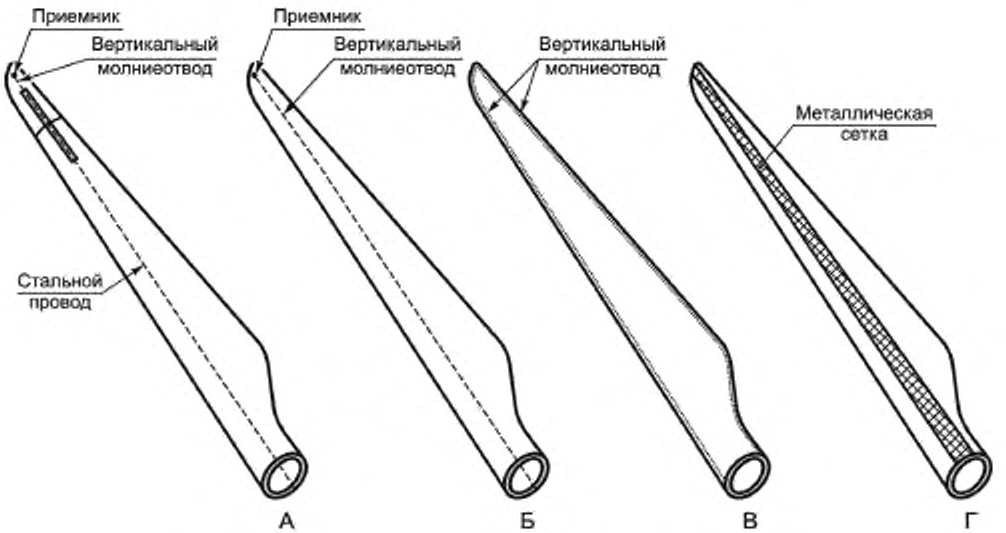


Рисунок С.2 — Принципы молниезащиты для лопастей больших ВЭУ

С.2.2 Воздушные системы перехвата ударов молнии, расположенные на поверхности лопасти или помещенные внутри

Металлические проводники на поверхности лопасти, служащие в качестве воздушной системы перехвата ударов молнии 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 [21], [22].

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 комелем 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 В). 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 [22] — [26].

С.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 [23] и [27]. 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 вспышки вблизи поверхности лопасти [21]. Это может привести к повреждению структуры.

Некоторые эксперименты с сегментными лентами молниеуловителя проводились ранее [28] и [29]. Такие сегментные ленты используются на обтекателях антенны летательного аппарата, поскольку они не влияют на сигнал радара. Использование сегментированных лент молниеуловителя с длительным сроком службы как части молниезащиты для лопастей ВЭУ, содержащих углеродный композиционный материал, рассмотрено в литературе [30].

Возможно, что металлическая лента может быть использована в качестве одноразовой защиты, которую необходимо заменять после удара молнии.

С.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 приемников молнии. Такие системы защиты используются на летательных аппаратах [21].

Система молниезащиты, используемая для многих лопастей и производимая в настоящее время, имеет отдельные приемники молнии, расположенные на кончике лопасти (типы А и Б на рисунке С.2). Система вертикальных молниеотводов проводит ток молнии от приемников на кончике к комелю 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 Б).

Было изготовлено несколько тысяч лопастей с такой системой молниезащиты (тип А и Б на рисунке С.2). Очень успешен опыт работы с данной системой молниезащиты для лопастей длиной 20 м [31]. Принцип использования одного или нескольких внешних средств воздушного перехвата вспышек молнии, 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 токопроводящих 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 С.1.2.

Таким разрядам можно препятствовать или устранять их путем защиты внутреннего вертикального молниеотвода и других проводящих элементов в лопасти при помощи электроизоляционного материала, таким образом, уменьшая проблему [32] и [33].

С.2.5 Проводящие материалы поверхности

Альтернативой воздушной системе перехвата вспышек молнии, расположенной на поверхности лопасти, является создание самой проводящей поверхности. В авиационной промышленности молниезащита стеклопластика и углепластика 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 композиционного материала, металлические провода, вплетенные во внешние слои композиционного материала или металлические сетки, размещенные прямо под поверхностью [21], [26], [34] и [35]. Молниезащита лопастей ВЭУ сделана из металлической сетки, помещенной вдоль сторон лопастей прямо под наружным отделочным слоем (D на рисунке С.2). Иногда самый кончик лопасти или сделан из металла или покрыт металлической пластиной [23], [24], [25], [26], [36] и [37]. Преимущество использования металлических сеток или других тонкостенных проводящих поверхностных элементов для вертикальных молниеотводов заключается в том, что возможные внутренние проводящие элементы (углеродный композиционный 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 вспышек. Однако необходимо учитывать также риск прямого попадания молнии в ребро таких тонкостенных элементов и возможность неравномерного распределения тока из-за поверхностных эффектов.

С.3 Элементы конструкции из углеродного композиционного материала

Углеродные композиционные материалы были использованы 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 композиционный материал

для элементов конструкции и дальше, так как размер лопастей увеличивается. Поэтому основной вопрос заключается в том, как углеродный композиционный материал реагирует на воздействие током молнии, попадающим и протекающим внутри материала. В данном случае два электрических свойства углеродного композиционного 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 композиционного материала обычно установлено значение, которое в 1000 раз ниже значения для алюминия, т. е. 3,5 на 104 см/м. Это является приблизительным значением, установленным для двуосных пластин из тканного углеродного композиционного материала, используемых для поверхностей небольших летательных аппаратов, и измеренным параллельно с поверхностью образца [35] и [38].

В зависимости от реальной конструкции и технологии прошивки электропроводность углеродного композиционного материала имеет очень высокую степень анизотропии. Например, есть данные по электропроводности образцов из углеродного композиционного материала, используемых для испытаний на удары молнии в авиационной промышленности. Электропроводность таких образцов меняется в пределах четырех порядков величин для разных направлений тока [39]. Поэтому резистивный нагрев углеродного композиционного 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 (приблизительно 200 °С). Когда матрица испаряется, давление от выделяющихся газов может вызвать разрушение и расслаивание углеродного композиционного материала. Углеродный композиционный материал даже может сгореть, особенно в точке попадания молнии [35].

Если углеродный композиционный материал используется в летательных аппаратах, считается обязательным использовать молниезащиту для элементов из углеродного композиционного материала, которые могут быть поражены молнией или могут проводить ток молнии. Были случаи повреждения молнией концевых валов из углеродного композиционного материала для лопастей ВЭУ. Некоторые лабораторные эксперименты выявили проблемы, касающиеся валов из углеродного композиционного материала, проводящих ток молнии [40]. Лабораторные испытания лопастей с покрытием из углеродного композиционного материала показали расслоение и сжигание поверхности в точке попадания молнии [20] и [30]. Поэтому требуется защита поверхностей из углеродного композиционного материала от прямых ударов молнии как с помощью нанесения достаточного слоя изоляционного материала, так и с помощью экранирования внешних устройств отведения молнии. Так как проводящий углеродный композиционный материал чаще всего является параллельным путем прохождения тока молнии относительно вертикального молниеотвода, необходимо металлизировать углеродный композиционный материал с другими токопроводящими элементами. Для каждой конкретной конструкции лопасти во избежание критичного напряжения между углеродным композиционным материалом и вертикальным молниеотводом необходимо определить, достаточно ли мало пространство между эквипотенциальной металлизацией. Критичным напряжением в данном контексте является напряжение, которое может потенциально пробить изоляционный слой между углеродным композиционным материалом и вертикальным молниеотводом, воздействуя на механическую прочность конструкции.

После распределения тока молнии по площади с широким поперечным сечением из углеродного композиционного материала, такие конструкции могут проводить ток молнии без повреждений.

С.4 Конкретные вопросы, касающиеся токопроводящих элементов

К токопроводящим элементам, рассмотренным в настоящем разделе, относятся все другие токопроводящие части лопасти, за исключением приемников и системы вертикальных молниеотводов, рассмотренных в С.2, и возможного углеродного композиционного материала, рассмотренного в С.3.

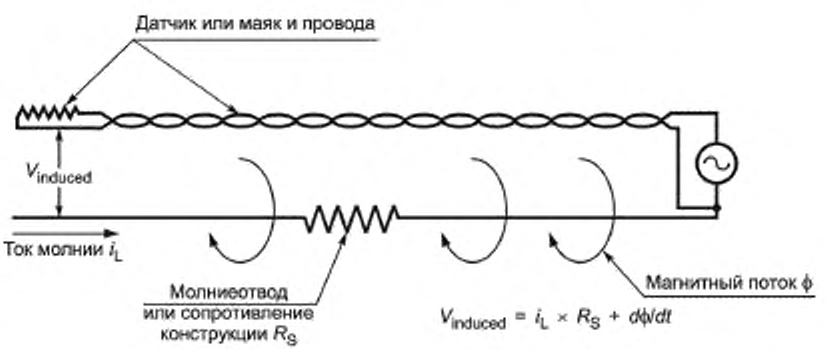


Рисунок С.3 — Индуктированные молнией напряжения между молниеотводом или конструкцией и проводами датчика

Провода для датчиков, помещенные на поверхности или внутри лопасти, могут подвергаться воздействию сильных магнитных полей, которые вырабатывают разрушительное напряжение между молниеотводом и другими проводами в лопасти, как показано на рисунке С.3. Такие провода следует убрать, если возможно. Если нет, то и датчики, и провода должны быть защищены соответствующей эквипотенциальной металлизацией с системой вертикальных молниеотводов и экранированы или закрыты внешними приемниками молнии. Открытые внешние приемники молнии прямо на наружной стороне внутренних токопроводящих элементов позволяют защищать внутренние конструкции от прямого попадания молнии. Более того, риск получения частичных разрядов от внутренних проводов уменьшается, если тщательно закрыть токопроводящие провода электроизоляционными материалами. Обратите внимание, что высокий ток и 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 системы молниезащиты, 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 токопроводящие части в лопасти должны быть спроектированы таким образом, чтобы уменьшать усиление электрического поля и должны быть соединены эквипотенциальной металлизацией так, чтобы уменьшить риск появления внутренних разрядов. Что касается электропроводки, важно, чтобы внешние устройства воздушного перехвата вспышек молнии защищали внутренние токопроводящие элементы от электрического поля, т.е. от прямого попадания молнии.

Если другие токопроводящие элементы расположены в лопасти, такие как навигационный маяк в концевой части лопасти, датчики молнии, аппаратура контроля текущего состояния и т. п., они всегда должны быть экранированы внешними приемниками молнии, уменьшая, таким образом, риск прямого попадания молнии в конструкцию. Как было рассмотрено выше, риск появления внутренних разрядов, возможно приводящих к пробою покрытия лопасти, можно снизить путем тщательной защиты всех внутренних токопроводящих частей при помощи электроизоляционного материала.

С.5 Эффективность перехвата

Эффективность перехвата зависит от методов молниезащиты с использованием отдельных воздушных систем перехвата вспышек молнии, расположенных на поверхности лопасти. Любые устройства воздушного перехвата вспышек молнии и удлинители устройств воздушного перехвата вспышек молнии (сплошные проводники и сегментные молниеотводы на поверхности) необходимо разместить так, чтобы снизить вероятность пробоя непроводящей поверхности до допустимого уровня.

Расположение устройств воздушного перехвата вспышек 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 композиционных 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.

Для лопастей длиной до 20 м приемники на концевой части должны быть проверены. Анализ распределения точек попадания молнии для лопастей из стекловолокна длиной 39 м показал, что большинство ударов молнии касается концевой части лопасти (88 %). Другие удары молнии, как правило, попадают в участок лопасти, расположенный в 5 м от концевой части.

Испытания высоким напряжением на удары молнии на образцах для испытаний, представляющих конструкцию, эффективны для выявления недостаточной защиты приемника. Однако требуются дальнейшие исследования в особенности влияния влажных, загрязненных и изношенных лопастей.

В настоящее время разрабатываются методы численного расчета, используемые для определения возможных зон попадания молнии на лопастях и гондоле, и расчеты годового количества прямых попаданий вспышек молнии в конкретные конструкции [41] и [42]. После того, как будет полностью изучен потенциал и использование данных моделей, они могут быть использованы для оценки поверхностей, куда, вероятно, может ударить молния, если эти поверхности токопроводящие или имеют приемники. 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.

С.6 Определение размеров систем молниезащиты

Материалы, используемые для молниезащиты лопастей ВЭУ, должны выдерживать совместные воздействия электрических, тепловых и электродинамических нагрузок, создаваемых током молнии. Номинальные размеры для материалов, используемых для устройств воздушного перехвата вспышек молнии и вертикальных молниеотводов, представлены в таблице С.1.

Таблица С.1 — Материал, конфигурация и минимальная площадь поперечного сечения проводников для воздушного перехвата ударов молнии, стержней устройств воздушного перехвата ударов молнии и вертикальных молниеотводов

Материал	Конфигурация	Номинальная площадь поперечного сечения, мм^2	Примечания [i], [j]
Медь	Сплошной плоский	50[h]	Толщина 2 мм
	Сплошной с круглым сечением[g]	50[h]	Диаметр 8 мм
	Многожильный	50[h]	Диаметр каждой жилы 1,7 мм
	Сплошной с круглым сечением[c], [d]	200	Диаметр 15 мм
Медь с алюминиевым покрытием[a]	Сплошной плоский	50[h]	Толщина 2 мм
	Сплошной с круглым сечением[g]	50[h]	Диаметр 8 мм
	Многожильный	50[h]	Диаметр каждой жилы 1,7 мм
Алюминий	Сплошной плоский	70	Толщина 3 мм
	Сплошной с круглым сечением	50[h]	Диаметр 8 мм
	Многожильный	50[h]	Диаметр каждой жилы 1,7 мм
Алюминиевый сплав	Сплошной плоский	50[h]	Толщина 2,5 мм
	Сплошной с круглым сечением	50	Диаметр 8 мм
	Многожильный	50[h]	Диаметр каждой жилы 1,7 мм
	Сплошной с круглым сечением[c]	200	Диаметр 15 мм
	Сплошной с круглым сечением, с медным покрытием	50	Медное покрытие радиальной толщиной минимум 250 мкм с содержанием меди 99,9 %
Оцинкованная горячим способом сталь[b]	Сплошной плоский	50[h]	Толщина 2,5 мм
	Сплошной с круглым сечением	50	Диаметр 8 мм
	Многожильный	50[h]	Диаметр каждой жилы 1,7 мм
	Сплошной с круглым сечением[c], [d]	200	Диаметр 15 мм
Нержавеющая сталь[e]	Сплошной плоский [f]	50[h]	Толщина 2 мм
	Сплошной с круглым сечением [f]	50	Диаметр 8 мм
	Многожильный	70[h]	Диаметр каждой жилы 1,7 мм
	Сплошной с круглым сечением[c], [d]	200	Диаметр 15 мм
Сталь	Сплошной с круглым сечением, с медным покрытием	50	Медное покрытие радиальной толщиной минимум 250 мкм с содержанием меди 99,9 %

[a] С минимальной толщиной горячего или гальванического покрытия 1 мкм.

[b] Покрытие должно быть гладким, непрерывным и без подтеков, с минимальным весом 350 г/м^2 для сплошных проводников с круглым сечением и 500 г/м^2 для сплошных плоских проводников.

Окончание таблицы С.1

[c] Применяется только для стержней устройств воздушного перехвата вспышек молнии. Там, где механическое воздействие, такое как ветровая нагрузка, не является критическим, можно использовать стержни устройств воздушного перехвата вспышек молнии диаметром 10 мм, максимальной длиной 1 м и с дополнительным с креплением.

[d] Применяется только для заземляющих вводных стержней.

[e] Хром > 16 %, никель > 8 %, углерод < 0,07 %.

[f] Для проводников из нержавеющей стали, помещенных в бетонный фундамент и/или находящихся в непосредственном контакте с воспламеняющимся материалом, минимальные размеры необходимо увеличить до 78 мм^2 (диаметр 10 мм) для сплошных проводников с круглым сечением и до 75 мм^2 (минимальная толщина 3 мм) для сплошных плоских проводников.

[g] Для отдельных проводников, где механическая прочность не является важным требованием, номинальная площадь 50 мм^2 (диаметр 8 мм) может быть уменьшена до 28 мм^2 (диаметр 6 мм). В этом случае необходимо уделить внимание сокращению расстояния между крепежными элементами.

[h] Для отдельных проводников, где тепловой и механический факторы являются важными, номинальная площадь может быть увеличена до 60 мм^2 для сплошных плоских проводников и до 78 мм^2 для сплошных проводников с круглым сечением.

[i] Минимальное поперечное сечение во избежание плавления — 16 мм^2 (медь), 25 мм^2 (алюминий), 50 мм^2 (сталь) и 50 мм^2 (нержавеющая сталь) для удельной энергии 10 000 кДж/Ом. Для получения дополнительной информации см. стандарт [1].

[j] Допускаемые отклонения для площади поперечного сечения — 3 %.

Площади поперечного сечения, описанные выше, приводятся 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 для проводов диаметром до 10 мм (площадь поперечного сечения 78 мм^2).

Повышение температуры проводников, проводящих ток молнии, можно рассчитать, как показано в уравнении (С.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

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} \cdot \left\{ \exp\left[\frac{W/R \cdot \alpha \cdot \rho_0}{q^2 \cdot \gamma \cdot c_W} \right] - 1 \right\}, \qquad (C.1)$$

где $\theta - \theta_0$ — повышение температуры проводников, K;

α — температурный коэффициент сопротивления, 1/K;

W/R — удельная энергия импульса тока, J/Ω;

ρ_0 — удельное омическое сопротивление проводника при температуре окружающей среды, Ωм;

q — площадь поперечного сечения проводника, м^2;

γ — плотность материала, кг/м^3;

c_W — теплоемкость, Дж/кгK.

В таблице С.2 представлены исходные данные к уравнению для стандартных материалов, и в таблице С.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.

Таблица С.2 — Физические характеристики стандартных материалов, используемых в системах молниезащиты

Величина	Материал			
	Алюминий	Мягкая сталь	Медь	Нержавеющая сталь*
ρ_0, Ом	$29 \cdot 10^{-9}$	$120 \cdot 10^{-9}$	$17{,}8 \cdot 10^{-9}$	$0{,}7 \cdot 10^{-6}$
α, 1/K	$4{,}0 \cdot 10^{-3}$	$6{,}5 \cdot 10^{-3}$	$3{,}92 \cdot 10^{-3}$	$0{,}8 \cdot 10^{-3}$
γ, кг/м^3	2700	7700	8920	$8{,}0 \cdot 10^3$
θ_s, °C	658	1530	1080	1500
C_s, Дж/кг	$397 \cdot 10^3$	$272 \cdot 10^3$	$209 \cdot 10^3$	—
C_w, Дж/кг K	908	469	385	500
Примечание — В настоящей таблице применены следующие обозначения: θ_s — температура плавления, °C; C_s — скрытая теплота плавления, Дж/кг.				
* Аустенитная немагнитная.				

Таблица С.3 — Повышение температуры (K) для нестандартных молниеотводов в виде функции *W/R*

Поперечное сечение, мм^2	Материал											
	Алюминий			Мягкая сталь			Медь			Нержавеющая сталь*		
	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	564	—	—	—	—	—	169	542	—	—	—	—
16	146	454	—	1120	—	—	56	143	309	—	—	—
25	52	132	283	211	913	—	22	51	98	940	—	—
50	12	28	52	37	96	211	5	12	22	190	460	940
100	3	7	12	9	20	37	1	3	5	45	100	190
* Аустенитная немагнитная.												

Что касается воздействия на устройства воздушного перехвата вспышек молнии, стандарт предлагает использование модели падения напряжения на аноде или катоде. Модель подразумевает, что вся нагнетаемая энергия в ножках дуги используется для испарения материала основы, тем самым пренебрегая рассеиванием тепла внутри металла. Объем расплавленного металла согласно данному консервативному подходу можно найти с помощью формулы (С.2):

$$V = \frac{u_{a,c} \cdot Q}{\gamma} \cdot \frac{1}{c_w(\theta_S - \theta_U) + c_s}, \qquad (C.2)$$

где V — объем расплавленного металла, м^3;

$u_{a,c}$ — падение напряжения на аноде или катоде (подразумевается как постоянная величина), В;

Q — заряд тока молнии, Кл;

γ — плотность материала, кг/м^3;

c_w — тепловмкость, Дж/(кг·K);

θ_S — температура плавления, °С;

θ_U — температура окружающей среды, °С;

c_s — скрытая теплота плавления, Дж/кг.

Используя типичное падение напряжения на аноде или катоде $u_{a,c}$ в несколько десятков вольт, модель приводит к преувеличению объема расплавленного металла.

С.7 Соединение лопасть — ступица

В комеле лопасти система вертикальных молниеотводов обычно подсоединяется либо к крепежному фланцу лопасти, либо к ступице.

Если лопасть имеет регулируемый угол поворота (тип Г), ток молнии может либо пройти бесконтрольно через подшипник для поворота лопасти, или же какое-нибудь соединение должно проходить через подшипник, такое как скользящий контакт 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 В) 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 металлизированную перемычку с достаточным провисанием для обеспечения движения, или же используется скользящий искровой зазор или щетка для увода тока молнии от гидравлического цилиндра. Другой подход исполнения скользящего воздушного зазора рассмотрен в [40].

Необходимо уделить внимание уменьшению провисания в таких металлизированных перемычках, так как индуктивное падение напряжения через провисающую часть может быть очень сильным, вызывая тем самым недостаточную защиту цилиндра [40].

Приложение D
(справочное)

Технические требования к испытаниям

D.1 Общие положения

В настоящем приложении рассмотрены возможные методы испытаний для разработки новых конструкций лопасти или проверки существующих конструкций относительно их способности справляться с воздействием разряда молнии. Методы испытаний, приведенные для лопастей, могут быть применимы и к другим объектам ВЭУ, таких как обтекатель ступицы, ступица, гондола или другие их детали.

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 взаимодействие системы молниезащиты, вертикального молниеотвода, соединительных элементов вертикального молниеотвода, других элементов системы молниезащиты и конструкции образца лопасти. Технические требования к испытаниям разделены на два подраздела:

- испытания высоким напряжением на удары молнии проводятся для определения конкретных точек попадания молнии и каналов пробоя через непроводящие материалы, таким как лопасти и гондолы ВЭУ. 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(-ей), которые могут быть выбраны разрядами молнии. Повреждение в результате данных испытаний несравнимо с возможным повреждением от токов молнии;
- испытания высоким напряжением на физическое повреждение проводятся 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.

Критерии приемки и браковки для каждого испытания должны быть определены и установлены изготовителем.

D.2 Испытания высоким напряжением на удары молнии

Данные испытания проводятся для определения точек попадания молнии и каналов электрического пробоя через непроводящий материал.

D.2.1 Испытание на попадание молнии с использованием начального лидера

D.2.1.1 Цель испытания

Данное испытание предназначено для лопастей ВЭУ, но может применяться для гондол, изготовленных из стекловолокна или других непроводящих материалов. Это испытание можно использовать для определения:

- местонахождения возможных точек приложения лидера и искрения или каналов пробоев на лопастях и других непроводящих конструкциях;
- оптимального расположения устройств защиты (воздушной системы перехвата вспышек молнии, приемников);
- каналов искрения или пробоев по или через диэлектрические поверхности;
- технических характеристик устройств защиты.

D.2.1.2 Образец для испытаний

Образец для испытаний должен представлять лопасть в натуральную величину или часть лопасти. Часть лопасти, которую необходимо протестировать, зависит от деталей конструкции лопасти и от конструкции молниезащиты. Ниже представлены некоторые указания по выбору образцов лопасти. Основные принципы заключаются в том, чтобы подвергнуть все части лопасти и конструкции ее защиты воздействию электрических полей, предшествующих касанию лидера молнии.

Если лопасть состоит из композиционного материала одинаковой толщины, по наибольшей длине лопасти можно протестировать внешнюю часть лопасти.

Если в молниезащите лопасти используются только один или два разобщенных устройства воздушного перехвата вспышек молнии, расположенных в концевой части, то можно испытать внешнюю часть лопасти, но если молниеотвод находится внутри лопасти, испытываемая часть должна иметь достаточную длину для того, чтобы проверить, не возникнут ли пробои от концевой части через покрытие к системе вертикальных молниеотводов.

Если в молниезащите лопасти используется воздушная система перехвата вспышек молнии, состоящая из множества отдельных пар (т. е. терминалов на противоположных поверхностях лопасти) устройств воздушного перехвата вспышек молнии, расположенных на расстоянии x метров друг от друга, и целью является определение максимального расстояния x, то в образец для испытания должны входить, по меньшей мере, две пары устройств

воздушного перехвата вспышек молнии и минимум половина расстояния до следующего встроенного устройства воздушного перехвата вспышек молнии. Для получения результатов, подобных результатам при эксплуатации, длины образцов для испытаний должны составлять от 6 до 20 м.

Если в молниезащите лопасти используются другие конструкции устройств воздушного перехвата вспышек молнии и вертикальных молниеотводов, размер образца для испытания должен охватывать все детали, которые необходимо испытать. Для молниеотводов, установленных снаружи, концы образцов для испытаний должны быть закруглены с помощью проводящих тороидов во избежание случайного усиления поля в этих выступающих частях.

Если целью испытания является изучение и разработка детального варианта конструкции, в которую входит небольшая часть лопасти (т. е. концевая или средняя часть лопасти), то можно испытать более мелкие образцы, включающие варианты конструкции. Однако необходимо отметить, что электрическое поле между малым образцом для испытания и противоположным электродом отличается от электрического поля при представлении целой лопасти. Из-за этих отличий тороиды для определения напряженности поля или слегка закругленные противоположные электроды могут быть необходимы для предотвращения нереальных искрений от встроенного конца таких образцов для испытаний в зависимости от реальной геометрии.

Длины образцов для испытаний, в целях оптимизации конструкций концевой части лопасти, которые привели к получению результатов, подобных результатам при эксплуатации, находятся в диапазоне от 3 до 6 м.

Для получения реальных результатов испытания должны быть учтены любые покрытия и покраска поверхности.

Токопроводящие элементы, такие как маяки, датчики и молниеотвод (-ы), обычно установленные в образце для испытания (отдельная лопасть, концевая часть лопасти или средняя часть лопасти), должны быть представлены внутри образца для испытаний.

Эти детали необходимо установить в тех же точках внутри образца для испытаний, что и в конструкции лопасти или гондолы. Если токопроводящие образцы можно разместить в нескольких положениях, то для испытаний следует взять наиболее неблагоприятные. 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.

D.2.1.3 Схемы испытательной установки

Существует три схемы испытательной установки, обозначаемые как схема испытательной установки А, схема испытательной установки Б и схема испытательной установки В, которые могут быть использованы. Схемы испытательной установки А и Б являются наиболее подходящими для испытаний на цельных лопастях, используемых для разработки и проверки конструкции. Схема испытательной установки В наиболее подходит для доводочных испытаний для оценки конструкции панели наружной обшивки и возможных конфигураций лент молниеуловителя.

Каждая схема испытательной установки подразумевает 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. Схемы испытательных установок А, Б и В с указанием высоковольтного генератора, испытательного образца и внешнего электрода представлены на рисунках D.1, D.3 — D.5.

Схема испытательной установки 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.

Схема испытательной установки Б предназначена для создания такого же электрического поля вокруг образца для испытания, 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.

Схема испытательной установки В наиболее подходит для доводочных испытаний по оценке или сравнению диэлектрических прочностей подходящих материалов покрытия и/или конструкций локальной защиты. Однако испытания панелей не должны применяться для проверки полных защитных конструкций, так как образцы панели не отражают все важные характеристики непроводящих проверяемых конструкций.

D.2.1.3.1 Схема испытательной установки А

Общая схема испытательной установки А представлена на рисунке D.1.

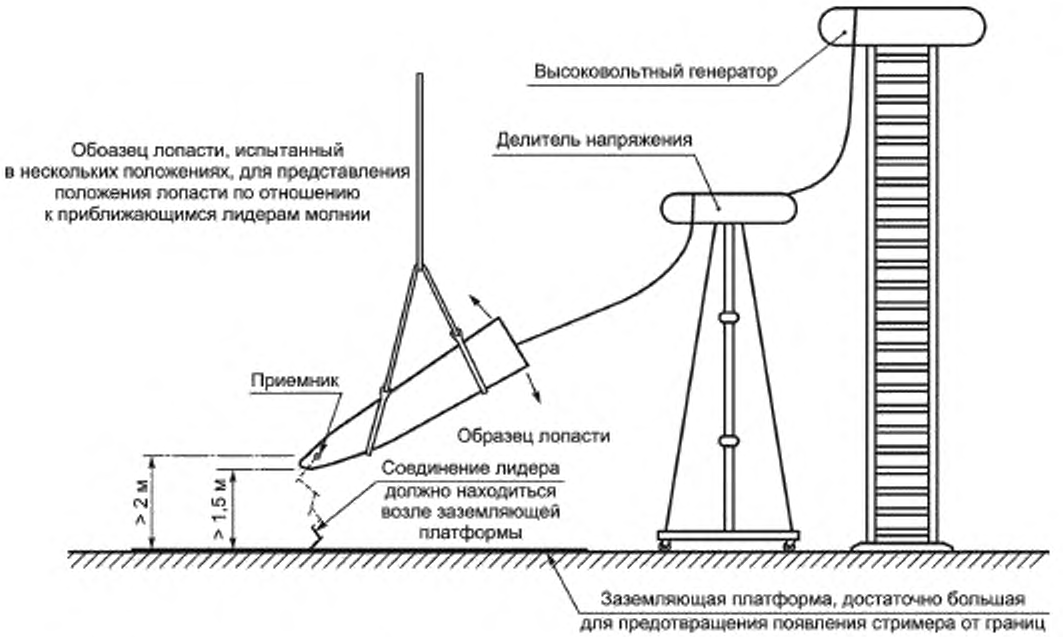


Рисунок D.1 — Схема установки А для испытаний на приложение начального лидера (образец необходимо испытать в нескольких положениях, отображая различные направления приближающегося лидера)

Образец для испытания с системой молниезащиты, соединенной с выходом генератора Маркса, возвышается над внешним электродом, заземляющей платформой большой площадью. Заземляющая платформа должна быть достаточного размера для предотвращения краевых эффектов, т. е. предотвращения дуговых разрядов, прекращающихся на краю заземляющей платформы. Образец обычно испытывают в нескольких положениях для отображения направлений электрического поля, которые могут воздействовать на эту часть образца для испытания при нахождении на ВЭУ.

Примеры таких направлений представлены на рисунке D.2. Здесь использованы три разных угла лопасти относительно заземляющей платформы (90°, 60° и 30° с горизонталью) и четыре разных угла наклона. При наложении трех разрядов каждой полярности и в каждом направлении лопасть будет подвергаться 54 воздействиям.

Длинные лопасти обычно испытываются на образце под углом 5° и 10° к горизонтали, предоставляя наибольшую вероятность приближения лидеров молнии в разрядном промежутке участка достижимости положения внутри концевой части лопасти в то время, когда лопасть оказывается в горизонтальном положении.

Практические ограничения возможностей использования вертикального пространства и мостового крана могут привести к необходимости проведения испытаний в положениях 60° и 90° на более коротких образцах длиной от 2 до 4 м.

Для эффективного испытания, когда используется схема испытательной установки А, применяются два условия:

а) соединение стримеров должно происходить в нижней части воздушного зазора между приведенной в действие лопастью и заземляющей платформой, т. е. на расстоянии более половины пробивного промежутка от образца лопасти. Это можно подтвердить фотографиями дуговых разрядов. На рисунке D.3 представлена точка контакта лидеров. Обычно соответствие требованию достигается путем соблюдения следующих расстояний:

1) заземляющая платформа должна находится как минимум в 2 м от ближайшего проводящего элемента (внутри или снаружи образца для испытаний);

2) заземляющая платформа должна находится как минимум в 1,5 м от поверхности ближайшего образца для испытаний, но доминирующим является условие (а);

б) стример, исходящий от заземляющей платформы, не должен образовываться от ее края. В случае, если стример исходит от края заземляющей платформы, площадь заземляющей платформы необходимо увеличить.

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



А: наветренная сторона лопасти обращена к заземляющему электроду	Б: задняя кромка лопасти обращена к заземляющему электроду	В: подветренная сторона лопасти обращена к заземляющему электроду	Г: передняя кромка лопасти обращена к заземляющему электроду



Рисунок D.2 — Возможные положения лопасти для испытаний на приложение начального лидера по схеме А

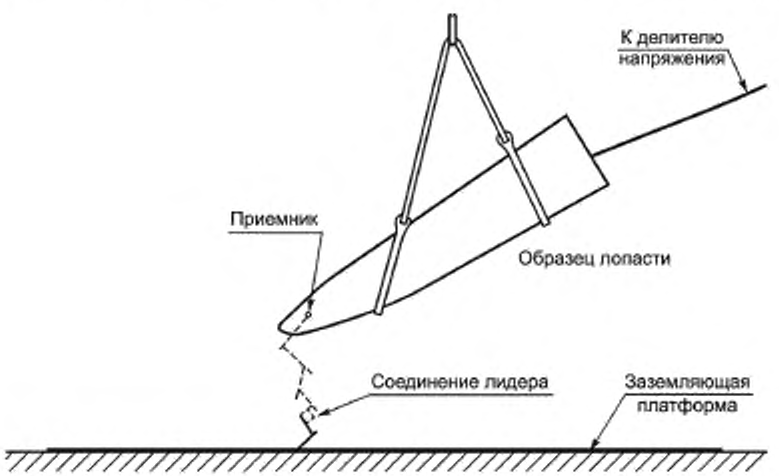


Рисунок D.3 — Точка контакта лидеров должна быть удалена от образца для испытания

D.2.1.3.2 Схема испытательной установки Б

Общая схема испытательной установки Б представлена на рисунке D.4.

Образец необходимо испытать в нескольких положениях, отображая различные направления приближающегося лидера.

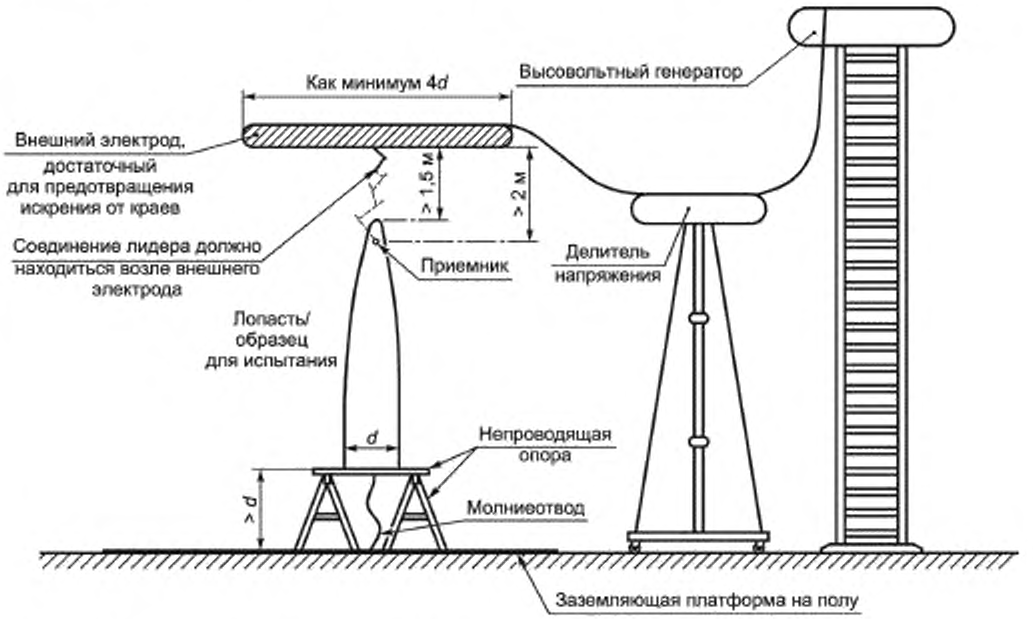


Рисунок D.4 — Схема установки Б для испытаний на приложение начального лидера

Схема испытательной установки Б подходит для образцов для испытания, 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 образца для испытания. Минимальное расстояние до внешних конструкций в международном стандарте [4] составляет 1,5 минимальных пробивных промежутка между двумя противоположными электродами. Чтобы минимизировать искажение электрического поля в зазоре, заземляющая платформа и другие проводящие конструкции должны находиться на расстоянии, составляющим 1,5 длины зазора, т. е. три метра при длине зазора в два метра (рисунок D.4).

Образец для испытания находится над заземляющей платформой на опорах на расстоянии в 1,5 раза больше расстояния между устройством воздушного перехвата вспышек молнии 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.

Для эффективного испытания, когда используется схема испытательной установки Б применяются три условия:

а) соединение стримеров должно происходить 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 D.4 представлена точка контакта лидеров. Обычно соответствие требованию достигается путем соблюдения следующих расстояний:

1) внешний электрод должен находится как минимум в двух метрах от ближайшего проводящего элемента (внутри или снаружи образца для испытаний);

2) внешний электрод должен находится как минимум в 1,5 м от поверхности образца для испытаний, но доминирующим является условие (а);

б) стример, исходящий от внешнего электрода, не должен образовываться от края этого электрода;

в) концевой зажим устройства защиты или других проводящих элементов в образце должен быть подвешен над заземляющей платформой на расстоянии, более чем в 1,5 раза, превышающим расстояние между устройством воздушного перехвата вспышек молнии на образце для испытания и внешним электродом.

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

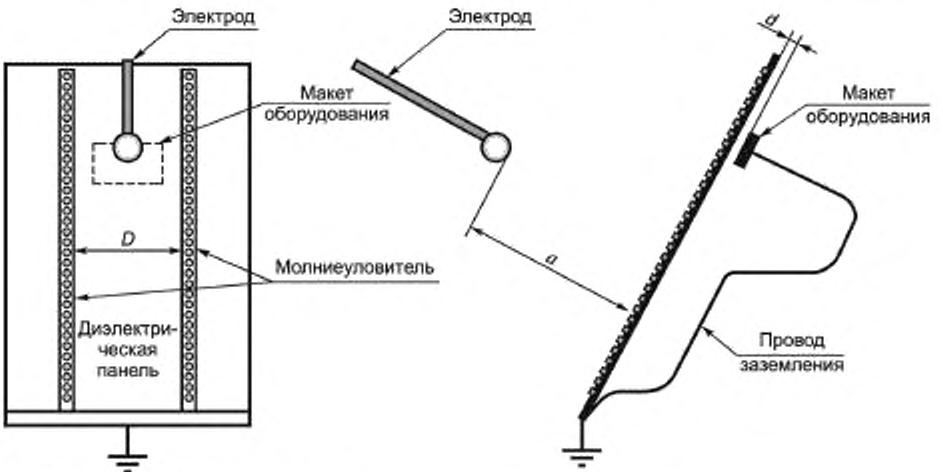
D.2.1.3.3 Схема испытательной установки В

Общая схема испытательной установки В представлена на рисунке D.5.

Схема В позволяет оценить потенциальные защитные устройства и места расположения устройств на образце с непроводящей поверхностью до утверждения защитной конструкции и размещения таких устройств на более крупном и полном образце для испытания.

Характерная панель наружной обшивки будет представлять квадрат площадью 1—2 м^2, хотя допускаются другие размеры и формы, подходящие для размещения полномасштабных защитных устройств. Необходимо применять производственные материалы, покрытия поверхности и лакокрасочные изделия. Обычно данное испытание проводится для определения расстояния (D) между лентами молниеуловителя, которые необходимо установить на поверхности лопасти или гондолы.

Макет любых проводящих элементов, находящихся за защитной поверхностью, необходимо установить в соответствующем положении за защитной поверхностью на расстоянии (d). Защитные устройства находятся, как правило, в потенциале земли испытательной установки, а электрод — под высоким напряжением. Для того, чтобы воспроизвести реальный режим испытаний, электрод необходимо разместить посередине между лентами молниеуловителя согласно примеру на рисунке D.5, чтобы предотвратить попадание молнии по краю образца или получение неправдоподобного результата. Электрод необходимо поднять над поверхностью панели на расстояние, равное по длине стороне панели, если панель представляет собой квадрат, или равное по длине меньшей стороне панели, если панель представляет собой прямоугольник. Ленты молниеуловителя можно переустановить на большее или меньшее расстояние для оптимизации конструкции и предотвращения пробоя.



Расстояние *D* определяется в виде функции близости *d* к внутреннему токоотводу

Рисунок D.5 — Схема расположения локального защитного устройства (например, молниеуловителя) — Схема В для оценочных испытаний

Схема на рисунке D.5 не является эквивалентной схемам испытательных установок А и Б для проверочных испытаний, однако адекватность расстояния между молниеуловителями, установленное в ходе доводочных испытаний, как показано на рисунке D.5, была успешно подтверждена в последующих проверочных испытаниях локальных защитных мер, таких как удлинение молниеуловителя воздушных систем перехвата вспышек молнии на поверхности лопасти, используя такое же расстояние между молниеуловителями. Необходимо провести проверочное испытание, используя схемы испытательной установки А или Б.

D.2.1.4 Форма кривой испытательного напряжения

Используемая форма кривой напряжения представляет двойное экспоненциальное импульсное напряжение коммутационного типа с временем достижения максимального значения 250 μс (± 20) % и временем спада до средней величины 2500 μс (± 60) %. Эта форма кривой напряжения является наиболее характерной для электрического поля около конструкции при приложении начального лидера. Для испытания на приложение начального лидера напряжение будет использоваться по нарастающей до напряжения поверхностного пробоя,

возникающего до образования гребня кривой напряжения. Время между возникновением формы кривой напряжения и поверхностным пробоем конструкции должно составлять не менее 50 μс.

Таких форм кривой можно достичь, используя импульсное напряжение коммутационного типа. Поскольку напряжение применяется по нарастающей до напряжения поверхностного пробоя, время спада не представляет особого интереса. Характерная форма кривой испытательного напряжения представлена на рисунке D.6.

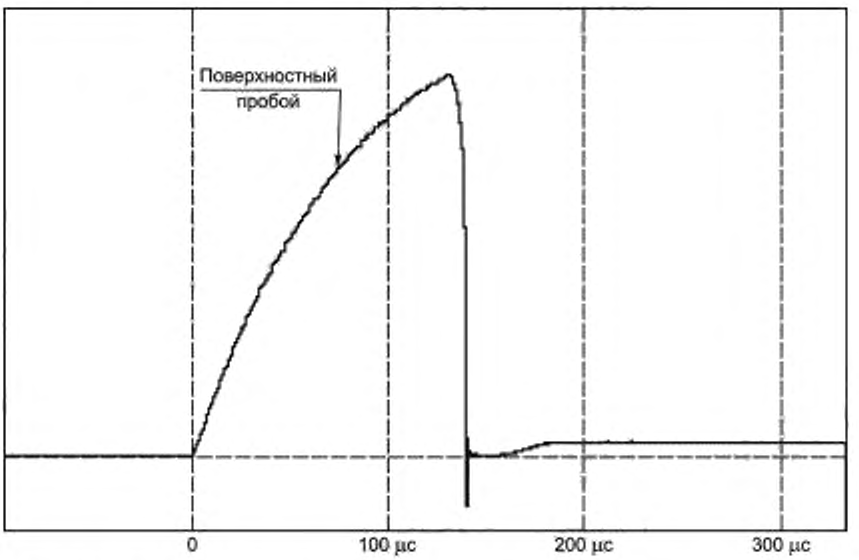


Рисунок D.6 — Характерное повышение коммутационного импульсного напряжения до напряжения поверхностного пробоя (цена деления — 100 μс)

Должно использоваться, как минимум, три разряда каждой полярности и каждого положения образца для испытания относительно противоположного электрода [43] и [41]. Испытание с несколькими положениями образца относительно противоположного электрода гарантирует значительную вероятность отказа в случае неправильной конструкции лопасти.

Если во время испытания возникают пробои поверхности лопасти, повреждение можно сгладить и исправить с помощью соответствующей полимерной смолы. Однако опыт показывает, что образцы, которые подверглись большому количеству воздействий, будут со временем изнашиваться под влиянием электричества; ситуация касается не только устраненных пробоев, но и основного слоистого материала. Таким образом, изготовитель должен знать, что количество разрядов для каждого образца для испытаний не должно превышать примерно 100 разрядов во избежание повреждения в результате износа под воздействием электричества. Процедуры испытаний, указанные в D.2.1.6, определены для уменьшения влияния износа под воздействием электричества на протяжении испытания.

Вопрос износа слоистого материала лопасти под воздействием электричества в результате удара молнии до конца не изучен. Следует надеяться, что разделы, касающиеся данных вопросов, будут откорректированы в последующих изданиях.

Ток разряда высоковольтного генератора обычно составляет менее 2000 А, что охватывает большинство токов лидера. Физические воздействия этого тока не будут, однако, отображать воздействия гораздо более сильного тока удара молнии или непрерывные токи, которые могут идти по тому же пути, что и лидер.

D.2.1.5 Измерения и запись данных

Необходимо сделать следующие измерения и записи данных:

- фотографии и описание каждой испытательной установки;
- графики формы кривой испытательного напряжения;
- фотозаписи всех испытаний. Данные записи должны полностью охватить испытываемые области 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;
- фотографию каждого положения электрода;
- фотографии мест нахождения пробоев или других значительных воздействий;

- запись данных по лабораторным условиям (например, температура, давление и влажность), дат проведения испытаний, данных по персоналу, выполняющему и наблюдающему за испытаниями, а также данных о месте проведения испытания;

- запись любых отклонений от процедуры испытания;

- запись результатов каждого испытания с указанием полярности электрода, амплитуды напряжения и форм кривой.

D.2.1.6 Процедура испытания

Данная процедура испытания применима ко всем схемам испытательной установки (А, Б и В). Для ее проведения необходимо:

а) измерить лабораторные условия окружающей среды;

б) изучить и соблюдать правила техники безопасности. Далее представлены некоторые интересующие вопросы. Площадки для испытания должны быть безопасны и освобождены от персонала до включения испытательного оборудования. После испытаний и до появления персонала на площадке для испытания батареи конденсаторов необходимо замкнуть накоротко. Должна быть соответствующая защита ушей и глаз.

в) откалибровать высоковольтный генератор и аппаратуру, как указано ниже:

1) внимательно осмотреть образец для испытания на наличие любых повреждений, которые впоследствии можно будет перепутать с последствиями испытания, и пометить их, чтобы не спутать с последующими результатами испытаний;

2) закрыть поверхности, которые направлены в сторону противоположного электрода (т. е. к заземляющей платформе) токопроводящей фольгой и соединить ее с вертикальным молниеотводом;

3) выбрать начальную полярность и начать испытание с фольгой при измерении приложенного напряжения. Желательно, чтобы начальная полярность образца для испытания была положительной (+) независимо от того, какая схема испытательной установки используется: А или Б. Опыт показал, что это условие приводит к низкой вероятности пробоя непроводящих материалов, поскольку стримеры, образующиеся от защитных устройств образца для испытания продвигаются дальше в воздушный зазор до момента соединения с противоположными стримерами от отрицательного электрода;

4) если форма кривой не верна 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;

5) повторить этапы, указанные в перечислениях 3) и 4), если это необходимо для получения необходимых условий;

6) убрать фольгу с образца для испытания;

г) очистить образец для испытания используя соответствующие методы для удаления влаги, пыли, мусора и других загрязнений, которые могут повлиять на результаты испытания;

д) приложить разряд к образцу для испытания, при измерении приложенного напряжения и фотографировании прохождения дугового разряда. Убедиться, что дуговой разряд все еще возникает на фронте восходящей волны до момента образования гребня кривой напряжения;

е) осмотреть образец для испытания и задокументировать результаты;

ж) если появился пробой, провести анализ с целью определения, прошел ли образец испытание. Если образец не прошел испытание, то необходимо прекратить последующие испытания или устранить повреждение, или доработать систему молниезащиты перед тем, как продолжить испытания;

з) повторить этапы, указанные в перечислениях д) — з) до тех пор, пока три разряда положительной полярности не будут приложены в тех же условиях;

и) попереключать полярность высоковольтного генератора и убедиться, что полярность образца для испытаний является отрицательной относительно заземляющей платформы (схема испытательной установки А) или внешнего электрода (схема испытательной установки Б);

к) откалибровать высоковольтный генератор и аппаратуру следующим образом:

1) закрыть образец для испытаний токопроводящей фольгой;

2) начать испытание с фольгой при измерении приложенного напряжения;

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

4) повторить этапы, указанные в перечислениях 2) и 3), если это необходимо для получения необходимых условий;

5) убрать фольгу с образца для испытания;

л) повторять этапы, указанные в перечислениях д) — и), до тех пор, пока три разряда отрицательной полярности не будут приложены в тех же условиях;

м) переместить образец для испытания (схема испытательной установки А) или внешний электрод (схема испытательной установки Б) в соответствии с процедурой испытания;

н) повторить этапы, указанные в перечислениях в) — н) в соответствии с процедурой испытания.

Испытания на приложение начального лидера можно проводить на загрязненных и влажных образцах лопастей.

Поскольку дуговые разряды возникают быстрее на смоченных или загрязненных поверхностях и, следовательно, образование пробоев менее вероятно, то нет необходимости наносить загрязнение на внешние поверхности. Однако смоченные или загрязненные внутренние поверхности могут быстрее проводить стримеры к соединениям кромок лопасти, где, как известно, образуются пробои. Таким образом, испытания образцов лопасти со смоченными и/или загрязненными внутренними поверхностями могут оказаться уместными, если предполагается, что такие условия создаются внутри лопасти в условиях эксплуатации в результате внешних воздействий.

Примечание — Поскольку ВЭУ обычно проектируется для эксплуатации в течение 20 лет с исключительно минимальным техобслуживанием, важно, чтобы количество разрядов было сопоставимо с ожидаемой угрозой в месте реального расположения ВЭУ. Поэтому должно прилагаться как минимум три разряда для каждой полярности и положения в целях проверки и подтверждения, тогда как при разработке новых конструкций можно было бы провести большее число испытаний.

D.2.1.7 Интерпретация данных

Образцы для испытания должны получить полное заключение по результатам испытания для определения соответствия конструкции техническим требованиям по критериям приемки и браковки.

D.2.2 Испытание на касание лидера, стремительно проходящего по поверхности

D.2.2.1 Цель испытания

Данное испытание обычно проводится для поверхностей лопастей ВЭУ, которые подвергаются воздействию начального лидера при вращении лопасти, таким образом, лидер может «промчаться» по небольшому участку поверхности до появления первого удара. Данное испытание можно использовать для оценки:

- возможного места пробоя на непроводящих (т. е. диэлектрических) поверхностях;
- путей прохождения дуговых разрядов на непроводящих поверхностях;
- работоспособности защитных устройств, таких как ленты молниеуловителя.

D.2.2.2 Образец для испытаний

Образец для испытаний должен представлять собой часть полномасштабной лопасти, например, кончик лопасти или другую поверхность, в которой есть молниеприемник или другое защитное устройство. Должны быть представлены любые покрытия поверхности, включая заливку и краску, для обеспечения реальных характеристик разряда поверхности. Если в защитную конструкцию лопасти входит молниеотвод, который находится внутри лопасти, в образец для испытания также должен войти такой молниеотвод.

D.2.2.3 Испытательная установка

Стандартная схема испытательной установки с показом образца для испытания в разрезе и стандартного положения испытательного электрода представлена на рисунке D.7. Испытания обычно проводятся с несколькими положениями электрода, отображая возможные направления пути стремительного прохождения лидера по поверхности.

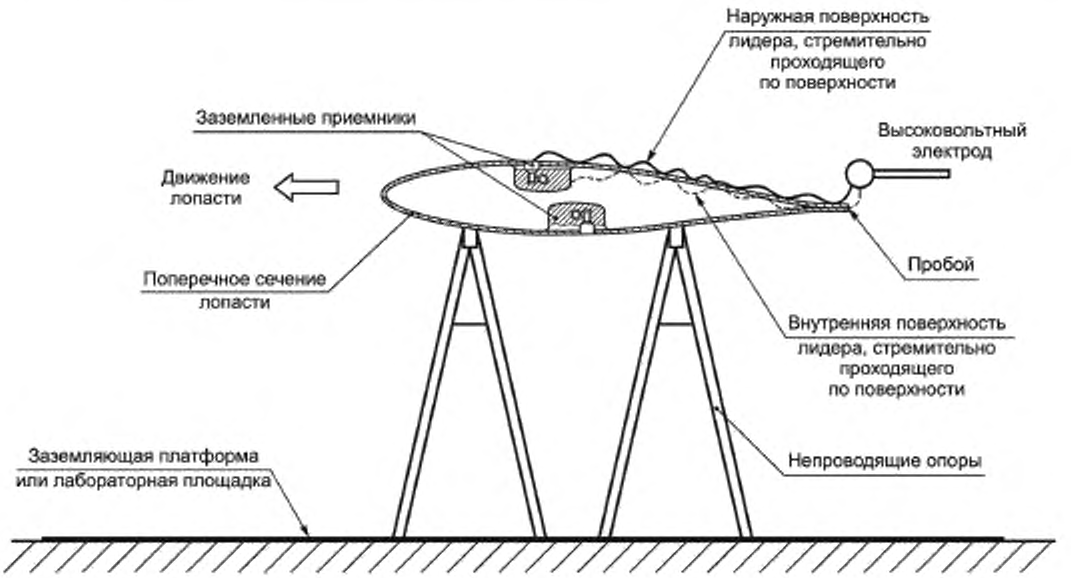


Рисунок D.7 — Схема испытания на стремительное прохождение лидера по поверхности

При проведении испытаний необходимо закрепить испытательный образец над заземляющей платформой на расстоянии, по крайней мере, в 1,5 раза больше минимального пробивного промежутка. Приемник(и) и любые соответствующие защитные молниеотводы должны находится в нулевом потенциале.

Необходимо подсоединить выход высоковольтного генератора к высоковольтному электроду. Электрод должен быть сферической формы с радиусом 25 — 50 мм. Поверхность высоковольтного электрода должна быть расположена в 50 мм от поверхности образца для испытания, подвергаемой воздействию нагрузок, для воспроизведения напряжения, создаваемого каналом молнии от лидера, стремительно проходящего по поверхности образца для испытания;

Необходимо установить оборудование для измерения и записи прикладываемого испытательного напряжения.

D.2.2.4 Форма кривой испытательного напряжения

Электрическое поле, связанное с касанием лидера, стремительно проходящего по поверхности, обусловлено, главным образом, импульсами электрического разряда, проходящего в канале лидера. Они образуют быстро усиливающиеся электрические поля, которые представлены соответствующим образом в форме кривой импульсного напряжения при ударе молнии, определенной в международном стандарте [4]. Кривая напряжения полного грозового импульса достигает максимального значения за время T_1 = 1,2 μс и спадает до среднего значения за время T_2 = 50 μс, как представлено на рисунке D.8.

Данная форма кривой применяется с виртуальным пиковым напряжением, которое выше чем требуется для ионизации воздушного зазора между испытательным электродом и поверхностью образца, для того, чтобы возникло искрение на фронте волны, как представлено на рисунке D.9.

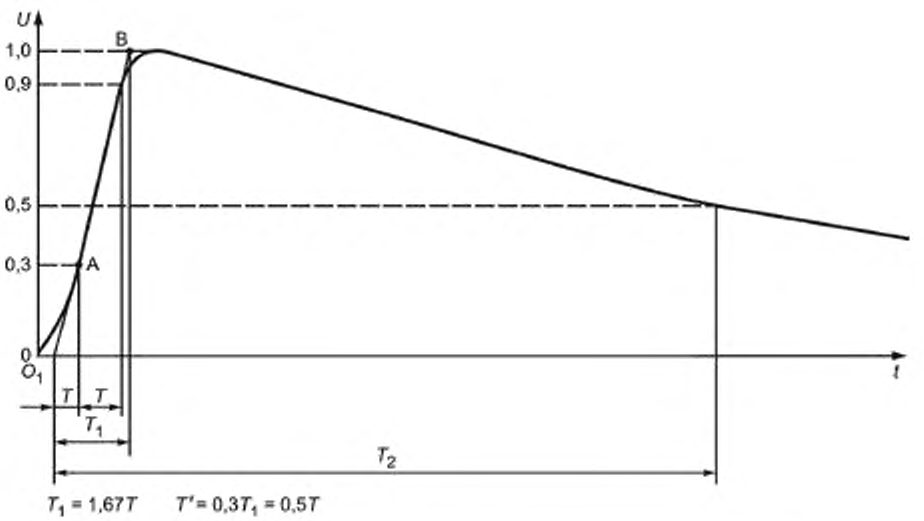


Рисунок D.8 — Форма кривой импульсного напряжения при ударе молнии

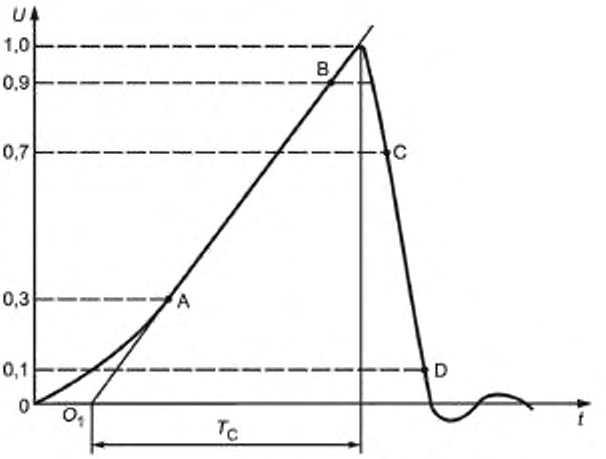


Рисунок D.9 — Форма кривой импульсного напряжения при ударе молнии с изображением дугового разряда на фронте волны

D.2.2.5 Измерения и запись данных

Необходимо сделать следующие измерения и записи данных:

- фотографии и описание каждой испытательной установки и положения электрода;
- фотозаписи всех испытаний. В поле зрения камер должны попадать все стороны образца для испытания. Одна камера должна быть способна выполнить быстрый предварительный анализ пробного пуска 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;
- запись данных по лабораторным условиям (например, температура, давление и влажность), дат проведения испытаний, данных по персоналу, выполняющему и наблюдающему за испытаниями, а также данных о месте проведения испытания;
- записи любых отклонений от процедуры испытания;
- запись результатов каждого испытания с указанием полярности напряжения, амплитуды и формы кривой.

D.2.2.6 Процедура испытаний

Процедура испытания должна быть следующей:

а) необходимо измерить лабораторные условия окружающей среды;

б) необходимо изучить и соблюдать правила техники безопасности. Площадки для испытания должны быть безопасны и освобождены от персонала до включения испытательного оборудования. После испытаний и до появления персонала на площадке для испытания батареи конденсаторов необходимо замкнуть накоротко. Может потребоваться защита ушей и глаз;

в) необходимо внимательно осмотреть образец для испытания на наличие любых повреждений, которые впоследствии можно будет перепутать с последствиями испытания, и пометить их, чтобы не спутать с последующими результатами испытаний;

г) необходимо откалибровать генератор и аппаратуру, как указано ниже:

1) закрыть образец для испытаний токопроводящей фольгой;

2) испытания необходимо провести с электродом при положительной и при отрицательной полярности. Выбрать начальную полярность и приложить пробный разряд к фольге при измерении приложенного напряжения. Желательно, чтобы начальная полярность электрода была отрицательной (—), тогда полярность образца для испытания будет положительной. Это условие приводит к низкой вероятности пробоя непроводящих материалов, поскольку стримеры, образующиеся от защитных устройств образца для испытания, продвигаются дальше в воздушный зазор до момента соединения с противоположными стримерами от отрицательного электрода;

3) если требуемая форма кривой не верна, необходимо откорректировать параметры генератора или расстояние между электродами для получения определенной формы кривой;

4) убрать фольгу;

д) очистить образец для испытания, используя соответствующие методы для удаления пыли, мусора и других загрязнений, которые могут повлиять на результаты испытания;

е) приложить разряд к образцу для испытания при измерении приложенного напряжения и фотографировании прохождения дугового разряда;

ж) осмотреть образец для испытания и задокументировать результаты. Отметить и сфотографировать любые пробои и другие воздействия на образец для испытания;

з) если появился пробой, провести анализ с целью определения, прошел ли испытание образец. Если образец не прошел испытание, то необходимо прекратить последующие испытания; и — и

и) повторить этапы, указанные в перечислениях д) — и) для каждого испытания, полярностей и положений электрода, требуемых по методике испытаний.

Примечание — Поскольку ВЭУ обычно проектируется для эксплуатации в течение 20 лет с исключительно минимальным техобслуживанием, важно, чтобы количество разрядов было сопоставимо с ожидаемой угрозой в месте реального расположения ВЭУ. Поэтому должно прилагаться минимум три разряда для каждой полярности и положения в целях проверки и подтверждения, тогда как при разработке новых конструкций можно было бы провести большее число испытаний.

D.2.2.7 Интерпретация данных

Образцы для испытания должны получить полное заключение по результатам испытания для определения соответствия конструкции техническим требованиям по критериям приемки и браковки.

D.3 Испытания на физическое повреждение высоким током

D.3.1 Общие положения

Данные испытания проводятся 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.

D.3.2 Испытание на вхождение дуги

D.3.2.1 Цель испытания

Данное испытание применяется для таких конструкций, как лопасти и гондолы ВЭУ, которые подвергаются воздействию прямого попадания молнии или проводимых токов молнии.

Испытание проводится для определения прямого (физическое повреждение) воздействия, которое может возникнуть в точках возможного приложения канала молнии к лопасти или где высокий ток и плотности энергии могут уходить от точки вхождения во время приложения молнии. Примерами являются воздушные системы перехвата вспышек молнии для лопасти и соответствующие токоотводы, металлическая фольга, ленты молниеуловителя, крепежные и соединительные элементы на пути тока молнии.

Испытание может проводиться для оценки:

- повреждения от приложения дуги;
- образования места локального перегрева;
- эрозии металла в воздушных системах перехвата вспышек молнии;
- соответствия защитных материалов и устройств;
- воздействия магнитной силы;
- воздействия взрывной и ударной волны;
- поведения стыков и узлов аппаратуры;
- напряжений и токов в интересующих точках по всей системе молниезащиты.

D.3.2.2 Образцы для испытания

Данные испытания могут проводиться на полномасштабных серийных изделиях или на опытных образцах. Данные испытания могут также проводиться на панелях, вырезанных образцах или частях лопасти, или других сборках ВЭУ. Панели, вырезанные образцы или части изготавливаются с применением соответствующего технологического процесса, красок и других покрытий, соединений и материалов. Что касается защитных устройств, для которых требуется определенное напряжение для ионизации, например, таких как сегментированные ленты молниеуловителя, длина ионизируемого образца для испытания должна быть достаточно короткой для ионизации во время испытания высоким током, так как генераторы высокого тока обычно не вырабатывают более 100 кВ.

D.3.2.3 Испытательная установка

При проведении испытаний необходимо:

- установить образец для испытания в креплении, которое должно прочно его удерживать;
- заземлить всю аппаратуру на корпус образца для испытания, который обычно заземлен;
- подсоединить обратный привод генератора к сборке так, чтобы токи молнии отводились от образца для испытания таким же образом, как если бы в лопасть или гондолу попала молния. Убедиться, 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;
- расположить испытательный электрод на 50 мм выше области образца для испытаний, которая будет оцениваться. Для большинства испытаний на вхождение дуги электрод должен быть с отведением струи, как показано на рисунке D.10, т. к. такой электрод наилучшим образом отображает воздействия ударной волны при ударах реальной молнии и уменьшает количество электродного материала, наносимого на поверхность образца для испытаний [44];
- установить отрицательную полярность генератора для создания максимального повреждения, так как ножки дуги чаще всего устремляются к аноду;

- если необходимо может использоваться, тонкий металлический провод, не превышающий в диаметре 0,1 мм, для направления дуги в конкретную интересующую точку на образце для испытания. Данный подход применим для генераторов, которые используют низкие напряжения. Провод, при прохождении тока через который образуется пар, не оказывает неблагоприятного влияния на результаты испытания;
- установить измерительное и записывающее оборудование.

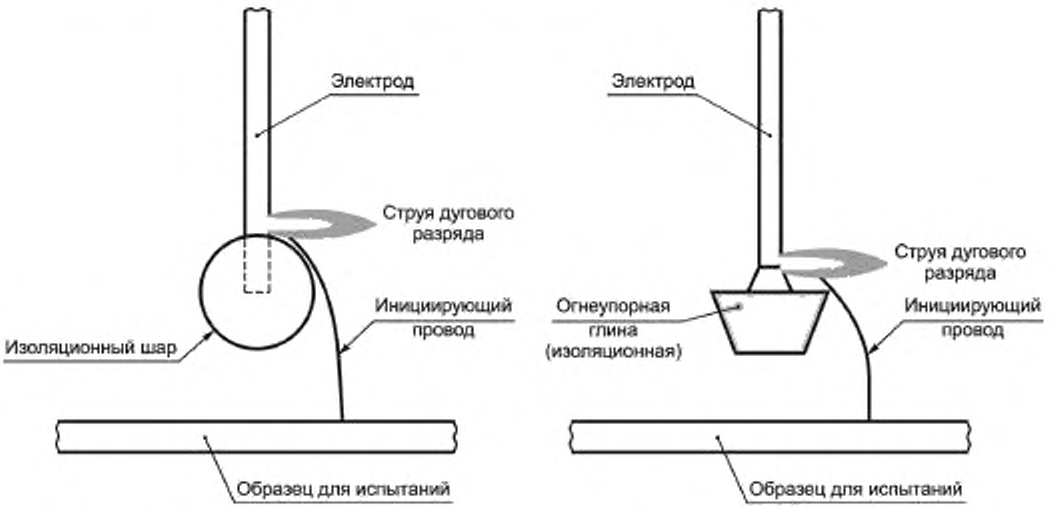


Рисунок D.10 — Стандартные испытательные электроды с отведением струи

D.3.2.4 Формы кривой испытательного тока

Испытательные токи включают первый короткий удар и длинный удар молнии. Удары обычно накладываются в одном разряде. Параметры данных испытательных токов представлены в таблице А.1.

Параметры *I*, *W/R* и Q_{flash} в пределах их допусков необходимо получить в том же импульсе с помощью приближенно экспоненциально ослабевающего тока с T_2 в диапазоне 350 μс с сопутствующим непрерывным током, подающим оставшийся заряд.

Конкретные испытательные токи, которые необходимо приложить, устанавливаются в зависимости от уровня защиты (УМЗ), который назначается для лопасти или другой испытываемой конструкции ВЭУ.

D.3.2.5 Измерения и запись данных

Необходимо сделать следующие измерения и записи данных:

- фотографии и описание испытательной установки;
- фотографии образца для испытания до, во время и после каждого испытания. Для выявления областей локального перегрева во время испытаний может быть использована инфракрасная видеокамера;
- фотографии и описание повреждения образца для испытания;
- запись данных по лабораторным условиям окружающей среды (например, температура, давление и влажность), дат проведения испытаний, данных о персонале, выполняющему и наблюдающему за испытаниями, а также данных о месте проведения испытания;
- запись любых отклонений от процедуры испытания;
- запись результатов каждого испытания с указанием полярности, амплитуд тока, форм кривой, удельной энергии и переносов заряда в соответствующих точках испытания.

Примечание — Измерения непрямого воздействия иногда необходимы для электрических систем, таких как маяки, нагреватели и датчики управления, которые необходимо установить в испытываемой части (см. раздел 8). Некоторые из этих измерений, при необходимости, можно сделать во время испытаний на прямое воздействие до тех пор, пока ключевые параметры формы кривой, такие как максимальная скорость нарастания, не будут верны или в противном случае учтены.

D.3.2.6 Процедура испытания

Процедура испытания должна быть следующей:

а) необходимо измерить лабораторные условия окружающей среды;

б) необходимо изучить и соблюдать правила техники безопасности. Площадки для испытания должны быть безопасны и освобождены от персонала до включения испытательного оборудования. После испытаний и до

появления персонала на площадке для испытания батареи конденсаторов необходимо замкнуть накоротко. Может потребоваться защита ушей и глаз;

в) откалибровать генератор и аппаратуру, как указано ниже:

1) вставить проводящую шину или панель вместо образца для испытания, имеющую такие же свойства материала, как и образец для испытания;

2) подсоединить шину или панель обратно к каналу генератора для обратного хода испытательного тока;

3) начать испытание с шиной, измеряя форму кривой испытательного тока;

4) если уровень тока или форм(ы) кривой не верны, откорректировать параметры генератора;

5) повторить этапы, указанные в перечислениях 3) и 4), если необходимо, для получения необходимых форм кривой;

6) убрать шину или панель и установить образец для испытания;

г) провести испытание с образцом;

д) осмотреть образец для испытания и задокументировать результаты;

е) если требуется, расположить электрод в новом положении на образце для испытания и повторить этапы, указанные в перечислениях г) и д).

Данный метод испытания должен, как минимум, отобразить уровень ожидаемой угрозы от реальных ударов молнии в лопасть во время эксплуатационного срока службы, например, 20 лет. С учетом удельной энергии и магнитных сил интерес представляет только наивысший уровень тока, поэтому только несколько разрядов на этом уровне следует приложить. Учитывая эрозию поверхности воздушных систем перехвата вспышек молнии из-за 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.

D.3.2.7 Интерпретация данных

Образцы для испытания должны получить полное заключение по результатам испытания для определения соответствия конструкции техническим требованиям по критериям приемки и браковки. Что касается воздушных систем перехвата вспышек молнии, в эти критерии должны входить шум как последствие эрозии поверхности, легкость замены и т. п.

D.3.3 Испытание непроводящих поверхностей

D.3.3.1 Цель испытания

Данное испытание проводится с непроводящими поверхностями, например, поверхностями лопасти ВЭУ. Данное испытание проводится для определения воздействия канала молнии, стремительно проходящего через непроводящие поверхности, с последующим точным касанием воздушной системы перехвата вспышек молнии.

Для непроводящих частей, где может возникнуть пробой и последующее попадание в расположенные внизу проводящие части (крепежные элементы воздушной системы перехвата вспышек молнии, системы вертикальных молниеотводов и т. п.), необходимо также провести испытание на касание лидера, стремительно проходящего по поверхности, по D.2.2. Если появляется пробой во время этого испытания, то необходимо улучшить конструкцию во избежание повреждения во время будущих испытаний. Данное испытание проводится для оценки:

- ударной волны и тепловых воздействий на непроводящие поверхности и покрытия;

- воздействий поверхностного дугового пробоя на металлической конструкции, находящиеся на или под поверхностью лопасти (металлические сетки под поверхностью, используемые в качестве вертикальных молниеотводов, углеродный композиционный материал, расположенный прямо под поверхностью, и т. п.);

- непроводящей поверхности на целостность крепления опоры, в случае наличия элементов конструкции, поддерживающих поверхность лопасти.

D.3.3.2 Образец для испытаний

В зависимости от цели испытания образец для испытания должен быть полномасштабным серийным изделием, опытным образцом или небольшим образцом, содержащим интересующие зоны. Части лопасти, которые необходимо испытать, будут областями вблизи воздушных систем перехвата вспышек молнии (например, приемники на концевой и боковых частях), изоляционными поверхностями поверх углеродного композиционного материала и/или проводящих металлических сеток. Сборка должна быть достаточно полной для оценки возможного повреждения без влияния на результаты испытания. Если целью испытания является сравнение различных конструкций, все образцы должны быть одинакового размера.

D.3.3.3 Испытательная установка

Процедура испытания должна быть следующей:

- необходимо установить образец для испытания в креплении, которое поднимает образец на достаточную высоту от других проводящих поверхностей, чтобы они не влияли на результаты испытания. На рисунке D.11 представлена стандартная схема установки;

- необходимо заземлить всю аппаратуру на корпус образца для испытания, который обычно заземлен;

- необходимо подсоединить обратный привод генератора к образцу для испытания так, чтобы токи молнии отводились от образца для испытания таким же образом, как если бы в лопасть ВЭУ попала молния. Убедиться, что контролируются магнитные силы и другие взаимодействия, имеющие отношение к току, протекающему внутри установки, таким образом, они будут отображать реальную ситуацию;

- необходимо разместить электрод с отводом струи (см. рисунок D.11) на расстоянии 50 мм или более от области образца для испытания, которую необходимо проанализировать;

- необходимо подсоединить выходной терминал высоковольтного генератора к электроду;
- для данного испытания можно использовать как положительную, так и отрицательную полярность;
- тонкий металлический провод, не превышающий в диаметре 0,1 мм, может использоваться для направления дуги в конкретную интересующую точку на образце для испытания. Инициирующий провод должен проходить от электрода напрямую через непроводящую поверхность по направлению лидера, стремительно проходящего по поверхности. Инициирующий провод должен находиться примерно в 20 мм над поверхностью образца;
- необходимо установить измерительное и записывающее оборудование.

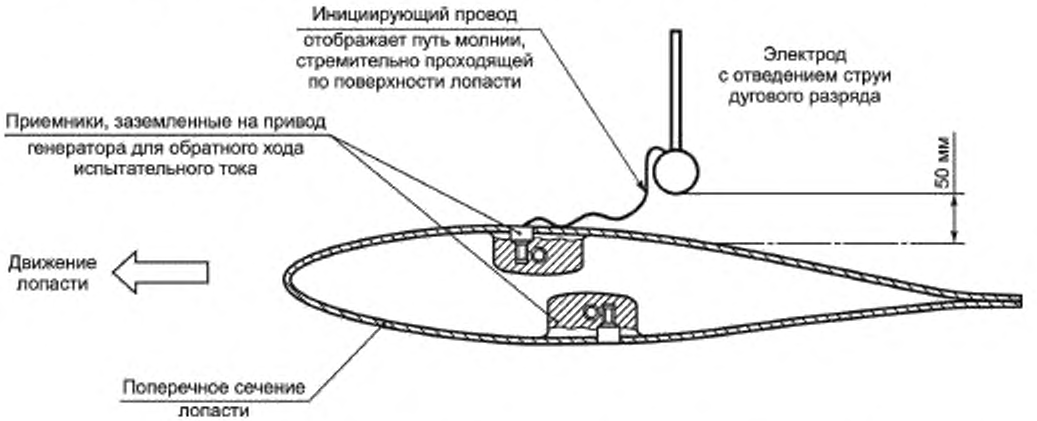


Рисунок D.11 — Схема установки для испытания высоким током для непроводящих поверхностей

D.3.3.4 Формы кривой испытательного тока

Испытательные токи описаны в D.3.2.4.

D.3.3.5 Измерения и запись данных

Необходимо сделать следующие измерения и записи данных:

- фотографии и описание испытательной установки;
- фотографии образца для испытания до, во время и после каждого испытания. Для выявления областей локального перегрева во время испытаний может быть использована инфракрасная видеокамера;
- фотографии и описание повреждения образца для испытания;
- запись данных по лабораторным условиям окружающей среды (например, температура, давление и влажность), дат проведения испытаний, данных о персонале, выполняющем и наблюдающем за испытаниями, а также данных о месте проведения испытания;
- запись любых отклонений от процедуры испытания;
- запись результатов каждого испытания с указанием полярности, амплитуд тока, форм кривой, удельной энергии и переносов заряда в соответствующих точках испытания.

D.3.3.6 Процедура испытания

Процедура испытания должна быть следующей:

а) необходимо измерить лабораторные условия окружающей среды;

б) необходимо изучить и соблюдать правила техники безопасности. Площадки для испытания должны быть безопасны и освобождены от персонала до включения испытательного оборудования. После испытаний и до появления персонала в области испытания батареи конденсаторов необходимо замкнуть накоротко. Может потребоваться защита ушей и глаз;

в) необходимо откалибровать генератор и аппаратуру, как указано ниже:

1) установить над образцом или вместо него для испытания проводящую шину, имеющую такие же свойства материала, как образец для испытания, для гарантии того, что образец для испытания не будет поврежден разрядом генератора;

2) подсоединить шину к терминалу генератора для обратного хода испытательного тока;

3) приложить разряд к шине при измерении форм(ы) кривой приложенного тока;

4) если уровень или форм(ы) кривой тока не верны, откорректировать параметры генератора;

5) повторить этапы, указанные в перечислениях 3) и 4), если необходимо, для получения необходимых форм кривой;

6) убрать шину;

г) очистить образец для испытания от пыли, мусора и других загрязнений, которые могут повлиять на результаты испытания;

д) провести первое испытание с образцом для испытания;

е) осмотреть образец для испытания и задокументировать результаты;

ж) если требуется по плану испытания, поставить электрод в новое положение и повторить этапы, указанные в перечислениях д) и е).

D.3.3.7 Интерпретация данных

Образец для испытания должен получить полное заключение по результатам испытания для определения соответствия конструкции техническим требованиям по критериям приемки и браковки. Необходимо рассмотреть фотографии, на которых видны пути дуги, точки вхождения и области повреждения на образце для испытания, для обеспечения понимания воздействия повреждения.

D.3.4 Испытание проводимым током

D.3.4.1 Цель испытания

Испытание проводимым током проводят с вертикальными молниеотводами, соединительными элементами и другими механически жесткими или гибкими соединениями, которые находятся на пути(ях) прохождения тока между воздушной системой перехвата вспышек молнии и системой заземления ВЭУ. Для проверки соединительных элементов ВЭУ, через которые проходит молния, уровни испытательного тока необходимо выбрать в соответствии с первым коротким ударом молнии выбранного УМЗ.

Данное испытание проводится для оценки:

- проводимости тока молнии;
- повышения температуры в проводниках и соединениях;
- дугообразования и искрения в подшипниках, скользящих контактах, щетках и общих соединительных элементах;
- влияния магнитных сил;
- соответствия токопроводности композиционных материалов из углеродного волокна и приводов.

D.3.4.2 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.

D.3.4.3 Испытательная установка

Подготовка к испытаниям включает следующие операции:

- установить образец для испытания в креплении. На рисунке D.12 представлена характерная схема;
- заземлить всю аппаратуру на корпусе образца для испытания, который обычно заземлен;
- подсоединить выходной терминал генератора и терминал для обратного хода тока к образцу так, чтобы испытательные токи проходили через образец таким же образом, как если бы в лопасть или другую конструкцию попала молния. Полярность генератора обычно не важна. Убедиться, что контролируются магнитные силы и

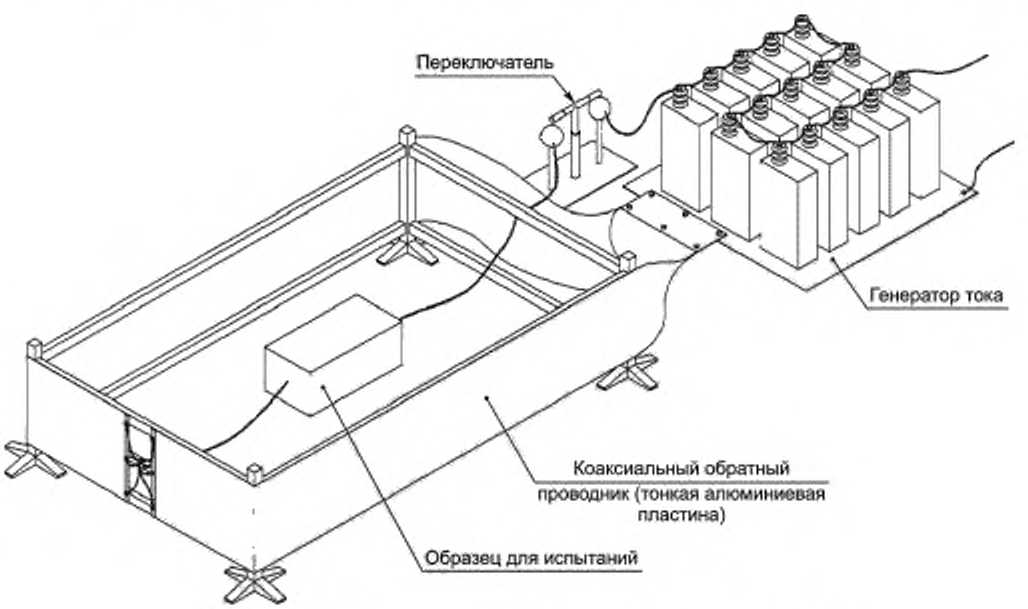


Рисунок D.12 — Пример схемы для испытаний проводимым током

другие взаимодействия, имеющие отношение к току, протекающему внутри образца для гарантии того, что они отображают реальную ситуацию;

- установить измерительное и записывающее оборудование.

Примечание — Можно использовать полукоаксиальное расположение проводников и образца для испытания для уменьшения магнитных сил из-за токов в проводниках, в которых проходит испытательный ток из образца, а также для достижения распределения тока по образцу, наиболее приближенного к реальным условиям. На рисунке D.11 представлена схема для испытания части лопасти ВЭУ. Измерения напряжений, наводимых в электрические провода, установленных в лопасти, можно также выполнить во время испытания проводимым током, как описано в разделе 8.

D.3.4.4 Формы кривой испытательного тока

Испытательные токи, которые необходимо подавать, описаны в D.3.2.4.

Конкретные испытательные токи, которые необходимо приложить, зависят от уровня защиты, который определен для испытываемой 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 исходя из процентного соотношения поперечного сечения образца ко всему поперечному сечению конструкции (подразумевая равномерную проводимость). Такой ток часто повышается до 50 %, что является причиной возможного дисбаланса в распределении тока по поперечному сечению конструкции.

D.3.4.5 Измерения и запись данных

Необходимо сделать следующие измерения и записи данных:

- фотографии и описание испытательной установки;
- фотографии точек попадания;
- фотографии образца для испытания до, во время и после каждого испытания. Для выявления областей локального перегрева во время испытаний может быть использована инфракрасная видеокамера;
- фотографии и описание повреждения образца для испытания;
- запись данных по лабораторным условиям окружающей среды (например, температура, давление и влажность), дат проведения испытаний, данных о персонале, выполняющем и наблюдающем за испытаниями, а также данных о месте проведения испытания;
- запись любых отклонений от процедуры испытания;
- запись результатов каждого испытания с указанием полярности, амплитуд тока, форм кривой, удельной энергии и переносов заряда в соответствующих точках испытания.

Разрешаются также другие схемы, утвержденные для испытаний высоким током, на основе закорачивающей перемычки.

D.3.4.6 Процедура испытания

Процедура испытания должна быть следующей:

а) необходимо измерить лабораторные условия окружающей среды;

б) необходимо изучить и соблюдать правила техники безопасности. Площадки для испытания должны быть безопасны и освобождены от персонала до включения испытательного оборудования. После испытаний и до появления персонала на площадке для испытания батареи конденсаторов необходимо замкнуть накоротко. Может потребоваться защита ушей и глаз;

в) откалибровать генератор и аппаратуру, как указано ниже:

1) отсоединить генератор высокого и обратного тока от образца для испытания и подсоединить к проводящей шине возле или вместо образца для испытания. Шина должна иметь такие же свойства материала, как и образец для испытания;

2) выполнить испытание с шиной, измерив форм(ы) кривой приложенного тока;

3) если уровень тока или форм(ы) кривой не верны, откорректировать параметры генератора;

4) повторить этапы, указанные в перечислениях 2) и 3), если необходимо, для получения необходимых форм кривой;

5) убрать шину и снова подсоединить генератор к образцу для испытания;

г) очистить образец для испытания, используя соответствующие методы для удаления пыли, мусора и других загрязнений, которые могут повлиять на результаты испытания;

д) провести испытание с образцом для испытания;

е) осмотреть образец для испытания и задокументировать результаты;

ж) повторить этапы, указанные в перечислениях д) и е), для проведения дополнительных испытаний в соответствии с планом испытания.

Примечание — Целесообразно подавать на образец для испытания токи с более низкой амплитудой для определения параметров генератора, необходимых для достижения желаемых полных токов, при этом этап в) можно пропустить.

D.3.4.7 Интерпретация данных

Образцы для испытания должны получить полное заключение по результатам испытания для определения соответствия конструкции техническим требованиям по критериям приемки и браковки.

Приложение Е
(справочное)

Применение концепции зон молниезащиты (ЗМЗ) на ветроэнергетической установке

Е.1 Определение зон молниезащиты

Для разработки системы молниезащиты конструкции целесообразно разделить ее на зоны молниезащиты (ЗМЗ), в которых должна быть определена электромагнитная среда. В таблице Е.1 приведены определения зон молниезащиты.

Таблица Е.1 — Определение зон молниезащиты

Обозначение	Определение
	Внешние зоны
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. Зона ЗМЗ 0 подразделяется:
ЗМЗ 0_A	- зона, в которой угроза появляется вследствие прямой вспышки молнии и полного электромагнитного поля молнии. Внутренние системы могут подвергаться воздействию полных или частичных выбросов тока молнии;
ЗМЗ 0_B	- зона, защищенная от прямых вспышек молнии, однако в ней угроза появляется вследствие полного электромагнитного поля молнии. Внутренние системы могут подвергаться воздействию частичных выбросов тока молнии
	Внутренние зоны
ЗМЗ 1	Зона, в которой выброс тока ограничивается перераспределением тока и УЗП на границе. Пространственное экранирование может ослабить электромагнитное поле молнии.
ЗМЗ 2,... n	Зона, в которой выброс тока может дополнительно ограничиваться перераспределением тока и добавочным УЗП 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 системы молниезащиты вследствие распределения исходного тока молнии между несколькими молниеотводами.

Е.2 Зона ЗМЗ 0

Граница между зонами ЗМЗ 0_A и ЗМЗ 0_B может быть определена с помощью модели вращающейся сферы, как показано на рисунке Е.1. Области, отмеченные серым цветом — это зона ЗМЗ 0_B, в которую молния не может попасть, а остальная часть поверхности ветроэнергетических установок — это зона ЗМЗ 0_A. Места, которые сфера не может обкатить, защищены от прямого попаданиям молнии. Как показано на рисунке Е.1 молния может попасть на большую часть поверхности ветроэнергетических установок, следовательно, это области ЗМЗ 0_A. Можно использовать также компьютерные модели. Эти модели в основном будут основаны на методе катящейся сферы. Внутренние системы зоны ЗМЗ 0_B могут подвергаться воздействию частичных выбросов тока молнии.

С помощью средств воздушного перехвата (например, молниевые стержни), расположенных на задней кромке кожуха гондолы, зона ЗМЗ 0_Bможет быть создана на вершине гондолы, что может защитить метеорологические инструменты от прямого попадания молнии. У основания ветроэнергетических установок также находится зона ЗМЗ 0_B, в которой трансформаторный отсек, при его наличии, будет защищен от прямого попадания молнии.

Инструменты размещения воздушной системы перехвата вспышек (например, вращающаяся сфера, защитный угол и т. д.) не применяются к лопастям ветроэнергетических установок. Поэтому конструкция воздушной системы перехвата вспышек молнии должна быть проверена в соответствии с 8.2.3.

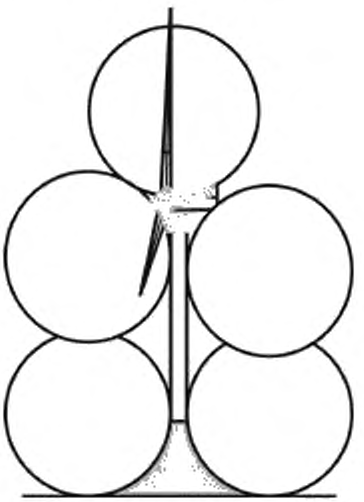


Рисунок Е.1 — Модель вращающейся сферы

Е.3 Другие зоны

Граница между зонами ЗМЗ 0_A или ЗМЗ 0_B и ЗМЗ 1 может проходить по мачте или вершине кожуха гондолы, если есть металлический кожух или металлическая экранирующая сеть, достаточная для защиты элементов внутри (оптимальной является клетка Фарадея вокруг гондолы). В случае, когда кожух гондолы сделан из стеклопластика, рекомендуется, чтобы металлическая рама или обвязка была утоплена в кожух гондолы с целью получить, как минимум, во внутренней области зону 0_B для защиты элементов гондолы от прямого попадания молнии или тока лидера без обратного удара молнии (рисунки Е.2 и Е.3). Она должна быть безупречно металлизирована 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 Е.5 и Е.6 показано, как пространство ветроэнергетических установок может быть разделено на защитные зоны ЗМЗ 1 и ЗМЗ 2. Гондола (с сеткой в кожухе), мачта и трансформаторный отсек являются защитными зонами ЗМЗ 1. Механизмы внутри металлических отсеков в областях ЗМЗ 1 находятся в защитной зоне ЗМЗ 2 (см. примечание). Например, средства управления внутри отсека внутри металлической мачты находятся в ЗМЗ 2, а средства управления внутри металлических отсеков вне мачты расположены в зоне ЗМЗ 1 или ЗМЗ 2 (см. примечание 1 (таблица Е.1).

Если мачта сделана из металлической трубы и между частями мачты существует электрическое соединение, ЗМЗ внутри мачты может быть определена как ЗМЗ 2. Стальная полая мачта является очень эффективной клеткой Фарадея. Очень чувствительное оборудование можно поместить в еще более защищенную зону ЗМЗ 3 на другом уровне металлических отсеков (примечание 1). 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 электромагнитного поля не рекомендуются.

Примечание — Ослабление магнитного и электрического полей для металлических отсеков зависит от их конструкции. Для электромагнитно совместимых отсеков производитель может предоставить замеренные ослабления магнитного и электрического полей.

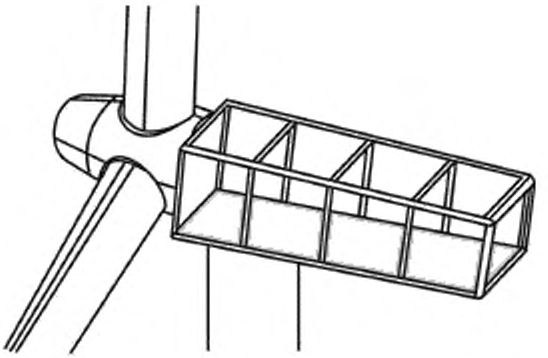


Рисунок Е.2 — Сетка с большим размером ячеек для гондолы с кожухом из стеклопластика

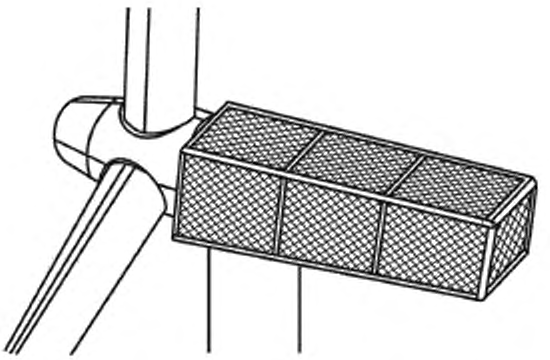


Рисунок Е.3 — Сетка с маленьким размером ячеек для гондолы с кожухом из стеклопластика

Е.4 Границы зон

На границе каждой зоны необходимо гарантировать, чтобы кабели и провода, пересекающие границу, не проводили большое количество тока молнии или переходного напряжения в зону молниезащиты с большим номером. Это достигается надлежащей металлизацией 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 элементов для защиты от перенапряжения (УЗП) 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 кабель-каналы, в результате, например, два отсека управления, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга, можно соединить без необходимости использования УЗП на контуре сердечников (рисунок Е.4). Подобным образом отсек, определенный как ЗМЗ 2, можно расширить экранированным кабелем для включения внешнего металлического корпуса датчика, также определенного как ЗМЗ 2.

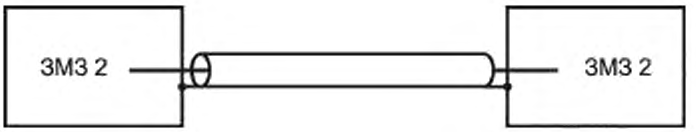


Рисунок Е.4 — Два отсека, определенных как ЗМЗ 2, соединенных через экран экранированного кабеля

Е.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 задокументированы.

Защиту можно обеспечить с помощью использования согласованных УЗП, экранированных кабелей, экранирующих кабельных магистралей или их сочетания (при необходимости).

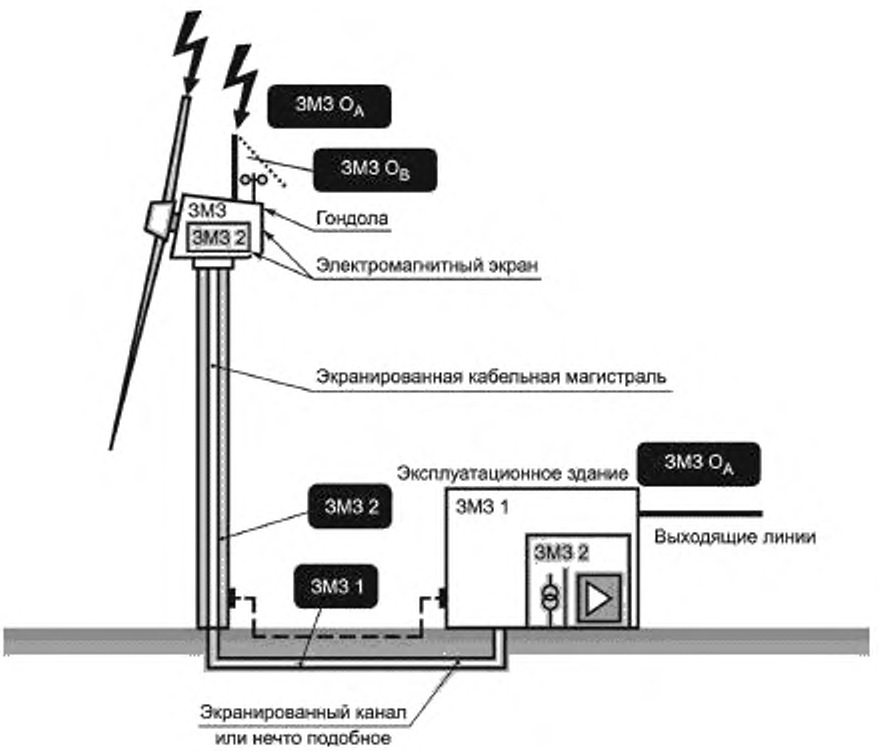


Рисунок Е.5 — Пример деления ветроэнергетической установки на различные зоны молниезащиты

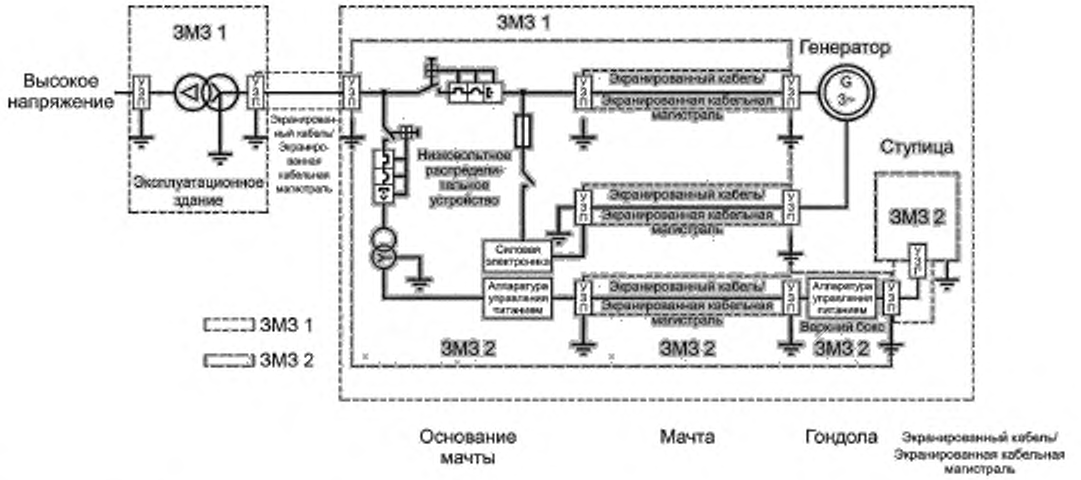


Рисунок Е.6 — Пример записи деления мер защиты электрической системы от электромагнитного импульса от грозовых разрядов на зоны защиты с указанием мест пересечения с электрической цепью границ ЗМЗ, показывающий как длинные кабели проходят между основанием мачты и гондолой

Приложение F
(справочное)

Выбор и установка согласованной защиты УЗП на ветроэнергетической установке

F.1 Размещение УЗП

В соответствии с ГОСТ Р 61643-12 необходима дополнительная защита там, где:
- присутствует очень чувствительное оборудование;
- расстояние между УЗП на входе в ЗМЗ и требуемом защиты оборудовании, слишком большое;
- электромагнитные поля внутри конструкции создают внутренние источники помех.

Примечание — Подробная информация о размещении УЗП представлена в стандарте [7].

Дальность действия вибрационной защиты — это максимальная длина цепи между УЗП и оборудованием, на которой УЗП по-прежнему действует с учетом колебательных явлений и емкостной нагрузки. Колебательные явления можно не учитывать, если длина цепи между УЗП и оборудованием меньше 10 м или если уровень эффективной защиты равен 50 % уровня максимально допустимого импульсного напряжения оборудования, находящегося ниже по потоку.

Дальность действия индуктивной защиты — это максимальная длина по цепи между УЗП и оборудованием, на которой УЗП по-прежнему действует с учетом индуктивного воздействия. Индуктивное воздействие можно минимизировать пространственным и линейным экранированием (см. также приложение G).

Из-за перенапряжений, возникающих, например, при срабатывании выключателей и предохранителей в электрических системах ветроэнергетических установок или электрической системе, к которой подключена ветроэнергетическая установка, может возникнуть необходимость в дополнительных УЗП внутри ЗМЗ (см. F.7).

F.2 Выбор УЗП

В большинстве случаев УЗП можно подобрать по спецификации УЗП или информации об изделии.

F.3 Установка УЗП

С увеличением длины соединительных проводов УЗП понижается эффективность защиты от перенапряжения. Для достижения наибольшей защиты общая длина соединительного провода должна быть как можно меньше.

Для установки УЗП на ветроэнергетических установках:
- рекомендуется, чтобы общая длина соединительного провода не превышала 0,5 м;
- так называемая двухточечная схема установки должна соответствовать рисунку F.1;
- заземляющие соединения 5a и 5b должны соответствовать рисунку F.2.

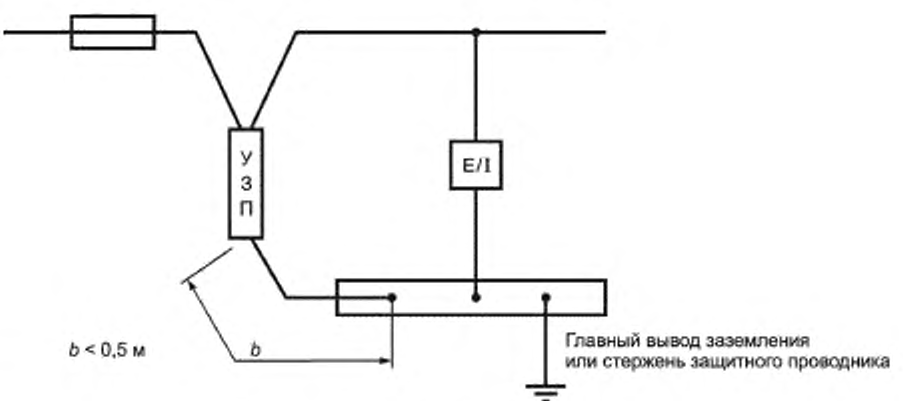


Рисунок F.1 — Двухточечная схема установки

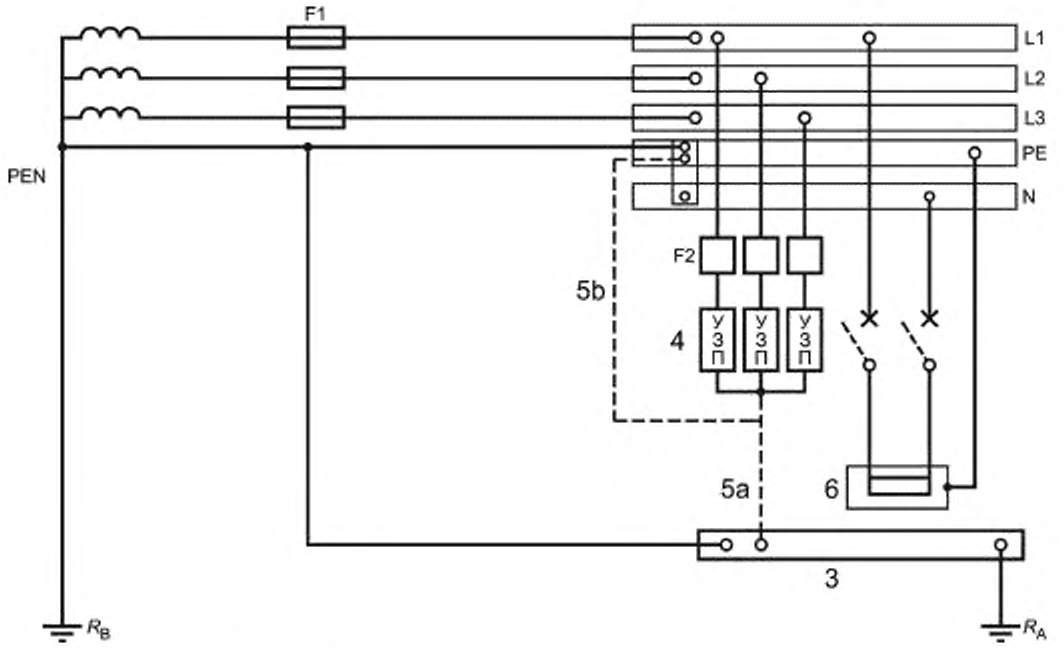


Рисунок F.2 — Схема установки заземляющего соединения

F.4 Воздействие окружающей среды на УЗП

Необходимо определять следующие параметры (см. ГОСТ Р 51992):

- температура хранения и эксплуатации от минус 5 °С до 40 °С (нормальный диапазон) и от минус 40 °С до 70 °С (расширенный диапазон);
- относительная влажность при внутренних условиях должна быть от 30 % до 90 %.

Если фактическое воздействие окружающей среды на установленное на ветроэнергетической установке УЗП превышает значения, указанные в сопроводительных документах на ВЭУ и в ГОСТ Р 51992, то необходимо применить соответствующие методы испытаний и значения воздействий, приведенных в группе стандартов ГОСТ Р МЭК 60068-2. Производитель ветроэнергетических установок должен указать требования к конкретным точкам установки, например на гондоле и ступице.

F.5 Показатель состояния УЗП и мониторинг УЗП при отказе УЗП

УЗП могут быть перегружены по причине исключительно высокого тока молнии или повторяющегося воздействия. Кроме того, критичные части электрической системы и системы управления ветроэнергетических установок могут привести к повышению требований по имеющемуся УЗП.

В таких случаях, которые определяют производители ветроэнергетических установок, УЗП может обеспечить сочетание бесперебойности снабжения и защиты.

Примечание — Подробная информация приведена в стандарте [9].

При необходимости это может быть обеспечено, например, с помощью:

- системы мониторинга УЗП;
- устройства сигнализирования и управления внутри УЗП для предупреждения о наступающем сбое;
- дистанционной сигнализации, которая должна быть включена в общую систему сигнализации и контроля ветроэнергетических установок.

F.6 Выбор УЗП с учетом уровня 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 Н.

F.7 Выбор УЗП с учетом перенапряжения внутри ветроэнергетической установки

Перенапряжения, возникающие при включениях в электрических системах ветроэнергетических установок или системы энергоснабжения, к которой подключена ветроэнергетическая установка, необходимо учитывать при выборе и применении мер защиты от перенапряжения для ветроэнергетических установок.

Возможные примеры таких перенапряжений, возникающих внутри ветроэнергетических установок:

- 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.

F.8 Выбор УЗП по току разряда (I_n) и импульсному току (I_{imp})

В большинстве случаев ветроэнергетические установки устанавливают на открытых участках местности. Более того, с увеличением высоты ветроэнергетических установок увеличивается и вероятность попадания молнии. Возможным способом увеличения срока службы УЗП в случае большого количества попаданий молнии является выбор УЗП с большими параметрами тока разряда и импульсного тока (см. [9],таблицу F.1). Цепи, которые подключены к оборудованию, находящемуся в зоне защиты ЗМЗ 0_B,могут рассматриваться как особо уязвимые цепи, как описано в 8.5.6.10. Этот вид оборудования классифицируется как оборудование, установленное снаружи.

Типичным примером оборудования, устанавливаемого снаружи ветроэнергетических установок, является система измерения направления и скорости ветра и т. д.

В таких случаях рекомендуется, чтобы УЗП внутри ветроэнергетических установок отвечали требованиям таблицы F.2.

Таблица F.1 — Уровни тока разряда и импульсного тока для систем заземления TN

УЗП класс I — I_{imp}(10/350)
12,5 кА для каждого режима защиты
УЗП класс II — I_n(8/20)
5 кА для каждого режима защиты

Таблица F.2 — Примеры повышенных уровней тока разряда и импульсного тока для систем заземления TN

УЗП класс I — I_{imp}(10/350)
25 кА для каждого режима защиты
УЗП класс II — I_n(8/20)
15 кА для каждого режима защиты

Когда для защитных целей используют совместное УЗП, соответствующее классам I и II, величины I_n и I_{imp} должны соответствовать значениям, приведенным в таблицах F.1 и F.2.

Когда ток молнии идет в землю через конструкцию ветроэнергетической установки, он делится между системой заделки заземления, внешними токопроводящими частями (если таковые имеются) и служебными линиями напрямую или через УЗП, соединенными с линиями. Уровень тока, отклоненного с помощью отдельного УЗП, зависит от количества параллельных путей, между которыми делится ток и сопротивления отдельных путей. В приложении Д дано руководство по вычислению уровня тока.

Приложение G
(справочное)

Дополнительные сведения по металлизации, экранированию и методам установки

G.1 Дополнительная информация по металлизации

Из-за неустойчивой природы тока молнии падение пикового напряжения в молниеотводе может быть выражено как

$$V = L\frac{di}{dt}, \qquad (G.1)$$

где L — это индуктивность молниеотвода, Гн/м;

di/dt — это максимальная скорость изменения тока молнии, А/с.

Индуктивность молниеотвода, как правило, можно считать на уровне 1μГн/м, максимальная величина di/dt может меняться от 0,2 кА до 200 кАμс в зависимости от удара молнии и уровня тока между отдельными молниеотводами. Разность напряжений вдоль перемычки металлизации, таким образом, может достигать 200 кВ/м.

Рассмотрим систему, показанную на рисунке G.1, с двумя отсеками управления, находящимися на разных металлических плоскостях внутри гондолы ветроэнергетических установок. Ток молнии попадает в верхнюю плоскость и через перемычку металлизации перемещается на нижнюю плоскость. Когда ток молнии проходит через металлизированную перемычку, потенциал отсека 1 повышается по отношению к потенциалу отсека 2. Такое изменение потенциала может привести к повреждению деталей, находящихся в отсеках 1 или 2. Ситуацию можно улучшить хорошей металлизацией, надлежащей прокладкой кабелей и/или защитой УЗП сигнальным проводом или использованием экранированного сигнального кабеля с экраном, металлизированным на обоих концах.



Рисунок G.1 — Два отсека управления, находящиеся на разных металлических плоскостях внутри гондолы

Использование множества перемычек металлизации и минимизация длины перемычки металлизации в результате приведет к самой низкой из возможных разностей напряжений между двумя металлическими плоскостями.

По этой причине металлизация внутри ветроэнергетических установок должна использовать множество молниеотводов, которые:

- способны выдержать прогнозируемую часть тока молнии, проходящего через рассматриваемый путь;
- по возможности являются короткими и прямыми.

Электропроводка также может быть защищена прокладкой проводов в кабельных каналах/кабелепроводах или использованием экранированного кабеля.

Примечание — Использование экранированного кабеля в международной практике в данном случае определяется стандартом [8].

G.2 Дополнительная информация о защите от электромагнитных импульсов от грозовых разрядов

В большинстве случаев уровни переходного напряжения и предельного тока (устойчивости) оборудования должны быть подтверждены испытаниям и установленные в нем уровни устойчивости нужно использо-

вать для оценки необходимости дополнительной защиты для оборудования в условиях с отдельной ЗМЗ. Более того, уровни выдерживания изоляции электропроводки и т. д. необходимо подтвердить согласно ГОСТ Р МЭК 60664-1.

G.3 Дополнительная информация об экранировании и методике установки

Когда токи молнии проходят через ВЭУ, образуются большие магнитные поля. Если такие изменяющиеся магнитные поля проходят через контур, они индуцируют напряжения этих контуров. Величина напряжения пропорциональна скорости изменения магнитного поля и площади рассматриваемого контура. Конструктору необходимо учесть величину наводимых напряжений и убедиться, что подобные напряжения не превышают допустимый уровень кабельной сети и подключенного оборудования.

На приведенной ниже схеме показан замкнутый контур проводов, проходящий рядом с токопроводящим молниеотводом. Напряжение U будет пропорционально скорости изменения магнитного поля (рисунок G.2).

Проводник, проводящий ток молнии.

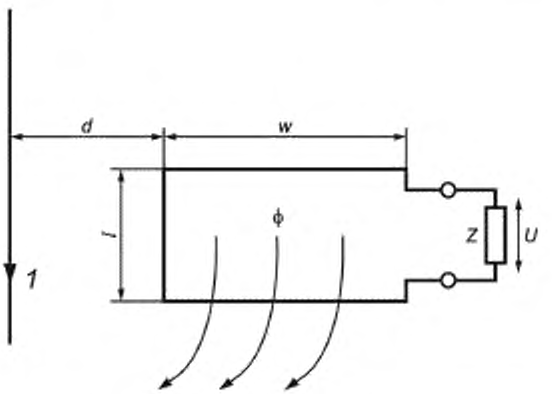


Рисунок G.2 — Механизм магнитного взаимодействия

Это можно представить в виде следующей формулы

$$U = -\frac{d\phi}{dt}, \tag{G.2}$$

где ϕ — поток, проходящий через контур, Вб;

U — напряжение, наведенное в замкнутом контуре, В.

Можно показать, что общий поток, проходящий через контур равен

$$\phi = \frac{\mu_0 l \cdot I}{2\pi}\left[\ln\left(\frac{d+w}{d}\right)\right]. \tag{G.3}$$

Таким образом, напряжение, наведенное в замкнутом контуре равно

$$U = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\ln\left(\frac{d+w}{d}\right)\cdot\frac{di}{dt} = M\cdot\frac{di}{dt}, \tag{G.4}$$

где μ_0 — воздухопроницаемость, другие величины приведены на схеме;

M — коэффициент взаимной индукции между замкнутым контуром токопроводящим молниеотводом, Гц/м.

Когда контуры закрыты, ток, наведенный в контуре равен

$$I = \frac{\int u dt}{L}, \tag{G.5}$$

где L — коэффициент самоиндукции цепи;

u — напряжение открытого контура.

Это напряжение могло бы быть примером перепада напряжения, т.е. напряжения, наведенного между двумя проводами в системе. Для предотвращения наведения напряжения в электропроводке, очевидно, что

уменьшение пикового изменения магнитного поля, проходящего через контур, и уменьшение площади контура снизят наведенные напряжения. Это может быть достигнуто несколькими способами:

- увеличением расстояния между токопроводящим молниеотводом и электрическим контуром: этот способ уменьшения наведенных напряжений был бы эффективным, но, как правило, он не приемлем для ветроэнергетических установок. Однако если предпочитаемый путь тока молнии может быть установлен, например, внутри гондолы, то можно пересмотреть расположение проводки ветроэнергетических установок;
- использование кабеля типа «витая пара»: использование такого кабеля, как уже было отмечено, уменьшит уровень наведенного напряжения. Этого можно достигнуть с помощью 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;
- использование экранирования: хорошо подходит метод прокладки проводки внутри стальных трубок 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 металлизированы. Если только один конец молниеотвода металлизирован, то защита от индуктивной /магнитной связи не возможна.

Экранирование кабелей в большинстве случаев обеспечивает хорошую защиту от электромагнитного импульса от грозовых разрядов. Экран должен быть правильно металлизирован (360° соединение с корпусом оборудования) на обоих концах для предполагаемой работы.

Если кабели длинные или импульсы тока большие, расчеты должны показать, что наведенное напряжение между экраном и проводом будет большим. Если оборудование, соединенное с кабелем, не может выдержать такие высокие импульсы напряжения, экранирование должно совмещаться с УЗП. Это можно сделать в точке между основанием мачты и гондолой.

Ток молнии будет идти в экране экранированного кабеля. Ток будет наводить напряжение между проводами и экраном. Величину такого напряжения можно вычислить по проходному полному напряжению.

Если сигнал в экранированных кабелях слишком чувствителен, может возникнуть необходимость защитить провод с помощью УЗП.

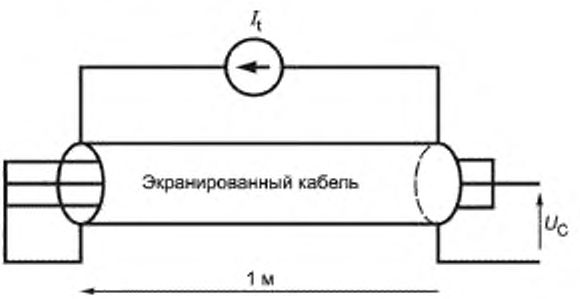


Рисунок G.3 — Измерение проходного полного сопротивления

Проходное полное сопротивление можно измерить, если ток подается на экран, известна длина кабеля и если провод и экран короткозамкнуты на одном из концов кабеля, затем напряжение можно измерить на другом конце кабеля (рисунок G.3).

Примечание — В международной практике для измерения проходного полного сопротивления используется стандарт [45].

При известном испытательном токе I_t и напряжении U_C проходное прямое сопротивление можно рассчитать по формуле

$$Z_T = \frac{U_C}{I_t}. \quad (G.6)$$

Проходное полное сопротивление можно использовать для расчета напряжения между экраном и проводом по формуле

$$U_C = l \cdot I_t \cdot Z_T, \quad (G.7)$$

где U_C — напряжение между проводами и экраном, В;

l — длина кабеля, м;

I_t — ток в экране, А;

Z_T — проходное полное сопротивление, Ом.

Если кабель проложен, перепад напряжения, разделенный между согласующими полными сопротивлениями на двух концах кабеля, таким образом, будет воздействовать на подключенное оборудование. 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 экраном и фазовыми проводниками. Таким соединением с низким полным сопротивлением может быть УЗП для защиты от перенапряжений между фазовыми проводниками и экраном/землей на концах кабеля. Такую ситуацию необходимо рассматривать, например, для силового кабеля, соединяющего ветровую турбину с сетью.

В ГОСТ Р МЭК 62305-2 (приложение D) приводится руководство по оценке тока повреждения для экранированных кабелей (т. е. уровня тока молнии, проходящего в экране кабеля, который приведет к отказу из-за электрического пробоя изоляции кабеля).

Приложение Н
(справочное)

Методы контроля для испытаний на устойчивость на системном уровне

Для испытаний на устойчивость на системном уровне применяются следующие методы:

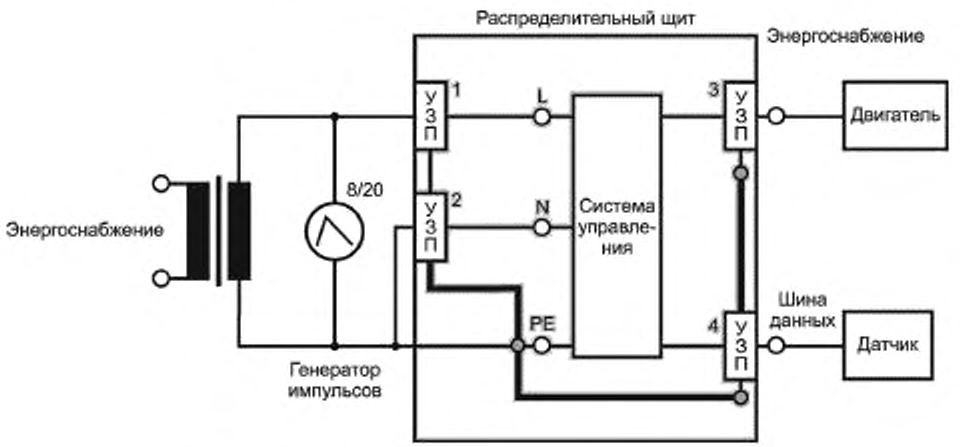
испытание тока разряда УЗП в условиях эксплуатации:

а) до испытания на устойчивость на системном уровне:

- устойчивость оборудования, которое необходимо защищать (определяется согласно ГОСТ Р 51317.4.5);
- защитное действие УЗП необходимо проверить в соответствии с ГОСТ Р 51992;

б) при обычной проверке системы оборудование, которое необходимо защитить, тестируется в условиях эксплуатации, т. е. устройство приводится в действие и подключается к обычному для него напряжению питания и нагружается током разряда установленного УЗП с номинальными параметрами. Там где это применимо, необходимо подключить дополнительные цепи, такие как линии связи, датчики, двигатели;

в) на рисунке И.1 представлен пример цепи испытания тока разряда УЗП в условиях эксплуатации, включая УЗП класса II и систему управления по тангажу ветроэнергетических установок;



УЗП1 + УЗП2 + УЗП3. Устройство защиты от перенапряжений для силовых цепей
УЗП4: Устройство защиты от перенапряжений для телекоммуникаций и сигнальных сетей

Рисунок Н.1 — Пример схемы тока разряда УЗП в условиях эксплуатации

испытания на индукцию из-за тока молнии:

а) импульсные токи необходимо пропустить через определённую металлическую опорную плиту для проверки поведения всей системы в электромагнитном поле, созданном токами молнии;

б) испытываемая система должна быть установлена настолько реалистично, насколько это возможно.

Такая смоделированная установка должна включать отдельное оборудование, все установленные УЗП, реальную длину и тип соединений;

в) необходимо отслеживать импульсные токи, наводимые в результате в кабельной сети всей системы;

г) характеристические и применимые значения первичного тока молнии.

д) На рисунке Н.2 приведен пример цепи испытания на индукцию, вызванную токами молнии, включая УЗП класса II для электроснабжения и УЗП для оборудования контроля системы контроля тангажа ветроэнергетической установки;

рекомендуемая классификация испытаний на устойчивость на системном уровне (см. так же ГОСТ Р 51317.4.5):

а) нормальная работа в пределах, установленных производителем;

б) временная потеря функции или ухудшение рабочих характеристик, которые прекращаются после прекращения нарушения и после которого тестируемое оборудование возвращается к нормальной работе без вмешательства оператора;

в) временная потеря функции или ухудшение рабочих характеристик, исправление которых требует вмешательства оператора;

г) потеря функции или ухудшение рабочих характеристик, которые невозможно восстановить из-за повреждения оборудования, программного обеспечения или потери данных.

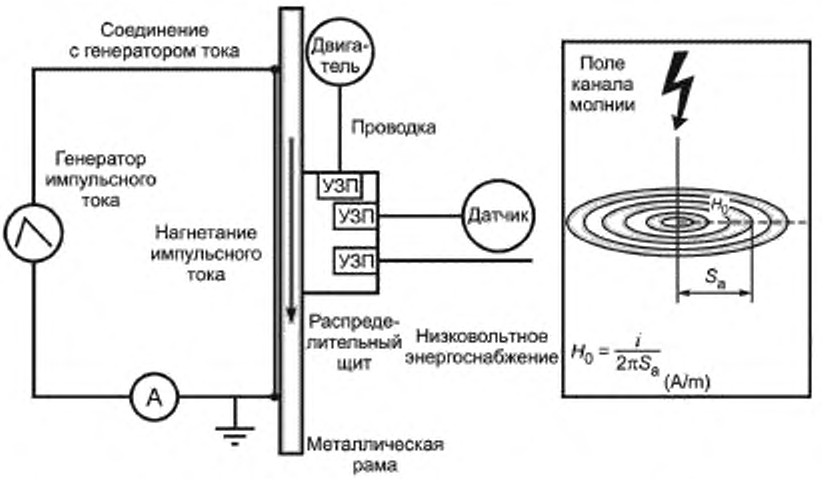


Рисунок Н.2 — Пример цепи испытания на индукцию, вызванную током молнии

Приложение I
(справочное)

Система заземления

I.1 Общие положения

I.1.1 Виды систем заземления

Большие ветроэнергерические установки всегда имеют обширную конструкцию основания, содержащую большое количество стали крупных 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 системы молниезащиты решает установить отдельную систему заземления с заземляющим электродом, по-прежнему необходимо обеспечить надлежащую металлизацию к стальным 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.

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 ветроэлектрической станции).

Установка типа Б: Один или более внешних кольцевых проводника или естественных заземляющих электродов, встроенных в конструкцию. Такой тип установки состоит либо из внешнего кольцевого заземляющего электрода в контакте с почвой на не менее чем 80 % его общей длины, или из заземляющего электрода фундамента.

Для ветроэнергетических установок должна использоваться установка электродов по типу Б.

Примечание — Информация по двум основным типам установки заземляющих электродов приведена в стандарте [1].

I.1.2 Конструкция

I.1.2.1 Заземляющий электрод 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 с учетом поведения металла относительно коррозии в почве. Когда нет указаний для конкретного вида почвы, необходимо выяснить практику применения систем с заделкой заземления на других заводах, 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 земли 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 токопроводящего заполняющего материала для улучшения контакта электрода с землей в траншеях и просверленных отверстиях. При использовании улучшающего заземление материала необходимо учитывать коррозию.

Примечание — В международной практике используют информацию по материалам для заземляющих электродов согласно стандарту [1].

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, соединяющий мачту с металлом основания наиболее коротким путем.

Примечание — В международной практике металлический проводник устанавливается согласно стандарту [1].

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 вести 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, не зависимо от сезона, предпочтительнее использовать вертикальные электроды. Более глубоко залегающие заземляющие электроды могут иметь меньшую разность электрических потенциалов на поверхности земли, что является дополнительным преимуществом и уменьшает скачки напряжения и снижает опасность для живых существ на поверхности земли.

I.1.2.2 Тип Б — кольцевые заземляющие электроды

Для уменьшения условного сопротивления заземления установка заземления по типу Б, при необходимости, может быть улучшена путем добавления вертикальных или радиальных заземляющих электродов. На рисунке I.1 представлены требования по минимальной длине заземляющих электродов.

Изоляционное расстояние и глубина расположения заземляющих электродов по типу Б являются оптимальными при нормальных условиях почвы для защиты людей, находящихся в непосредственной близости от ветроэнергетической установки. В странах с низкими зимними температурами необходимо учесть надлежащую глубину заглубления заземляющих электродов.

В зонах, прилегающих к защищаемой ветроэнергетической установке, в которых часто собирается большое количество людей, необходимо обеспечить расширенный 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.

I.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 механической защиты. Если ветроэнергетическая установка 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 ветроэнергетических установок, либо искусственно увеличить сопротивление поверхностного слоя земли (например, с помощью дополнительного слоя гравия).

I.2 Размеры электрода

I.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. Количество заземляющих электродов должно быть не менее двух.

Минимальная длина каждого электрода на базе каждого вертикального молниеотвода составляет:

- l_1 — для горизонтальных электродов, или
- 0,5 l_1 — для вертикальных (или наклонных) электродов.

где l_1 — это минимальная длина горизонтальных электродов, показанных на рисунке I.1.

Минимальная длина заземляющего электрода (l_1) зависит от уровня молниезащиты (I — IV) и удельного сопротивления почвы.

Для комбинированных (вертикальных или горизонтальных) электродов необходимо учесть общую длину электродов.

Установленная минимальная длинна 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 м или 2,5 м для двух вертикальных электродов.

При удельном сопротивлении земли выше 500 Ом·м минимальная длина (l_1) увеличивается линейно до 80 м при удельном сопротивлении земли равном 3000 Ом·м.

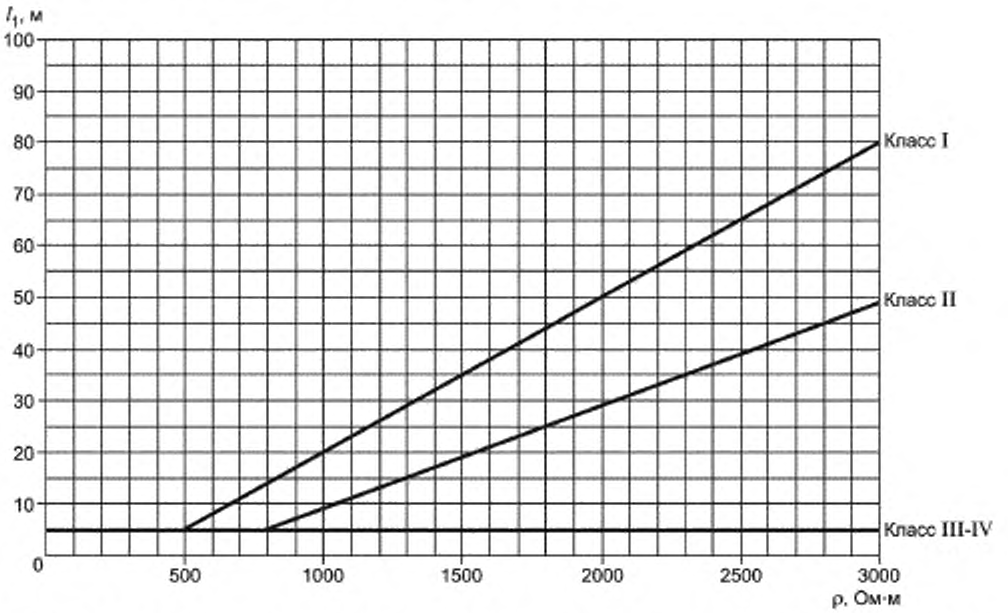


Рисунок I.1 — Минимальная длина l_1 каждого заземляющего электрода в соответствии с классом СМЗ

Из-за высокочастотных компонент тока молнии длина, превышающая 80 м, независимо от удельного сопротивления земли далее не уменьшает полное сопротивление.

Установка типа Б состоит либо из кольцевого проводника вне защищаемой конструкции в контакте с почвой на не менее 80 % от 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

$$r_e \geq l_1. \tag{I.1}$$

Где l_1представлена на рисунке I.1 в соответствии с уровнями СМЗ I — IV. 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):

$$l_r = l_1 - r_e; \tag{I.2}$$

$$l_v = (l_1 - r_e)/2. \tag{I.3}$$

Количество электродов должно быть не менее двух.

Дополнительные электроды следует подсоединить, по возможности, на равноудаленном расстоянии.

Информация об удельном сопротивлении земли, 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.

Примеры

1 На рисунке I.1 для УМЗ–I и ρ = 1500 Ом·м минимальная длина заземляющего электрода l_1 = 35 м.

2 К кольцевому заземляющему электроду с радиусом $r_e = 10$ м необходимо добавить два горизонтальных электрода с собственной длиной $l_s = 35$ м – 10 м = 25 м или два вертикальных электрода $l_v = (35$ м – 10 м$)/2 = 12,5$ м.

I.2.2 Зависимость частоты от полного сопротивление заземления

Измерения системы заземления обычно проводят на низкой частоте, 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.

На рисунке I.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).

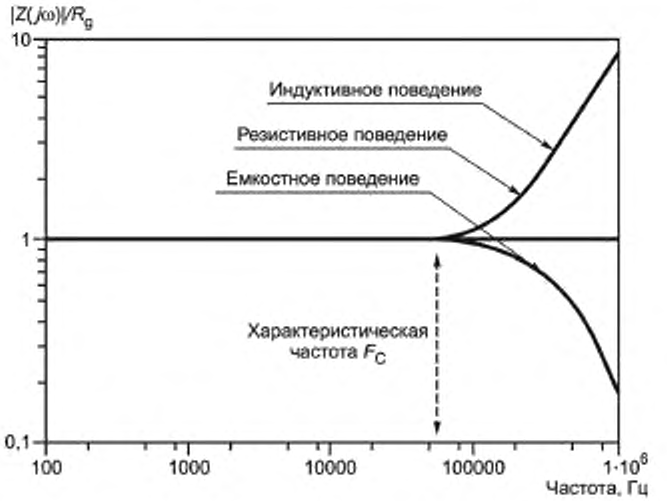
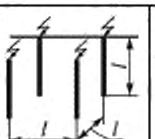
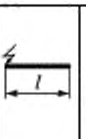
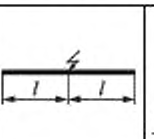
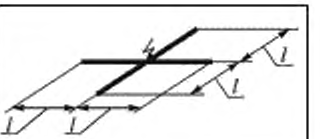


Рисунок I.2 — Зависимость частоты от полного сопротивления заземления

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 установок заземления улучшает импульсную эффективность, как показано в таблице I.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 I.1 — Импульсная эффективность нескольких схем стержневых устройств заземления по сравнению с 12 метровым вертикальным заземляющим стержневым электродом (100 %)

Установка заземляющего стержневого электрода						
Процент	100	95	85	85	80	70

I.3 Формулы для расчета сопротивления заземления для различных конфигураций электродов

Общепринятой практикой при создании большинства систем заземления является использование некоторых видов компьютерного программного обеспечения, так как это позволяет точно проанализировать взаимодействие между многими элементами, обычно используемыми в таких системах. Некоторые такие системы способны рассчитать ответную реакцию системы заземления на переходные токи при ударе молнии. Такие инструменты обычно дают наиболее точные результат. Для случаев, когда такие инструменты не доступны, могут быть использованы приведенные в таблицах I.2 — I.6 формулы для конфигураций и комбинаций простых заземляющих электродов.

Таблица I.2 — Символы, используемые в таблицах I.3 — I.6

ρ, Ом·м	удельное сопротивление земли	a_{12}, м	расстояние между стержнями
n	количество радиальных проводов	d, м	глубина залегания
L, м	длина каждого радиального провода	R, Ом	сопротивление электрода
a, м	радиус радиального провода	D, м	диаметр кольцевого электрода
s, м	расстояние между стержнями	e	2,718
		π	3,1415

Таблица I.3 — Формулы для различных конфигураций заземляющих электродов

Заглубленный прямой горизонтальный электрод $$R = \frac{\rho}{\pi L}\left(\ln\frac{2L}{\sqrt{2ad}} - 1\right), \quad (I.4)$$ при $d<<L$	два стержневых электрода одинаковой длины, разделенные расстоянием a_{12} $$R = \frac{\rho}{4\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a} - 1 + \frac{L}{a_{12}}\right), \quad (I.8)$$ при $a_{12}>> L$
n заглубленных электродов, расходящихся симметрично из общей точки $$R = \frac{\rho}{n\pi L}\left(\ln\frac{2L}{\sqrt{2ad}} - 1 + \sum_{m=1}^{n-1}\ln\frac{1+\sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)}{\sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)}\right). \quad (I.5)$$ Примечание — В приведенных выше формулах предполагается, что угол между любыми двумя смежными электродами одинаков. Так, при $n = 2$ электроды лежат в противоположных направлениях от общей точки, все проводники проводят одинаковый ток.	n заземляющих стержней, равной длины, расположенные на одинаковом расстоянии по кругу диаметром D, меньшим, чем длина стержней $$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{4L}{\sqrt[n]{na\left(\frac{D}{2}\right)^{n-1}}} - 1\right), \quad (I.9)$$ при $D << L$ Примечание — Количество n-числом наземных стержней, соединенных изолированным кабелем.
Вертикальный стержневой электрод $$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a} - 1\right), \quad (I.6)$$ при $L>>a$	n одинаковых заземляющих стержней, установленных на одинаковом расстоянии по кругу диаметром D с интервалом между смежными стержнями, равным или превышающим длину стержня $$R = \frac{\rho}{2n\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a} - 1 + \frac{L}{D}\sum_{m=1}^{n-1}\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)}\right). \quad (I.10)$$
Два стержневых электрода одинаковой длины, находящиеся на расстоянии a_{12} $$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{4L}{\sqrt{aa_{12}}} - 1\right), \quad (I.7)$$ при $a_{12} << L$	заглубленные кольцевые электроды $$R = \frac{\rho}{\pi^2 D}\ln\frac{4D}{\sqrt{2ad}}. \quad (I.11)$$

Таблица I.4 — Формулы для заглубленного кольцевого электрода в сочетании с вертикальными стержнями

Голый заглубленный кольцевой электрод	$R_1 = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{2ad}}$.	(I.12)
n заземляющих стержней равной длины, установленных по кругу диаметром D, с интервалом между соседними стержнями равным или превышающим длину стрежня	$R_2 = \frac{\rho}{2n\pi L}\left(\ln\frac{4L}{a} - 1 + \frac{L}{D}\sum_{m=1}^{n-1}\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)}\right)$.	(I.13)
Взаимное сопротивление заземления между кольцевым электродом и n — числом заземляющих стержней, установленных по кругу диаметром D	$R_3 = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{2\frac{L}{e}d}}$.	(I.14)
Общее сопротивление	$R = \frac{R_1 R_2 - R_3^2}{R_1 + R_2 - 2R_3}$.	(I.15)

Таблица I.5 — Формулы для заглубленного кольцевого электрода в сочетании с радиальными электродами

Голый заглубленный кольцевой электрод	$R_1 = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{2ad}}$.	(I.16)
n заглубленных радиальных электродов, расходящихся горизонтально и симметрично из общей точки	$R_2 = \frac{\rho}{n\pi L}\left(\ln\frac{2L}{\sqrt{2ad}} - 1 + \sum_{m=1}^{n-1}\ln\frac{1+\sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)}{\sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)}\right)$.	(I.17)
Взаимное сопротивление заземлению между кольцевым электродом и n — числом заглубленных радиальных электродов, расходящихся симметрично из общей точки	$R_3 = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{2\frac{L}{e}d}}$.	(I.18)
Общее сопротивление	$R = \frac{R_1 R_2 - R_3^2}{R_1 + R_2 - 2R_3}$.	(I.19)

Таблица I.6 — Формулы для заглубленного прямого горизонтального электрода в сочетании с вертикальными стержнями

Голый заглубленный прямой горизонтальный электрод	$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c}\left(\ln\frac{2L_c}{\sqrt{2ad}} - 1\right)$. при $d << L_c$	(I.20)
Вертикальный стержневой электрод	$R_r = \frac{\rho}{2\pi L_p}\left(\ln\frac{4L_p}{a} - 1\right)$. при $L_p >> a$	(I.21)
n-число вертикальных стержневых электродов, соединенных изолированным кабелем	$R_2 = \frac{R_r}{n} + \frac{\rho}{n\pi s}\sum_{m=2}^{n}\frac{1}{m}$.	(I.22)
Взаимное сопротивление заземления между прямым горизонтальным электродом и n вертикальными стержнями	$R_3 = \frac{\rho}{\pi L_c}\left(\ln\frac{2L_c}{\sqrt{2\frac{L_p}{e}d}} - 1\right)$.	(I.23)
Общее сопротивление	$R = \frac{R_1 R_2 - R_3^2}{R_1 + R_2 - 2R_3}$.	(I.24)

Приложение J
(справочное)

Пример определения точек измерения

Пример определения точек измерения приведен на рисунке J.1.

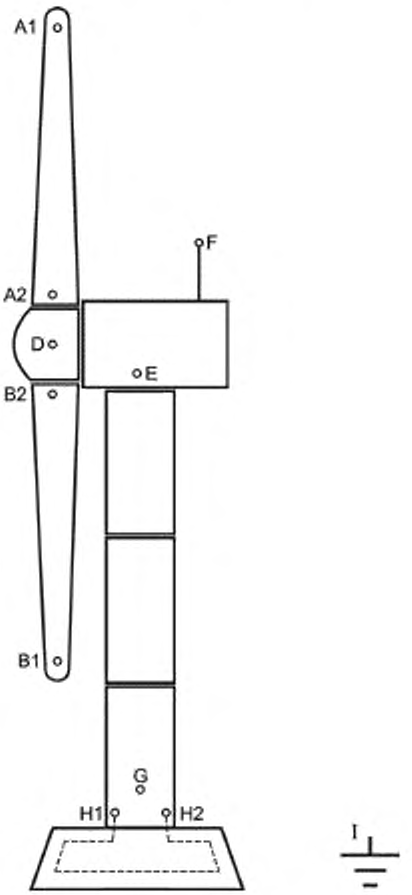


Рисунок J.1 — Пример точек измерения

Следуя данному примеру можно провести следующие измерения (см. таблицу J.1):

Таблица J.1 — Точки измерения и сопротивления, которые необходимо зарегистрировать

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 ротора	
B2	Вертикальный молниеотвод на комлевой части лопасти A	D	Корпус ступицы ротора	
D	Шасси ступицы ротора	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 мачты	
H1	Заземление 1 на электроде фундамента	H2	Заземление 2 на электроде фундамента	
G	Шина заземления в нижней части мачты	I	Удаленное заземление	

Приложение К
(справочное)

Типичные вопросы о повреждении молнией

К.1 Производитель ветроэнергетической установки: .....
Оператор ветроэнергетической установки: .....
К.2 Тип ветроэнергетической установки (общие положения описание): .....
К.3 Особые данные по ветроэнергетической установке:
- Мощность, кВт;
- Высота ступицы, м;
- Диаметр ротора, м;
- Дата установки;
- Другие комментарии.

К.4 Местонахождение ветроэнергетической установки:
- Точное положение (например, координаты GPS):
- Отдельная ветроэнергетическая установка;
- Ветроэнергетическая установка на ветровой ферме с количеством ветроэнергетических установок;
- Береговая зона;
- Вблизи береговой зоны;
- В море;
- На суше;
- Возвышение (выше уровня моря), м;
- Другие комментарии.

К.5 Погодные условия:
- Грозовые дни;
- Ветер, м/с;
-Температура, °С;
- Другое;
- Дождь (интенсивность, если известно);
- Другие комментарии.

К.6 Время происшествия:
- Дата;
- Время;
- Приблизительная точность времени;
- Другие комментарии.

К.7 Предполагаемая(-ые) точка(-и) попадания молнии:
- Лопасти;
- Гондола;
- Метеорологическое оборудование;
- Мачта;
- Молниеотвод гондолы;
- Другое;
- Другие комментарии.

К.8 Поврежденные элементы:
- Ступица;
- Ротор;
- Подшипник главного вала;
- Подшипник для наклона;
- Подшипник угла рыскания;
- Подшипник генератора;
- Подшипник передаточного вала;
- Редукторы;
- Генератор;
- Система управления;
- Система SCADA;
- Система энергоснабжения;
- Другое;
- Другие комментарии.

К.9 Последствия повреждения молнией:
- Потери производственного времени, ч;
- Ремонтные расходы (валюта государства);
- Стоимость не произведенной из-за повреждения электроэнергии (валюта государства);
- Другие комментарии.

К.10 Элементы системы молниезащиты турбины (кроме лопастей)
- Отсутствуют;
- Кольцевой заземляющий электрод;
- Заземляющий электрод фундамента;
- Молниезащитная система (вид/местонахождение);
- Вертикальный молниеотвод (вид/местонахождение);

Перенапряжения/защита от перенапряжения:
- Отсутствует;
- Входящее соединение с сетью;
- Генератор;
- Внешние линии данных;
- Внутренние линии управления;
- Телефонные линии;
- Другие комментарии.

К.11 Лопасти и молниезащита лопастей:
- Производитель лопастей;
- Тип лопасти (наклонные/с регулированием срыва потока) ;
- Одна лопасть;
- Две лопасти;
- Три лопасти;
- Другое;
- Оснащены концевыми тормозами.

Движение ротора за цикл:
- В состоянии покоя;
- Вращается;
- Неизвестно.

Материал лопасти ротора:
- Стеклопластик;
- Углепластик;
- Стеклопластик/углепластик;
- Деревянный слоистый материал;
- Плотная древесина;
- Другое.

Примечание — Стеклопластик — армированный пластик из стекловолокна. Углепластик — армированный пластик из углеродного волокна.

Вид молниезащиты:
- Приемник на конце (материал):
- Наконечник (материал):
- Молниезащита отсутствует;
- Другое.

Вертикальный молниеотвод лопасти
- Внешний;
- Внутренний;
- Площадь поперечного сечения, мм;
- Материал;
- Другие комментарии.

Полученные повреждения:
- Лопасть не повреждена;
- Отверстие в лопасти (диаметр), мм;
- Трещина на поверхности лопасти (длина);
- Трещина на кромке лопасти (длина);
- Другое;
- Другие комментарии.

Отметка мест, в которых зафиксированы повреждения на лопасти (рисунок К.1):

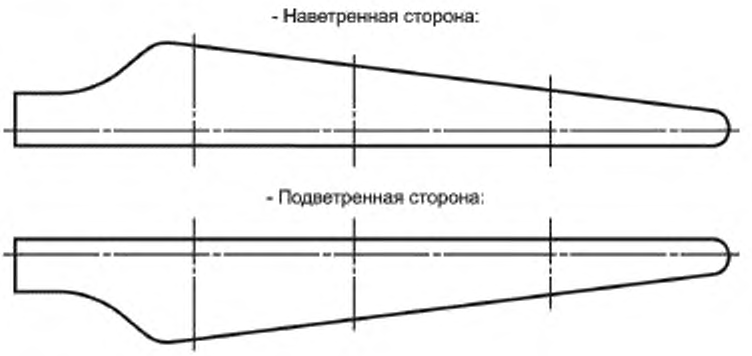


Рисунок К.1 — Контур лопасти для отметки мест повреждения

Приложение L
(справочное)

Системы мониторинга

Ветроэнергетические установки рекомендуется оснастить оборудованием для обнаружения ударов молнии/мониторинга уровней тока таких ударов молнии (системами мониторинга). Назначение таких систем заключается в:

- предоставлении оператору информации об уровне ударов молнии, воздействующих на ветровую турбину, и участии в режимах эксплуатации и техобслуживания;
- предоставлении важных данных об ожидаемом количестве ударов молнии в высокие ветроэнергетические установки и оценке их величины/характеристик, содействие в процессе оценки будущих рисков.

Существуют различные варианты систем мониторинга. Ниже приведено краткое описание таких систем.

а) Система обнаружения молнии на обширном пространстве.

Многие коммерческие системы позволяют обнаружить молнию с помощью антенн поиска электромагнитного импульса, производимого вспышкой молнии, которые определяют места вспышки молнии на основе методик определения направления или времени прихода. Данные, предоставляемые такими системами, в основном доступны в режиме реального времени. Выходные данные обычно не позволяют точно определить местоположение вспышки молнии, так как точность таких систем может ограничиваться несколькими сотнями метров или несколькими километрами (точность зависит от относительного положения вспышки молнии по отношению к антенне и ее величины). Подобная система, таким образом, реально используется только для определения повреждения полученного из-за молнии.

б) Локальные системы активного обнаружения молнии.

На мачте ветроэнергетической установки устанавливают специальные системы, например, с датчиками, предупреждающие об опасности молнии исходя из критериев магнитного поля. Антенны предотвращают ошибочные срабатывания, когда вспышка молнии находится 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 величине, и если система размещена на мачте, она не предоставит информацию о месте удара молнии в ветроэнергетическую установку. Однако такие системы полезны для упреждающих действий оператора во время мониторинга ветроэнергетических установок после грозы.

Кроме того, созданы датчики, позволяющие установить преобразователи тока непосредственно на лопасти или на другие вертикальные молниеотводы. Такие датчики могут выполнять предупреждающую функцию, а также собирать важные данные о пиковом значении тока/ форме кривой для оценки будущих рисков.

в) Локальные системы пассивного обнаружения молнии.

Карточки с чувствительными датчиками пикового значения тока (PCS — ДПЗ) имеют магнитные полоски с заранее установленной диаграммой направленности по напряженности поля. Они зафиксированы на вертикальном молниеотводе, и при прохождении тока через провод встроенная диаграмма частично стирается магнитным полем тока. Чем выше ток молнии, тем выше магнитное поле вокруг вертикального молниеотвода, и тем большая часть встроенной диаграммы по направлению напряженности поля будет стерта/искажена. Такие виды систем обычно заявляют о диапазоне обнаружения от 3 до 120 кА с результатами, отклоняющимися от точных не более чем на (±2) кА. Карточки фиксируют только пиковые значения тока и могут хранить только одну такую запись. Таким образом, при множестве ударов молнии сохраняется только самое высокое пиковое значение из всех ударов. В таких системах нет привязок ко времени.

Приложение М
(справочное)

Руководство для малых ветроэнергетических установок. Микровыработка

Настоящий стандарт разработан для применения к ветроэнергетическим установкам промышленного масштаба. Их можно охарактеризовать конкретными параметрами: объем производства электроэнергии более 100 кВт, установлены на мачтах высотой более 30 м, имеют гондолу, в которой размещен генератор, системы управления и преобразования, а также лопасти с длиной более 10 м.

Все ниже приведенные значения относятся к классу ветроэнергетических установок для выработки малой мощности. Обычно они предназначаются для домашнего или мелкопромышленного производства, когда электроэнергия в основном предназначена для использования на месте. Хотя такие ветроэнергетические установки могут экспортировать избыточную мощность в местную электросеть, но электроэнергию в них производится только на уровне низких вольт, а не мегавольт, как у ветроэнергетических установок промышленного масштаба.

Окружающие условия этих двух ветровых генераторов различных видов очень отличаются, а следовательно, и требования по молниезащите также различаются.

Для ветроэнергетических установок малой мощности также необходимо учитывать проблему молниезащиты. Чтобы такие системы смогли продолжать работу после воздействия высокого переходного напряжения и токов, связанных с короткими одиночными импульсами грозовых разрядов, исходящих из ветроэнергетических установок, необходимо обеспечить защиту от переходного напряжения соединения с внешней сетью и соединений систем управления и связи (если таковые имеются). Прямые удары молнии в маломощную систему будут относительно редкими, если только они не размещены на высокой открытой местности и не защищены. 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 ветроэнергетическая установка.

И хотя настоящий стандарт не распространяется на молниезащиту ветроэнергетических установок малой мощности, некоторые основные принципы и подходы могут способствовать недопущению упомянутых выше рисков.

Прямые испытания с использованием высоких напряжений и тока могут быть использованы при проектировании системы молниезащиты (см. приложение Г, касающееся методов испытаний). Могут быть испытаны такие элементы, как лопасти, анемометры и корпус генератора; электрическая схема и система управления могут быть испытаны на сопротивление воздействию скачков переходного тока. Окончательное решение по молниезащите может объединять в себе молниевый стержень, простирающийся выше ротора и эквипотенциальную электрическую металлизацию, а также некое устройство защиты от перенапряжений (УЗП), эффективность которого также должна быть подтверждена испытаниям.

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 Р 51992—2011 (МЭК 61643-1:2005)	MOD	МЭК 61643-1:2005 «Низковольтные устройства защиты от перенапряжений — Часть 1: Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к низковольтным системам энергораспределения — Требования и испытания»
ГОСТ Р МЭК 61643-12—2011	IDT	МЭК 61643-12:2002 «Низковольтные устройства защиты от перенапряжений — Часть 12: Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к низковольтным системам энергораспределения — Принципы отбора и использования»
ГОСТ Р 54986—2012 (МЭК 61643-21:2009)	MOD	МЭК 61643-21:2009 «Низковольтные устройства защиты от перенапряжений — Часть 21: Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к системам связи и сигнализационным сетям — Эксплуатационные требования и методы испытаний»
ГОСТ Р 51317.4.5—99 (МЭК 61000-4-5—95)	MOD	МЭК 61000-4-5:1995 «Электромагнитная совместимость (ЭМС) — Часть 4-5: Методики испытаний и измерений — испытание на волновое сопротивление»
ГОСТ Р МЭК 60664.1—2012	IDT	МЭК 60664-1:2007 «Выбор изоляции для оборудования внутри низковольтных систем — Часть 1: Принципы, требования и испытания»
ГОСТ Р 50571-4-44—2011 (МЭК 60364-4-44:2007)	MOD	МЭК 60364-4-44:2007 «Низковольтные электрические установки — Часть 4-44: Защита для безопасности — Защита от резких отклонений напряжения и электромагнитных возмущений»
ГОСТ Р 50532—93 (МЭК 212—71)	MOD	МЭК 60243-1:1971 «Электрическая прочность изоляционных материалов — Методы испытаний — Часть 1: Испытания на промышленных частотах»
ГОСТ 13526—79 (МЭК 464-2—74, МЭК 699—81)	NEQ	МЭК 60464-2:1974 «Лаки, используемые для электроизоляции — Часть 2: Методы испытаний»
ГОСТ Р МЭК 60204-1—2007	IDT	МЭК 60204-1:2005 «Безопасность оборудования — Электрическое оборудование установок — Часть 1: Общие требования»

Окончание таблицы ДА.1

Обозначение ссылочного национального, межгосударственного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование ссылочного международного стандарта
ГОСТ Р 52725—2007	NEQ	МЭК 60099-4:2004 «Грозозащитные разрядники — Часть 4: Металлооксидные грозозащитные разрядники без зазоров для систем переменного тока»
ГОСТ Р 53735.5—2009 (МЭК 60099-5:2000)	MOD	МЭК 60099-5:2000 «Грозозащитные разрядники — Часть 5: Рекомендации по выбору и применению»

Примечание — В настоящей таблице использованы следующие условные обозначения степени соответствия стандартов:

- IDT — идентичные стандарты;
- MOD — модифицированные стандарты;
- NEQ — неэквивалентные стандарты.

Библиография

[1] МЭК 62305-3:2006 Часть 3. Физическое повреждение конструкций и опасность для человека

[2] МЭК/ТУ 61400-23 Генераторные системы ветроэнергетических установок. Часть 23. Испытание конструкции лопастей ротора

[3] EN 50164-1 Lightning Protection Components (LPC). Part 1. Requirements for connection components

[4] МЭК 60060-1 Методы испытаний высоким напряжением. Часть 1. Общие определения и требования к испытаниям

[5] МЭК 60243-3 Электрическая прочность твердых изоляционных материалов. Методы испытаний. Часть 3. Дополнительные требования для импульсных испытаний с длительностью импульса 1,2/50 мкс

[6] МЭК 60587 Электроизоляционные материалы, используемые для жестких условий окружающей среды. Методы испытаний для оценки сопротивления действию блуждающего тока и эрозионной стойкости

[7] МЭК 62305-4:2006 Защита от молнии. Часть 4. Электрические и электронные системы внутри конструкций

[8] МЭК/ТТ 61000-5-2 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 5. Руководство по установке и уменьшению воздействия на окружающую среду. Раздел 2. Заземление и кабельная сеть

[9] МЭК 60364-5-53:2001 Электрические установки зданий. Часть 5-53. Выбор и установка электрооборудования. Изоляция, коммутационная аппаратура и механизмы управления

[10] МЭК 61643-22 Низковольтные устройства защиты от перенапряжений. Часть 22. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к системам связи и сигнализационным сетям. Принципы отбора и использования

[11] МЭК 60071 (все части) Выбор изоляции

[12] МЭК 60204-11 Электрооборудование промышленных машин. Безопасность. Часть 11. Требования к высоковольтному оборудованию, работающему при напряжениях свыше 1000 В переменного тока или 1500 В постоянного тока и не выше 36 кВ

[13] МЭК 60071-2:1996 Выбор изоляции. Часть 2. Руководство по применению

[14] МЭК 60479-4 Влияние электрического тока на человека и скот. Часть 4. Влияние ударов молнии на человека и скот.

[15] МЭК 60587 Электроизоляционные материалы, используемые для жестких условий окружающей среды. Методы испытаний для оценки сопротивления действию блуждающего тока и эрозионной стойкости.

[16] РАКОВ В.А., УМАН М.А. Физика и воздействия молнии. Издательство Кембриджского университета, 2003, ISBN 0 521 58327

[17] БЕРГЕР К., АНДЕРСОН Р.Б. и КРОНИНГЕР Х. Параметры вспышек молнии. Electra, том 80, стр. 23—37, 1975 г.

[18] АНДЕРСОН Р.Б. и ЭРИКССОН А. ДЖ. Параметры молнии для технического применения. Electra, том 69, стр. 65—103, 1980 г.

[19] ВАДА А., ЙОКОЯМА С., НУМАТА Т., ИСИБАСИ Й., ХИРОСЕ Т. Повреждения молнией лопастей ветроэнергетических установок в зимнее время в Японии — наблюдение за молнией на ветровой ферме Никахо-Коген, материалы 27 международной конференции по молниезащите, г. Авиньон, Франция стр. 947—952, 2004 г.

[20] ЦУТИЯ К., ЯМАДА С., и МАЦУДЗАКА Т. Изучение повреждения молнией **WECs** (преобразователь ветровой энергии) искусственными ударами молнии. Энергия ветра: Технология и внедрение, стр. 737—741. Amsterdam EWEC '91. Издательство Elsevier Science Publ., 1991.

[21] ФИШЕР Ф.А., ПЛАМЕР Дж. А. и Перала Р.А. Молниезащита самолета. Второе издание Издательство Lightning Technologies Inc., г. Питсфилд, шт. Миннесота, США, 2004 г.

[22] ГЕВЕР Х.В. Молниезащита композиционных лопастей ротора. Американская ассоциация ветровой энергии. Национальная конференция Питтсбург, шт. Пенсильвания, США, 8—11 июня 1980 г.

[23] ДАЛЕН ДЖ. Молниезащита больших лопастей ротора, проектирование и опыт. Международное энергетическое агентство (IEA), ветряные исследования и разработки, приложение XI, 26-я встреча экспертов. Молниезащита генераторных систем ветроэнергетических установок и проблемы электромагнитной совместимости в объединенных системах управления. Кельн Монзесе, Милан, Италия, 8—9 марта 1994 г.

[24] ДОДД С.В., МАККАЛЛА Т. мл. и СМИТ Дж. Дж. Как защитить ветровую турбину от молнии. Windbooks. А/я 4008, г. Сент Джосбэри, шт. Вермонт, США. ISBN:0-88016-072-1

[25] ОДД С.В., МАККАЛЛА Т.М. мл. и СМИТ Дж. Дж. Рассмотрение конструкций для молниезащиты ветроэнергетических установок, 6 двухгодичная конференция и симпозиум по ветровой энергии, стр. 687—695. Американское общество солнечной энергии, 1983 г.

[26] ШМИД Р. Исследование образцов лопастей ротора из армированного стеклопластика ветровых электростанций с точки зрения молниезащиты. 24 международная конференция по молниезащите, стр. 955—959, г. Бирмингем, Соединенное Королевство, 14—18 сентября 1998 г.

[27] НИЛЬСЕН Й.О. и ПЕДЕРСЕН А.А. Отчет о состоянии работ для аванпроекта: Молниезащита ветроэнергетических установок — в особенности непроводящих лопастей ветроэнергетических установок. Политехнический институт Дании, декабрь 1994 г. (на датском языке)

[28] ДРУММ Ф. Исследование сегментированных полос молниеотвода. 23 международная конференция ICLP по молниезащите, стр. 796–800, г. Флоренция, Италия, 23—27 сентября 1996 г.

[29] ДРУММ Ф. и БАУМЛ Дж. Координация изоляции сегментированных полос молниеотвода и их допустимая токовая нагрузка. 24 международная конференция по молниезащите, стр. 918—923, г. Бирмингем, Соединенное Королевство, 14—18 сентября 1998 г.

[30] ХАНСЕН Нл.Б., КОРМСГААРД Дж. и МОРТЕНСЕН И. Улучшенная система молниезащиты, увеличивающая надежность мульти-MB лопастей. Копенгагенский береговой ветер, 2005 г.

[31] СОРЕНСЕН Т., БРАСК М.Х., ОЛСЕН К., ОЛСЕН М.Л. и ГРАБАУ П. 24 международная конференция по молниезащите, стр. 938—943, Бирмингем, Соединенное Королевство, 14—18 сентября 1998 г.

[32] МЕДСЕН С.Ф. Взаимодействие между электрическими разрядами и материалами для лопастей ветроэнергетических установок, в частности, относительно молниезащиты. Политехнический университет Дании, докторская диссертация, март 2006 г.

[33] ЛАРСЕН Ф.М. и СОРЕНСЕН Т. Новый порядок проведения квалификационных испытаний на удары молнии для больших лопастей ветроэнергетических установок. Материалы международной конференции по молнии и статическому электричеству, г. Блэкпул, Соединенное королевство, 2003 г.

[34] Фундаментальное рассмотрение молниезащиты, заземления, металлизации и экранирования, Федеральное авиационное управление (FAA), 6950.20, 1978 г.

[35] ГОНДОТ П., ЛЕПЕТИТ В., БИСИАЕВ А. и СОЛОЛЕВСКАЯ Н. Молниезащита авиационных конструкционных материалов. 23 международная конференция ICLP по молниезащите, стр. 563—568, г. Флоренция, Италия, 23—27 сентября 1996 г.

[36] МУЛЯДИ Е. и БАТТЕРФИЕЛД С.П. Молния и воздействие на генератор ветроэнергетических установок. Международное энергетическое агентство (IEA), ветряные исследования и разработки, приложение XI, 26 встреча экспертов. Молниезащита генераторных систем ветроэнергетических установок и проблемы электромагнитной совместимости в объединенных системах управления. Кельн Монзесе, Милан, Италия, 8—9 марта 1994 г.

[37] ВАШМУТ Р. Rotorblatt in Faserverbundbauweise fur Windkraftanlage AEOLUS II, Phase I/II, Statusbericht fur das Jahr 1990 zum Forschungsvorhaben 0328819 A/B des Bundesministeriums fur Forschung und Technologie. Отчет о состоянии работ 1990 г. Ветровая энергия, стр. 279—297, Федеральное министерство по исследованиям и технологии (Германия). 1990 г., ISBN 3-8042-0517-8

[38] БАЛДВИН Р.Е. Опыт по молниезащите самолетов и нефтехимических установок, применимый к генераторам ветроэнергетических установок. Международное энергетическое агентство (IEA), ветряные исследования и разработки, приложение XI, 26 встреча экспертов. Молниезащита генераторных систем ветроэнергетических установок и проблемы электромагнитной совместимости в объединенных системах управления. Кельн Монзесе, Милан, Италия, 8—9 марта 1994 г.

[39] ЛЕННИНГ Ф.Е. Анализ прохождения тока молнии в анизотропном углепластике с использованием метода конечной разности, материалы международной конференции по молнии и статическому электричеству, г. Блэкпул, Соединенное Королевство, 2003 г.

[40] КОТТОН И., ДЖЕНКИНС Н., ХАТЦИАРГИРИУ Н., ЛОРЕНЦОУ М., ХЕЙ С. и ХЕНКОК М. Молниезащита ветроэнергетических установок — Руководство для проектировщиков по лучшим методам организации производства. Университет Манчестерского института науки и техники (UMIST) — Предварительное издание — январь 1999 г.

[41] БЕССЕРА М., В. КУРЕЙ Упрощенная физическая модель для определения восходящей молнии, соединяющей начало соединительного лидера, Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE), Журналы по передаче энергии, том 21, № 2, апрель 2006 г.

[42] БЕРТЕЛСЕН К., ЭРИХСЕН Н.В., СКОВ ЙЕНЕСЕН, М.Р.В., МЭДСЕН С.Ф. Применение численных моделей для определения точек попадания молнии в ветроэнергерические установки, материалы международной конференции по молнии и статическому электричеству, г. Париж, Франция, август 2007 г.

[43] МЕДСЕН С.Ф., ХОЛБОЛЛ Дж., ХЕНРИКСЕН М., БЕРТЕЛСЕН К., ЭРИХСЕН Н.В. Новый метод испытаний для оценки системы молниезащиты лопастей ветроэнергетических установок, материалы 28 международной конференции по молниезащите, г. Канандзава, Япония 18—22 сентября 2006 г.

[44] ХИТЕР Дж., РУИ Р. Сопоставление конфигурации электродов для моделирования повреждений, нанесенных ударом молнии, материалы международной конференции по молнии и статическому электричеству, г. Блэкпул, Соединенное Королевство, сентябрь 2003 г.

[45] МЭК 62153-4-3 Методы испытаний металлических кабелей связи. Часть 4-3. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Поверхностное проходное полное сопротивление. Трехкоординатный метод.

УДК 621.311.24/534.6:006.354 ОКС 27.180

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, ветроэнергетика, установки ветроэнергетические, молниезащита, зона молниезащиты, грозовые разряды, удар молнии, вспышка молнии, заземление, уровень молниезащиты

Редактор *Е. А. Черепко*
Технический редактор *В. Н. Прусакова*
Корректор *В. Г. Гришунина*
Компьютерная верстка *Т. Ф. Кузнецовой*

Сдано в набор 17.11.2014. Подписано в печать 20.01.2015. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Ариал. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,42. Уч.-изд. л. 13,26. Тираж 36 экз. Зак. 1969.

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
gost.e-ecolog.ru
Набрано и отпечатано в Калужской типографии стандартов, 248021 Калуга, ул. Московская, 256.

gost.e-ecolog.ru