ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 54418.1— 2023 (МЭК 61400-1:2019)

Ветроэнергетика

УСТАНОВКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ

Часть 1

Технические требования

(IEC 61400-1:2019, Wind energy generation systems — Part 1: Design requirements, MOD)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2024

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

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

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 016 «Электроэнергетика»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 декабря 2023 г. № 1768-ст

4 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к международному стандарту МЭК 61400-1:2019 «Системы ветроэнергетические. Часть 1. Требования к проектированию» (IEC 61400-1:2019 «Wind energy generation systems — Part 1: Design requirements», MOD) путем изменения отдельных фраз (слов, значений показателей, ссылок), которые выделены в тексте курсивом, а также путем изменения его структуры для приведения в соответствие с правилами, установленными в ГОСТ 1.5 (подразделы 4.2 и 4.3).

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

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

Требования к выбору ВЭУ по условиям соответствия площадке размещения приведены в дополнительном приложении ДА.

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

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

5 ВЗАМЕН ГОСТ Р 54418.1—2012 (МЭК 61400-1:2005)

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

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

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

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 3
4 Обозначения и сокращения 9
4.1 Обозначения 9
4.2 Сокращения 12
5 Основные положения 13
5.1 Методы проектирования 13
5.2 Безопасность ветроэнергетических установок 13
5.3 Обеспечение качества 13
5.4 Маркировка 14
6 Факторы внешней среды 14
6.1 Общие требования 14
6.2 Классы безопасности ветроэнергетических установок 15
6.3 Режимы ветра 16
6.4 Прочие факторы окружающей среды 23
6.5 Влияние сети подключения 24
7 Проектирование конструкции 24
7.1 Общие требования 24
7.2 Методология проектирования 25
7.3 Нагрузки, учитываемые в расчетах 25
7.4 Проектные ситуации и расчетные случаи нагружения 26
7.5 Расчет нагрузок 34
7.6 Расчет предельной прочности 35
8 Система управления 41
8.1 Общие положения 41
8.2 Функции управления 42
8.3 Функции защиты 42
8.4 Анализ отказов системы управления 43
8.5 Ручное управление 44
8.6 Функция кнопки аварийного останова 44
8.7 Ручное, автоматическое и дистанционное повторное включение 44
8.8 Система торможения 45
9 Механические системы 45
9.1 Общие требования 45
9.2 Ошибки при сборке 46
9.3 Гидравлические или пневматические системы 46
9.4 Главный мультипликатор 46
9.5 Система установки на ветер 46
9.6 Система управления лопастями 47
9.7 Аварийные тормоза 47
9.8 Подшипники качения 47
10 Электрическая система 48
10.1 Общие требования 48

10.2 Общие технические требования к электрической системе 48
10.3 Условия среды внутри ветроэнергетических установок 49
10.4 Защитные устройства 50
10.5 Разъединительные устройства 50
10.6 Система заземления 50
10.7 Молниезащита 51
10.8 Проводка 51
10.9 Самовозбуждение 51
10.10 Защита от электромагнитных импульсных воздействий молнии 51
10.11 Качество электроэнергии 51
10.12 Электромагнитная совместимость 52
10.13 Электронные системы и устройства преобразования энергии 52
10.14 Петли проводки 52
10.15 Токосъемные кольца 52
10.16 Проводники и другие компоненты для передачи электроэнергии, расположенные вертикально 53
10.17 Электроприводы и двигатели-преобразователи 53
10.18 Электрические машины 53
10.19 Силовые трансформаторы 54
10.20 Низковольтные комплектные устройства распределения и управления 54
10.21 Высоковольтные комплектные распределительные устройства 54
10.22 Ступицы 54
11 Сборка, монтаж и установка 55
11.1 Общие требования 55
11.2 Планирование работ 55
11.3 Доставка на площадку 56
11.4 Параметры окружающей среды 56
11.5 Документация 56
11.6 Перемещение, погрузка, разгрузка и хранение 56
11.7 Фундамент/распорные системы 57
11.8 Сборка и монтаж 57
11.9 Крепежные соединения 57
11.10 Краны, лебедки и подъемное оборудование 57
12 Ввод в эксплуатацию, эксплуатация и техническое обслуживание 57
12.1 Общие требования 57
12.2 Общие требования для осуществления безопасности эксплуатации, проведения осмотров и технического обслуживания 58
12.3 Инструкции по вводу в эксплуатацию 58
12.4 Руководство по эксплуатации 59
12.5 Руководство по техническому обслуживанию 61
13 Дополнительные требования к ветроэнергетическим установкам, предназначенным для эксплуатации в зонах с холодным климатом 61
13.1 Общие требования 61
13.2 Условия обледенения и условия низких температур 61
13.3 Факторы внешней среды холодного климата 62
13.4 Проектирование конструкции 62

13.5 Расчетные случаи и варианты нагружения 62
13.6 Системы управления 63
13.7 Механические системы 63
13.8 Электрические системы 64
Приложение А (обязательное) Проектные данные для создания ветроэнергетических установок специального класса безопасности (класса S) 65
Приложение В (справочное) Расчетные нагрузки и оценка площадки для размещения ветроэнергетических установок специального класса безопасности (класса S) 67
Приложение С (справочное) Применение моделей турбулентности 71
Приложение D (справочное) Учет возможного обледенения конструкций при проектировании ветроэнергетических установок 75
Приложение Е (справочное) Расчет сейсмических нагрузок 80
Приложение F (справочное) Статистическая экстраполяция нагрузок для расчета предельной прочности 83
Приложение G (справочное) Одновременно действующие нагрузки 90
Приложение Н (справочное) Определение частных коэффициентов безопасности материалов и расчет прочности на основе результатов испытаний 92
Приложение I (справочное) Расчет на усталость по правилу Майнера с экстраполяцией нагрузки . 102
Приложение J (справочное) Прогнозирование экстремальной скорости ветра с помощью метода Монте-Карло 106
Приложение К (справочное) Оценка влияния аэродинамического затенения и турбулентности на площадках ветроэнергетических станций 109
Приложение L (справочное) Прогнозирование распределения ветра для площадок размещения ветроэнергетических установок на основе методов типа «измерение–сопоставление–прогноз» 114
Приложение М (справочное) Ветроэнергетические установки средней мощности 115
Приложение ДА (справочное) Выбор ветроэнергетических установок по условиям соответствия площадке размещения 117
Приложение ДБ (справочное) Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте 126
Приложение ДВ (справочное) Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного стандарта 128
Библиография 133

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Ветроэнергетика

УСТАНОВКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ

Часть 1

Технические требования

Wind power engineering. Wind turbines. Part 1. Technical requirements

Дата введения — 2024—02—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на ветроэнергетические установки (ВЭУ) и устанавливает технические требования к таким ВЭУ.

Стандарт также применим для ветроэнергетических станций (ВЭС) в части выбора, размещения, ввода в эксплуатацию, эксплуатации и обслуживания ВЭУ.

Настоящий стандарт распространяется на все подсистемы ВЭУ, в том числе на устройства управления и защиты, внутренние электрические подсистемы, механические подсистемы и несущие конструкции.

ВЭУ малой мощности должны отвечать требованиям настоящего стандарта в части, не противоречащей *ГОСТ Р 54418.2*. ВЭУ морского базирования также должны отвечать соответствующим дополнительным требованиям (см. *[1]*).

Настоящий стандарт устанавливает требования, обеспечивающие безопасность конструкции, механических, электрических систем и систем управления ВЭУ. Требования настоящего стандарта распространяются на разработку, изготовление, установку, эксплуатацию и техническое обслуживание ВЭУ, а также другие этапы жизненного цикла ВЭУ.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие документы:

ГОСТ 2.102 Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов

ГОСТ 12.2.003 Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности

ГОСТ 12.2.007.0 Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности

ГОСТ 12.3.002 Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные. Общие требования безопасности

ГОСТ 12.3.009 Система стандартов безопасности труда. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности

ГОСТ 14254 (IEC 60529:2013) Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP)

ГОСТ 15846 Продукция, отправляемая в районы Крайнего Севера и приравненные к ним местности. Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение

ГОСТ 18854 (ISO 76:2006) Подшипники качения. Статическая грузоподъемность

Издание официальное

ГОСТ 18855 (ISO 281:2007) Подшипники качения. Динамическая грузоподъемность и номинальный ресурс

ГОСТ 21354—87 Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность

ГОСТ 26653 Подготовка генеральных грузов к транспортированию. Общие требования

ГОСТ 27751 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения

ГОСТ 29322 (IEC 60038:2009) Напряжения стандартные

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

ГОСТ 32144 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения

ГОСТ IEC 60034-1 Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики

ГОСТ IEC 60664-3 Координация изоляции для оборудования низковольтных систем. Часть 3. Использование покрытий, герметизации и формовки для защиты от загрязнения

ГОСТ IEC 61439-1 Устройства комплектные низковольтные распределения и управления. Часть 1. Общие требования

ГОСТ IEC 61439-6 Низковольтные комплектные устройства распределения и управления. Часть 6. Системы сборных шин (шинопроводы)

ГОСТ ISO 13849-1 Безопасность оборудования. Элементы систем управления, связанные с безопасностью. Часть 1. Общие принципы конструирования

ГОСТ Р 2.601 Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы

ГОСТ Р 27.102 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения

ГОСТ Р 50571.5.52/МЭК 60364-5-52:2009 Электроустановки низковольтные. Часть 5-52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки

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

ГОСТ Р 51237 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения

ГОСТ Р 51990 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Классификация

ГОСТ Р 51991 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования

ГОСТ Р 54125—2010 (ИСО 12100:2010) Безопасность машин и оборудования. Принципы обеспечения безопасности при проектировании

ГОСТ Р 54418.2 (МЭК 61400-2:2006) Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 2. Технические требования к малым ветроэнергетическим установкам

ГОСТ Р 54418.4 Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 4. Проектирование трансмиссий ветроустановок. Технические требования

ГОСТ Р 54418.12.1 (МЭК 61400-12-1:2005) Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 12-1. Измерение мощности, вырабатываемой ветроэлектрическими установками

ГОСТ Р 54418.21 (МЭК 61400-21:2008) Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 21. Измерение и оценка характеристик, связанных с качеством электрической энергии, ветроэнергетических установок, подключенных к электрической сети

ГОСТ Р 54418.24 (МЭК 61400-24:2010) Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 24. Молниезащита

ГОСТ Р 54418.27.1—2019 (МЭК 61400-27-1:2015) Установки ветроэнергетические. Часть 27-1. Общие имитационные модели ветроэнергетических установок, присоединенных к энергосистеме

ГОСТ Р 55190—2022 Устройства комплектные распределительные в металлической оболочке (КРУ) на номинальное напряжение до 35 кВ. Общие технические условия

ГОСТ Р 55589 (МЭК 60050-415:1999) Международный электротехнический словарь. Часть 415. Установки ветроэнергетические. Системы генерирования электроэнергии

ГОСТ Р 55890—2013 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования

ГОСТ Р ИСО 2394 Конструкции строительные. Основные принципы надежности

ГОСТ Р ИСО 9001 Системы менеджмента качества. Требования

ГОСТ Р ИСО 12491 Материалы и изделия строительные. Статистические методы контроля качества

ГОСТ Р ИСО 12494 Основы проектирования строительных конструкций. Определение гололедных нагрузок

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

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

ГОСТ Р МЭК 61508-1—2012 Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования

ГОСТ Р МЭК 61508-6 Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 6. Руководство по применению ГОСТ Р МЭК 61508-2 и ГОСТ Р МЭК 61508-3

ГОСТ Р МЭК 61800-4 Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Часть 4. Общие требования. Номинальные технические характеристики систем силовых приводов переменного тока свыше 1000 В и не более 35 кВ

ГОСТ Р МЭК 62061—2015 Безопасность оборудования. Функциональная безопасность систем управления электрических, электронных и программируемых электронных, связанных с безопасностью

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

СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81 Строительство в сейсмических районах»

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

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по *ГОСТ Р 51237*, *ГОСТ Р 55589*, *ГОСТ Р 27.102*, *ГОСТ Р ИСО 2394*, *ГОСТ 27751*, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **вектор скорости ветра** (wind velocity): Вектор, указывающий направление движения элементарного объема воздуха, окружающего рассматриваемую точку; значение вектора равно скорости движения этого элементарного объема воздуха (т. е. локальной скорости ветра).

Примечание — Вектор скорости в любой точке, таким образом, является производной по времени от вектора положения элементарного объема воздуха, перемещающегося через рассматриваемую точку.

3.2 **вертикальный профиль ветра** (wind profile): Зависимость скорости ветра по высоте в приземном слое, определяемая для конкретной местности на основе измерений скорости ветра на различной высоте относительно земной поверхности.

Примечания

1 Обычно используемые профили описываются логарифмическими зависимостями (1) или показательными функциями (2)

$$V(z) = V(z_r) \cdot \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)}, \quad (1)$$

$$V(z) = V(z_r) \cdot \left(\frac{z}{z_r}\right)^{\alpha}, \quad (2)$$

где $V(z)$ — скорость ветра на высоте z, м/с;

z — высота над поверхностью земли, м;

z_r — базовая высота над землей, используемая для построения профиля, м;

z_0 — показатель шероховатости подстилающей поверхности, м;

α — степень сдвига ветра (степенной закон).

2 Вертикальный профиль ветра также называют «закон сдвига ветра» (wind shear law).

3.3 **распределение скорости ветра** (wind speed distribution): Функция распределения вероятностей, используемая для описания распределения скоростей ветра за продолжительный период времени.

Примечание — Наиболее часто используют функцию распределения вероятностей Рэлея (распределение Рэлея), $P_R(V_0)$, и функцию распределения вероятностей Вейбулла (распределение Вейбулла), $P_W(V_0)$.

$$P_R(V_0) = 1 - \exp\left[-\pi(V_0/2V_{ave})^2\right];$$
$$P_W(V_0) = 1 - \exp\left[-(V_0/C)^k\right]; \quad (3)$$

$$V_{ave} = \begin{Bmatrix} C \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \\ C\sqrt{\pi}/2, \text{ если } k = 2 \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

где $P(V_0)$ — совокупная функция вероятности, то есть вероятность, что $V < V_0$;

V_0 — предельное значение скорости ветра, м/с;

V_{ave} — среднее значение скорости ветра, м/с;

C — параметр масштаба распределения Вейбулла;

k — параметр формы распределения Вейбулла;

Γ — гамма-функция.

Оба параметра C и k можно определить на основе измеренных данных. Распределение Рэлея идентично распределению Вейбулла при $k = 2$, а C и V_{ave} удовлетворяют условиям (4) при $k = 2$.

Функции распределения выражают совокупную вероятность того, что скорость ветра ниже, чем V_0. Таким образом, $(P(V_1) - P(V_2))$, если она оценивается между указанными пределами V_1 и V_2, укажет долю времени, в течение которого скорость ветра остается в этих пределах. Дифференцирование функций распределения дает соответствующие функции плотности вероятности.

3.4 **среднегодовое (значение параметра)** (annual average): Среднее значение ряда измеренных данных, достаточного объема и продолжительности, служащее для оценки ожидаемого значения рассматриваемого параметра.

Примечание — Временной интервал осреднения должен представлять собой целое число лет, чтобы учесть сезонные изменения атмосферы.

3.5 **среднегодовая скорость ветра** (annual average wind speed): Скорость ветра, осредненная как указано в 3.4.

3.6 **экстремальная скорость ветра** (extreme wind speed): Величина самой высокой скорости ветра, усредненной за период t с, с ежегодной вероятностью превышения $1/N$ для периода повторяемости N лет.

Примечание — В настоящем стандарте периоды повторяемости $N = 50$ лет и $N = 1$ год, интервалы времени, для которых определяется среднее значение, составляют $t = 3$ с и $t = 10$ мин. В настоящем стандарте при проектировании ВЭУ используются экстремальные скорости ветра для определения расчетных нагрузок.

3.7 **средняя скорость ветра** (mean wind speed): Среднестатистический показатель мгновенных значений скорости ветра, осредненных на заданном периоде времени, продолжительность которого может меняться от нескольких секунд до многих лет.

3.8 **базовая скорость ветра (для ВЭУ)** V_{ref} (reference wind speed): Основная экстремальная характеристика ветра, используемая для классификации ветроэнергетических установок по безопасности, равная максимальной рабочей скорости ветра.

Примечание — ВЭУ, относящаяся к классу с базовой скоростью V_{ref}, должна выдерживать климатические условия, в которых экстремальная средняя за 10-минутный интервал скорость ветра на высоте оси ветроколеса с периодом повторяемости 50 лет меньше или равна этой базовой скорости.

3.9 **номинальная скорость ветра (для ВЭУ)** V_r (rated wind speed): Расчетная скорость ветра, при которой определяют номинальную мощность ВЭУ, равная минимальной скорости ветра на высоте оси ветроколеса при устойчивом не турбулентном набегающем воздушном потоке, при которой достигается номинальная мощность ВЭУ.

Примечание — Также используют обозначения V_{nom} и $V_{ном}$.

3.10 **начальная скорость ветра (для ВЭУ)** (start-up wind speed): Минимальная скорость ветра, при которой ветроколесо/ротор начинает вращение, преодолевая собственные силы инерции.

Примечание — Также используют термины «скорость страгивания с места» или «скорость страгивания»

3.11 **минимальная рабочая скорость ветра (для ВЭУ)** V_{in} (cut-in wind speed): Наименьшая скорость ветра на оси ветроколеса при устойчивом не турбулентном набегающем воздушном потоке, при которой ВЭУ начинает вырабатывать электроэнергию, усредненная за 10 мин.

Примечание — Также используют обозначение V_{min}.

3.12 **максимальная рабочая скорость ветра (для ВЭУ)** V_{out} (cut-out wind speed): Наибольшая скорость ветра на высоте оси ветроколеса при устойчивом не турбулентном набегающем воздушном потоке, при которой расчетная прочность ВЭУ позволяет производить электроэнергию без повреждений, усредненная за 10 мин.

Примечания

1 Максимальная рабочая скорость ветра определяет максимальную нагрузку на конструкцию ВЭУ.

2 Также используют обозначение V_{max}.

3.13 **скорость ветра в выбранной точке вращающегося ветроколеса/ротора** (rotationally sampled wind velocity): Скорость ветра, которая воздействует на фиксированную точку вращающегося ветроколеса/ротора ВЭУ.

Примечание — Спектр турбулентности ветра в выбранной точке вращающегося ветроколеса/ротора определенным образом отличается от нормального спектра турбулентности. Вращаясь, лопасть пересекает набегающий воздушный поток, который изменяется в пространстве. Поэтому результирующий спектр турбулентности содержит большое количество вариаций и гармоник, обусловленных частотой вращения.

3.14 **сдвиг ветра** (wind shear): Изменение скорости ветра в плоскости, перпендикулярной направлению ветра.

3.15 **порыв** (gust): Внезапное изменение скорости ветра.

Примечание — Порыв ветра может быть охарактеризован временем нарастания, амплитудой и продолжительностью.

3.16 **по ветру** (downwind): В направлении главного вектора скорости ветра.

3.17 **против ветра** (upwind): В направлении, противоположном направлению главного вектора скорости ветра.

3.18 **интенсивность турбулентности** I (turbulence intensity): Отношение среднеквадратичного отклонения скорости ветра к средней скорости ветра, определенной из того же самого набора выборок измеренных данных скорости ветра, которое берется за указанный период времени.

3.19 **масштаб турбулентности (воздушного потока)** Λ_1 (turbulence scale parameter): Длина волны, при которой безразмерная спектральная плотность энергии продольной составляющей $f_0S_1(f_0)/\sigma_1^2$ равна 0,05.

Примечание — Длина волны, таким образом, определена как $\Lambda_1 = V_{hub}/f_0$, где $f_0S_1(f_0)/\sigma_1^2 = 0{,}05$.

3.20 **среднеквадратичное отклонение турбулентности s_1** (turbulence standard deviation): Среднеквадратичное отклонение продольной составляющей турбулентной скорости ветра на высоте оси ветроколеса.

3.21 **инерционная область** (inertial sub-range): Интервал частоты спектра турбулентности, в котором вихревое движение, после достижения изотропии, претерпевает последовательное разрушение с незначительным рассеянием энергии.

Примечание — При типовой скорости ветра 10 м/с инерциальный поддиапазон имеет размеры (примерно) от 0,2 до 1 кГц.

3.22 **площадка для размещения ВЭУ** (wind turbine site): Место размещения ВЭУ, работающей отдельно или в составе ВЭС.

3.23 **сведения о площадке** (site data): Данные, относящиеся к площадке размещения ВЭУ и описывающие окружающую среду, сейсмические особенности, грунт, особенности сети подключения.

Примечание — Сведения, описывающие ветровой поток, должны быть статистическими данными с 10-минутной выборкой, если не задан иной интервал.

3.24 **сложный ландшафт (для ВЭУ)** (complex terrain): Ландшафт, окружающий площадку размещения ВЭУ, который имеет существенные изменения рельефа и препятствия на поверхности земли, которые могут вызвать искажение течения воздушного потока, набегающего на ветровую установку.

3.25 **внешние условия (для ВЭУ)** (external conditions): Факторы, оказывающие воздействия на процесс эксплуатации ВЭУ, включая условия окружающей среды (ветровой режим, температура, снег, гололед и т. д.) и условия, накладываемые сетью подключения, также экстремальные условия, например, землетрясения.

3.26 **условия окружающей среды (для ВЭУ)** (environmental conditions): Параметры, которые характеризуют факторы окружающей среды, влияющие на особенности функционирования ВЭУ (скорость ветра, высота над уровнем моря, температура, влажность и прочие параметры).

3.27 **ветроэнергетическая установка;** ВЭУ (wind turbine, wind turbine generator system): Установка, предназначенная для преобразования энергии ветра в другие виды энергии.

Примечание — В настоящее время, если не оговорено другое, используя термины ветроэнергетическая установка (ВЭУ), подразумевают ветроэлектрические установки, преобразующие энергию ветра в электрическую энергию.

3.28 **ветроэлектрическая станция;** ВЭС (wind power station, wind farm): Электростанция, состоящая из двух и более ветроэнергетических установок, предназначенная для преобразования энергии ветра в электрическую энергию.

3.29 **вертикально-осевая ВЭУ** (vertical axis wind turbine): ВЭУ, у которой ось ротора расположена вертикально.

3.30 **горизонтально-осевая ВЭУ** (horizontal axis wind turbine): ВЭУ, у которой ось ветроколеса расположена почти параллельно вектору скорости ветра.

3.31 **ВЭУ средней мощности** (medium wind turbine): ВЭУ мощностью от 50 до 250 кВт с ометаемой площадью ветроколеса/ротора или, в случае ВЭУ с вентиляционной трубой или бандажом, с большей из площадей сечения на входе или выходе вентиляционной трубы или бандажа больше 200 м^2, но не больше 1000 м^2.

3.32 **гондола** (nacelle): Помещение, расположенное наверху башни горизонтально-осевой ВЭУ, в котором находится трансмиссия и другие элементы ВЭУ.

3.33 **ступица** (hub): Устройство, с помощью которого осуществляется фиксация лопастей ветроколеса или их сборочных единиц на валу ветроколеса.

3.34 **несущая конструкция** (support structure): Часть ВЭУ, включающая башню и фундамент.

3.35 **электрическая система ВЭУ** (wind turbine electrical system): Совокупность электрического оборудования внутри ВЭУ, включая выводы, устройства заземления, уравнивания потенциалов, средства связи и проводку, предназначенную для заземления электрической сети.

3.36 **блокировка (ВЭУ)** (blocking): Способ предотвращения взаимного движения элементов конструкции и механизмов ВЭУ, например, вала ветроколеса/ротора или механизма установки на ветер.

Примечание — Блокировка осуществляется при помощи различных устройств, которые не могут быть рассоединены случайно, например, штифтов, штырей, пальцев или других устройств (кроме обычного механического тормоза).

3.37 **тормоз** (brake): Устройство, способное снижать скорость ветроколеса/ротора или останавливать его вращение.

Примечание — Тормоз может приводиться в действие аэродинамически, иметь механический или электрический привод.

3.38 **выводы ВЭУ** (wind turbine terminals): Точка электрической части ВЭУ (контакт или контакты), определяемая поставщиком, в которой осуществляется подключение ВЭУ к коллекторной сети.

Примечание — Выводы ВЭУ представляют собой объединительные устройства, обеспечивающие передачу энергии и связь.

3.39 **точка подключения к сети** (network connection point): Концевые кабельные муфты ВЭУ, если ВЭУ непосредственно соединена с сетью, или, для ветроэлектрической станции, точки, в которых осуществляется соединение электрической сети с шинами коллекторной сети.

3.40

коллекторная сеть (power collection system): Совокупность элементов электрической сети, включающая в себя линии электропередачи и электросетевое оборудование, расположенное между выводами одной или более ВЭУ и распределительным устройством высшего напряжения (точкой подключения к сети), через которое осуществляется выдача мощности электростанции в сеть.

[ГОСТ Р 58491—2019, пункт 3.3]

3.41 **установка на ветер** (yawing): Поворот оси ветроколеса относительно вертикальной оси.

Примечание — Только для горизонтально-осевых ВЭУ.

3.42 **рассогласование ориентации на ветер (ВЭУ)** (yaw misalignment): Отклонение оси вращения ветроколеса в горизонтальной плоскости от направления ветра.

3.43 **нормальное выключение (ВЭУ)** (normal shutdown): Выключение, при котором все его этапы находятся под контролем системы управления.

3.44 **холостой ход** (idling): Состояние ВЭУ, при котором ветроколесо/ротор медленно вращается, но ВЭУ не производит электроэнергию.

3.45 **простой** (standstill): Состояние ВЭУ, при котором она остановлена.

3.46 **цикл самовключения** (auto-reclosing cycle): Событие с периодом времени, изменяющимся приблизительно от 0,01 с до нескольких секунд, в течение которых тормоз, освобожденный после сбоя в сети, автоматически повторно включается, и линия вновь подключается к сети.

3.47 **уровень функционирования** (performance level, PL): Дискретный уровень, используемый для определения способности связанных с безопасностью узлов систем управления выполнять функцию безопасности в предсказуемых условиях.

3.48

уровень полноты безопасности; УПБ [safety integrity level (SIL)]: Дискретный уровень (принимающий одно из четырех возможных значений), соответствующий диапазону значений полноты безопасности данного объекта (устройства, системы и т. п.), при котором уровень полноты безопасности, равный 4, является наивысшим уровнем полноты безопасности, а уровень полноты безопасности, равный 1, соответствует наименьшей полноте безопасности.

Примечания

1 Целевые меры отказов для четырех уровней полноты безопасности указаны в *ГОСТ Р МЭК 61508-1—2012, таблицы 2 и 3*.

2 Уровни полноты безопасности используют при определении требований полноты безопасности для функций безопасности, которые должны быть распределены по электрическим, электронным, программируемым электронным системам, связанным с безопасностью.

3 Уровень полноты безопасности не является свойством системы, подсистемы, элемента или компонента. Правильная интерпретация фразы «УПБ системы, связанной с безопасностью, равен *n*» (где *n* = 1, 2, 3 или 4) означает: система потенциально способна к реализации функций безопасности с уровнем полноты безопасности до значения, равного *n*.

[*ГОСТ Р МЭК 61508-4—2012, пункт 3.5.8*]

3.49

полнота безопасности (safety integrity): Вероятность того, что система, связанная с безопасностью данного объекта (устройства, системы и т. п.), будет удовлетворительно выполнять требуемые функции безопасности при всех оговоренных условиях в течение заданного интервала времени.

Примечания

1 Чем выше уровень полноты безопасности, тем ниже вероятность того, что система, связанная с безопасностью, не сможет выполнить указанные функции безопасности или не будет в состоянии, когда потребуется, принять указанное состояние.

2 Существует четыре уровня полноты безопасности для систем.

3 При определении полноты безопасности должны учитываться все причины отказов (случайных отказов аппаратных средств и систематических отказов), которые приводят к небезопасному состоянию, например отказы аппаратных средств, отказы, вызванные программным обеспечением, и отказы, вызванные электрическими помехами. Некоторые из этих типов отказов, например случайные отказы аппаратных средств, могут быть охарактеризованы количественно, с использованием таких параметров, как интенсивность отказов в опасном режиме или вероятность того, что система защиты, связанная с безопасностью, не сможет выполнить запрос. Однако полнота безопасности системы также зависит и от многих факторов, которым нельзя дать точную количественную оценку и которые могут быть оценены только качественно.

4 Полнота безопасности включает в себя полноту безопасности аппаратных средств и полноту безопасности по отношению к систематическим отказам.

5 Данное определение основывается на определении безотказности (надежности) систем, связанных с безопасностью, при выполнении ими функций безопасности (определение надежности — см. 191-12-01 в Международном электротехническом словаре).

[*ГОСТ Р МЭК 61508-4—2012, пункт 3.5.4*]

3.50 **функции защиты (системы управления ВЭУ)** (protection functions): Функции системы управления ВЭУ, которые гарантируют, что состояние ВЭУ останется в пределах, определенных проектом.

3.51 **основной уровень защиты** (primary layer protection function): Уровень защиты в системе защиты с двумя или более независимыми уровнями, которая может реализоваться как часть системы управления ВЭУ и является отдельной от защиты вторичного уровня аналогичного назначения.

3.52 **вторичный уровень функции защиты** (secondary layer protection function): Специализированная функция защиты, действующая с использованием уровня контроля и логики, отдельная от функции защиты основного уровня аналогичного назначения.

3.53 **частный коэффициент безопасности по сопротивлению** γ_M (resistance partial safety factor): Коэффициент, учитывающий возможные негативные отклонения/неопределенности параметров прочности материала и модели сопротивления, включая систематическую погрешность модели сопротивления.

3.54 **безопасный ресурс** (safe-life): Время работы установки, по прошествии которого эксплуатация прекращается независимо от состояния конструкции, устанавливаемое для ВЭУ или компонентов ВЭУ, для которых возможна ситуация, когда функциональное повреждение может быть обнаружено только после окончательного разрушения конструкции.

Примечание — Для ВЭУ или компонентов ВЭУ, выработавших безопасный ресурс, невозможно надежно обнаружить наступление предкритического состояния. Они спроектированы на выработку полного ресурса и исключают требования ремонтов или проверок.

Предполагается, что в пределах безопасного ресурса разрушение конструкции практически невероятно.

3.55 **скрытый отказ** (dormant failure): Отказ элемента, системы или ее части, который остается невыявленным в течение нормальной эксплуатации ВЭУ.

3.56 **номинальное значение параметра электротехнического устройства** (nominal value of an electrical device parameter): Значение параметра электротехнического устройства, как правило, указанное изготовителем, при котором оно должно работать в нормальном режиме, являющееся исходным для отсчета отклонений.

Примечания

1 К числу параметров относятся, например, ток, напряжение, мощность.

2 Номинальные параметры ВЭУ определяют на выводах ВЭУ.

3.57 **пределы отклонений рабочих параметров при нормальном режиме работы (ВЭУ)** (operating limits): Набор условий, определяемых проектировщиком ВЭУ, по которым система управления осуществляет регулирование работы ВЭУ.

3.58 **производимая мощность** (power output): Мощность определенного вида, выработанная устройством для определенной цели.

Примечание — Для ВЭУ это вырабатываемая электрическая мощность.

3.59 **номинальная мощность** (**ВЭУ)** (rated power): Значение электрической мощности ВЭУ при расчетном значении скорости ветра, указанное изготовителем.

Примечание — Для ВЭУ это значение максимальной непрерывной электрической мощности, выдаваемой в режиме нормальной эксплуатации и при нормальных внешних условиях, которая была задана в процессе проектирования ВЭУ.

3.60 **коэффициент использования установленной мощности** (**ВЭУ);** КИУМ (wind turbine capacity factor): Отношение реально выработанной ВЭУ электрической энергии за определенный период времени к той электрической энергии, которая могла бы быть выработана при работе ВЭУ на номинальной мощности в течение всего этого периода времени.

3.61 **частота вращения** (rotor speed): Частота вращения ветроколеса/ротора ВЭУ относительно его оси.

3.62 **ометаемая площадь** (swept area): Площадь проекции поверхности, которую описывает ветроколесо/ротор за один полный оборот, на плоскость, перпендикулярную к направлению ветрового потока.

3.63 **высота оси ветроколеса z_{hub}** (hub height): Высота центра ометаемой площади ветроколеса ВЭУ над поверхностью земли.

3.64 **показатель шероховатости подстилающей поверхности z_0** (roughness length): Экстраполированная высота, на которой средняя скорость ветра становится равной нулю в предположении, что профиль изменения ветра по высоте подчиняется логарифмическому закону.

3.65 **расчетные ограничения** (design limits): Максимальные или минимальные значения, указанные в проекте.

3.66 **плановое обслуживание** (scheduled maintenance): Профилактическое техническое обслуживание, выполняемое в соответствии с установленным календарным графиком.

3.67 **внеплановое обслуживание** (unscheduled maintenance): Техническое обслуживание, необходимость выполнения которого устанавливается на основе полученного сигнала, сообщающего о состоянии детали, узла, сборочной единицы, и которое не предусмотрено установленным календарным графиком.

4 Обозначения и сокращения

4.1 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

C — параметр масштаба функции распределения Вейбулла, м/с;

C_{CT} — коэффициент, учитывающий характеристики турбулентности, порожденной сложным ландшафтом;

Coh — функция когерентности;

D — диаметр ветроколеса, м;

$D_{TV,i}$ — среднеквадратичное отклонение изменения рельефа местности Δz в i-м секторе 30 °, м;

$D_{TV,360}$ — среднеквадратичное отклонение изменения рельефа местности Δz в окружности 360 °, м;

f — частота, $с^{-1}$;

f_d — расчетная прочность материала, МПа;

f_k — нормативная прочность материала, МПа;

F_d — расчетная суммарная внутренняя нагрузка, Н;

F_k — нормативная нагрузка, Н;

I_{ref} — расчетная интенсивность турбулентности воздушного потока на высоте оси ветроколеса при средней скорости 15 м/с, определенной на 10-минутном интервале;

I_{eff} — эффективная интенсивность турбулентности воздушного потока;

k — параметр формы функции распределения Вейбулла;

k_1 — коэффициент эмпирической корректировки для TSI_{360}, $k_1 = 5/3$;

k_2 — коэффициент эмпирической корректировки для TVI_{360}, $k_2 = 3$;

K — модифицированная функция Бесселя;

L — интегральный масштаб изотропной турбулентности, м;

L_e — масштаб когерентности;

L_k — интегральный масштаб k-й составляющей вектора скорости, м;

m — показатель степени в формуле Веллера;

n_i — подсчитанное число усталостных циклов в i-й выборке нагрузки;

$N(S_i)$ — число циклов до разрушения как функция напряжения (или деформации) для указанного аргумента, т. е. кривая S–N;

N — период повторяемости экстремальных случаев, лет;

p — атмосферное давление, Н/м^2;

$P(V_0)$ — вероятностная функция распределения, т. е. вероятность того, что $V < V_0$;

$P_R(V_0)$ — вероятностная функция распределения Рэлея;

P_s — вероятность безотказной работы;

$P_W(V_0)$ — вероятностная функция распределения Вейбулла;

r — величина проекции вектора разделения, м;

R — радиус сегмента окружности, м;

R_0 — газовая постоянная, Дж/(кг · К);

S — функция нагружения;

s_i — уровень напряжения (деформации), зависящий от подсчитанного числа циклов в i-й выборке;

$S_1(f)$ — спектральная плотность энергии продольной составляющей турбулентных пульсаций, м^2/с;

$S_{F,min}$ — минимальное значение запаса прочности для поломки мультипликатора;

$S_{H,min}$ — минимальное значение запаса прочности для точечной коррозии;

$S_k(f)$ — функция спектральной плотности энергии для k-й составляющей турбулентных пульсаций в одном из трех направлений в трехмерной ортогональной системе координат, м^2/с ($k = 1$ — продольная составляющая, $k = 2$ — боковая составляющая, $k = 3$ — нормальная составляющая);

T — собственное значение времени порыва, с;

t — время, с;

T_{cp} — средняя наработка на отказ, ч;

TSI — индекс уклона рельефа местности;

TVI — индекс изменения рельефа местности;

V — скорость ветра, м/с;

$V(z)$ — скорость ветра на высоте z над уровнем земли, м/с;

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

V_{cg} — амплитуда скорости ветра экстремального когерентного порыва на всей площади, ометаемой ветроколесом, м/с;

V_{eN} — ожидаемая экстремальная скорость ветра (средняя за три секунды) с периодом повторяемости N лет, м/с. V_{e1} и V_{e50} с периодами повторяемости 1 год и 50 лет соответственно;

V_{gust} — наибольшая скорость порыва ветра на высоте оси ветроколеса с ожидаемым периодом повторяемости 50 лет, м/с;

V_{hub} — скорость набегающего воздушного потока на высоте оси ветроколеса, м/с;

V_{min} — минимальная рабочая скорость ветра, м/с;

V_0 — предельная скорость ветра, м/с;

V_{50} — экстремальная скорость ветра (средняя за 10 минут) с периодом повторяемости 50 лет, м/с;

V_{100} — экстремальная скорость ветра (средняя за 10 минут) с периодом повторяемости 100 лет, м/с;

V_{out} — максимальная рабочая скорость ветра, м/с;

V_r — номинальная скорость ветра, м/с;

V_{ref} — базовая скорость ветра, м/с;

$V_{ref,T}$ — базовая скорость ветра для тропических условий, м/с;

$V(y,z,t)$ — продольная составляющая вектора скорости, описывающая переходный процесс для горизонтального сдвига, м/с;

$V(z,t)$ — продольная составляющая вектора скорости, описывающая переходный процесс при экстремальном порыве и сдвиге ветра, м/с;

x, y, z — координаты системы координат, в которой описывается векторное поле скоростей: вдоль ветра (продольных), поперек ветра (боковых) и по высоте (нормальных), соответственно, м;

Z_{NT} — коэффициент долговечности для контактного напряжения в условиях эталонных испытаний;

z_{hub} — высота оси ветроколеса над уровнем земли, м;

z_r — базовая высота над уровнем земли, м;

z_0 — показатель шероховатости подстилающей поверхности для построения логарифмического профиля ветра, м;

α — показатель степени для функции, описывающей профиль ветра;

β — параметр в модели экстремального изменения направления;

δ — коэффициент вариации;

γ_f — частный коэффициент безопасности для нагрузок;

γ_M — частный коэффициент безопасности для сопротивлений;

γ_n — частный коэффициент безопасности, учитывающий последствия отказа;

$\theta(t)$ — изменение направления ветра во времени при переходном процессе, град;

θ_{cg} — угол максимального отклонения от направления средней скорости ветра в случае порыва, град;

θ_{eN} — максимальное изменение направления с периодом повторяемости N лет, град;

θ_i — угол уклона аппроксимирующей плоскости для i-го сектора 30 °, град;

θ_{360} — угол уклона аппроксимирующей плоскости 360 °, град;

$\theta_{1year,min}$ — минимальная температура окружающей среды, ожидаемая в среднем за час, К;

$\theta_{min,operation}$ — минимально допустимая температура окружающей среды для эксплуатации ВЭУ, К;

Λ_1 — продольный масштаб турбулентности воздушного потока, определенный как длина волны, при которой безразмерная спектральная плотность энергии продольной составляющей, $fS_1(f)/\sigma_1^2$, равна 0,05 м;

ρ — плотность воздуха, кг/м^3;

$\hat{\sigma}$ — расчетное среднеквадратичное отклонение турбулентности набегающего воздушного потока, м/с;

$\hat{\sigma}_c$ — репрезентативное среднеквадратичное отклонение турбулентности набегающего воздушного потока, м/с;

$\hat{\sigma}_{eff}$ — эффективное расчетное среднеквадратичное отклонение турбулентности набегающего воздушного потока, м/с;

$\hat{\sigma}_{wake}$ — среднеквадратичное отклонение скорости ветра в аэродинамическом следе, м/с;

$\hat{\sigma}_T$ — максимальное среднеквадратичное отклонение турбулентности в центре аэродинамического следа на оси ветроколеса, м/с;

$\hat{\sigma}_\sigma$ — среднеквадратичное отклонение расчетного среднеквадратического отклонения турбулентности набегающего воздушного потока $\hat{\sigma}$, м/с;

$\hat{\sigma}_{1,ETM}$ — среднеквадратичное отклонение экстремальной турбулентности набегающего воздушного потока, м/с;

σ_1 — среднеквадратичное отклонение продольной составляющей скорости ветра, м/с;

σ_2 — среднеквадратичное отклонение боковой составляющей скорости ветра, м/с;

σ_3 — среднеквадратичное отклонение нормальной составляющей скорости ветра, м/с;

Γ — гамма-функция;

Φ — функция нормального распределения вероятности;

$E[\ ]$ — ожидаемая величина параметра, помещенного в скобки;

$Var[\ ]$ — вариация параметра, помещенного в скобки.

4.2 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

А — аварийный (при определении частных коэффициентов безопасности);

КРУ — комплектное распределительное устройство;

МНТ — модель нормальной турбулентности;

МЭВ — модель экстремальной скорости ветра;

Н — нормальный (при определении частных коэффициентов безопасности);

НПВ — модель нормального профиля ветра;

П — расчет по предельным нагрузкам;

РСН — расчетный случай нагружения;

У — расчет на усталостную прочность;

ЭИН — экстремальное изменение направления;

ЭКН — экстремальный когерентный порыв с изменением направления;

ЭМТ — экстремальная модель турбулентности;

ЭРП — экстремальный рабочий порыв;

ЭСВ — экстремальный сдвиг воздушного потока;

FMEA — анализ видов и последствий отказов (Failure Mode and Effects Analysis);

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

Примечание — В отечественных и зарубежных нормативных документах и литературных источниках также используют следующие сокращения:

NTM — модель нормальной турбулентности;

EWM — модель экстремальной скорости ветра;

DLC — расчетный случай нагружения;

EDC — экстремальное изменение направления;

ECD — экстремальный когерентный порыв с изменением направления;

ETM — экстремальная модель турбулентности;

EOG — экстремальный рабочий порыв;

EWS — экстремальный сдвиг воздушного потока.

5 Основные положения

5.1 Методы проектирования

Для определения расчетных нагрузок должно быть использовано структурное динамическое моделирование. Его следует использовать для определения нагрузок, возникающих под воздействием ветра в заданном диапазоне скоростей, учитывать турбулентность воздушного потока, прочие характеристики ветра, определенные в разделе 6, и расчетные состояния конструкций, описанные в разделе 7. Должны быть рассмотрены все характерные комбинации внешних воздействий и расчетных состояний. Минимальный набор таких комбинаций определен в настоящем стандарте как «варианты нагружения».

Для увеличения степени надежности при указании значений расчетных параметров, а также для подтверждения соответствия структурных динамических моделей и расчетных состояний, определенных в 7.2, рекомендуется использовать данные полномасштабных испытаний ВЭУ.

Соответствие конструкции подтверждают с помощью расчетов и/или испытаний. Если используют результаты испытаний, значения параметров окружающей среды в процессе испытаний должны быть указаны в документации.

При выборе проверяемых условий, включая контрольные нагрузки, следует учитывать соответствующие коэффициенты безопасности.

ВЭУ должны отвечать требованиям *ГОСТ Р 51991*, в части, не противоречащей настоящему стандарту.

Оценку рабочих параметров и других *технико-экономических* показателей работы ВЭУ при проектировании рекомендуется поводить с использованием коэффициента использования установленной мощности и средних значений внешних условий по данным многолетних наблюдений за выбранный период времени.

Выбор ВЭУ для конкретной площадки размещения следует производить на основе проверки соответствия технических характеристик ВЭУ ветровым режимам и прочим факторам окружающей среды, характерным для данной площадки.

5.2 Безопасность ветроэнергетических установок

Требования безопасности ВЭУ определяются условиями эксплуатации, для работы в которых они предназначены. В зависимости от этих условий ВЭУ разделяют на классы безопасности и проектируют ВЭУ в соответствии с требуемым классом.

Классы безопасности ВЭУ разделяются на два основных вида:

- нормальные (стандартные) классы безопасности — классы безопасности по степени устойчивости ВЭУ к воздействию факторов внешней среды. Разделение на эти классы связано с рисками нанесения телесных повреждений, а также рисками социальных или экономических последствий в результате отказа ВЭУ при различных предельных значениях параметров условий эксплуатации и соответствующими требованиями к ВЭУ. ВЭУ разрабатывают таким образом, чтобы риски были сведены к минимуму при установленных уровнях параметров внешней среды;
- специальные классы безопасности — классы безопасности, определяемые требованиями безопасности местных нормативных документов и/или требованиями безопасности, согласованными между изготовителем и заказчиком.

Классы безопасности ВЭУ в зависимости от значений параметров внешней среды в условиях эксплуатации установлены в 6.2.

Частные коэффициенты безопасности для ВЭУ нормального класса безопасности определены в 7.6.

Частные коэффициенты безопасности для ВЭУ специального класса безопасности должны быть согласованы между изготовителем и заказчиком. ВЭУ, спроектированная в соответствии со специальным классом безопасности, является ВЭУ класса S, как это установлено в 6.2.

5.3 Обеспечение качества

Система обеспечения качества на всех этапах проектирования, закупок, производства, поставки, возведения, эксплуатации и технического обслуживания ВЭУ и всех их компонентов должна соответствовать требованиям *ГОСТ Р ИСО 9001*.

В отношении всех технических средств, выполняющих функции измерения, должны выполняться все метрологические нормы и требования, предусмотренные в [2]. Оборудование должно

быть метрологически аттестовано в установленном порядке. Средства измерений должны быть поверены или откалиброваны в установленном порядке.

5.4 Маркировка

Маркировка ВЭУ должна быть стойкой, четкой, разборчивой и расположена на хорошо видимой части ВЭУ.

Паспортная табличка должна содержать как минимум следующие данные:

- модель и серийный номер;
- дата изготовления;
- номинальная мощность, Вт;
- базовая скорость ветра V_{ref}, м/с;
- диапазон рабочих скоростей ветра на уровне оси ветроколеса (V_{in} – V_{out}), м/с;
- диапазон рабочих температур окружающей среды, °С;
- класс безопасности ВЭУ (см. 6.2);
- номинальное напряжение и диапазон его отклонений, В;
- частоту или диапазон изменения частоты, если номинальное отклонение превышает 2 %.

Паспорт ВЭУ, помимо указанного выше, должен как минимум содержать:

- номинальный ток и диапазон его отклонений, А;

- климатическое исполнение.

Рекомендуется также указывать:

- номинальную скорость ветра, м/с;

- начальную скорость ветра, м/с;

- буревую расчетную скорость ветра, м/с;

- максимальную высоту оси ветроколеса, м;

- ометаемую площадь ветроколеса, м^2;

- число лопастей;

- длину лопасти, м;

- максимальную массу башни, кг, т.

Маркировка установок, предназначенных для районов Крайнего Севера и труднодоступных районов, должна быть выполнена с учетом требований ГОСТ 15846.

6 Факторы внешней среды

6.1 Общие требования

При проектировании ВЭУ должны быть учтены как минимум факторы внешней среды, описанные в настоящем разделе.

На ВЭУ воздействуют факторы окружающей среды и электрические нагрузки, которые влияют на процессы нагружения элементов конструкции ВЭУ, и, как результат, на процесс ее эксплуатации и срок службы. Для обеспечения надлежащего уровня безопасности и надежности необходимо в процессе проектирования учесть все возможные влияющие факторы окружающей среды, режимы электрических нагрузок и характеристики грунтов. Эти данные должны быть детально изложены в проектной документации.

Факторы внешней среды подразделяют на нормальные и экстремальные факторы. Нормальные внешние факторы главным образом затрагивают процессы повторно-периодического нагружения элементов конструкции, в то время как экстремальные внешние факторы представляют собой редкие расчетные состояния. Расчетные случаи нагружения должны состоять из потенциально опасных комбинаций этих факторов с режимами эксплуатации ВЭУ и другими расчетными случаями.

Структурная целостность ВЭУ в первую очередь зависит от режимов ветра. Прочие факторы внешней среды также влияют на конструкции ВЭУ, реализацию функций систем управления и защиты, срок службы, процессы коррозии и т. д.

Нормальные и экстремальные факторы, которые должны быть рассмотрены при проектировании ВЭУ в соответствии с классом ее безопасности, установлены в 6.2—6.4.

6.2 Классы безопасности ветроэнергетических установок

Классы безопасности ВЭУ характеризуют соответствие ВЭУ требованиям надежности при работе в определенных условиях окружающей среды и определяются параметрами окружающей среды на площадке размещения ВЭУ, для работы при которых они предназначены.

ВЭУ разделяют на следующие нормальные (стандартные) классы безопасности (см. 5.2):

- классы I, II и III по значениям скорости ветра, которые подразделяют на подклассы A+, A, B и C по параметрам турбулентности:
- A+ — ВЭУ для работы при очень высокой турбулентности;
- A — ВЭУ для работы при повышенной турбулентности;
- B — ВЭУ для работы при умеренной турбулентности;
- C — ВЭУ для работы при низком уровне турбулентности;
- класс T для зон с крайне высокими значениями скорости ветра в климате с умеренным ветром (исполнение T);
- класс CC для зон с холодным климатом (исполнение CC).

Специальный класс ВЭУ, класс S, характеризуется тем, что значения параметров условий эксплуатации задаются проектировщиком.

Примечания

1 ВЭУ также подразделяют на типы по конструктивному исполнению (см. *ГОСТ Р 54418.27.1—2019, подраздел 5.1*). Другие классификации ВЭУ см. в *ГОСТ Р 51990*.

2 Обозначение класса безопасности ВЭУ включает указанные цифры и буквы. Например, класс ВЭУ, рассчитанных на среднее годовое значение скорости ветра класса II и интенсивность турбулентности категории B при базовой скорости ветра равной $V_{ref,T}$, обозначают как класс $II_{B,T}$ или IIB,T.

В таблице 1 представлены расчетные значения базовых параметров, которые определяют принадлежность ВЭУ к соответствующему классу. Другие климатические параметры, существенно влияющие на конструкцию ВЭУ, определяют по базовым параметрам, характеризующим соответствующий класс ВЭУ.

Таблица 1 — Базовые параметры классов безопасности ВЭУ

Подкласс (категория турбулентности)	Параметр		Класс ВЭУ по уровню скорости ветра			Класс S
			I	II	III	
	V_{ave}, м/с		10	8,5	7,5	Значения расчетных параметров задает разработчик
	V_{ref}, м/с	Обычное исполнение	50	42,5	37,5	
		Исполнение T $V_{ref} = V_{ref,T}$	57			
A+	I_{ref}		0,18			
A	I_{ref}		0,16			
B	I_{ref}		0,14			
C	I_{ref}		0,12			

Примечания

1 Значения параметров приведены к оси ветроколеса.

2 Для исполнения CC (класс CC) значения указанных параметров такие же, как и для обычного исполнения. Дополнительно для него установлены требования по значениям температуры окружающей среды (см. 13.3.2).

Данная классификация ВЭУ учитывает большинство случаев, возникающих в практике проектирования. Установленная классификация ВЭУ имеет широкий диапазон надежности, выраженный в значении скорости ветра и параметрах турбулентности. Значения скоростей ветра и параметров турбулентности, приведенные в таблице 1, являются базовыми для группового описания площадок, соответствующих каждому классу ВЭУ.

Примечание — Значения скорости ветра и параметры турбулентности имеют целью охватить большинство различных площадок размещения ВЭУ и не дают точного представления о какой-либо конкретной площадке, см. приложение ДА, ДА.11.3.

Каждый класс ВЭУ применим к широкому спектру площадок, имеющих скорости ветра и параметры турбулентности, соответствующие значениям рассматриваемого класса. Базовая скорость ветра может использоваться в качестве средней скорости ветра класса ВЭУ от I до III, а интенсивность турбулентности в качестве средней для категорий от A+ до C.

Для ВЭУ класса T, предназначенных для работы в зонах с крайне высокими скоростями ветра в климате с умеренным ветром, введена специальная базовая скорость ветра. Такие условия характерны для зон, подверженных тропическим циклонам. Для класса T принимают, что параметры всех моделей ветров одинаковые и допускают комбинацию $V_{ref,T}$ со всеми категориями турбулентности. Данный класс охватывает не все зоны, склонные к тропическим циклонам. При оценке площадки относительно класса II следует как минимум определить, что V_{50} ниже V_{ref} класса T ($V_{ref,T}$).

Дополнительные требования к ВЭУ, предназначенным для эксплуатации в зонах с холодным климатом, исполнение CC, описаны в разделе 13.

В том случае, когда выявлено наличие более жестких режимов ветра, чем это предусмотрено в таблице 1, или необходимо обеспечить специальные условия безопасности согласно 5.2, или требуется расширение температурных интервалов эксплуатации и условия отличаются от условий класса CC, используют ВЭУ класса S. Расчетные значения базовых параметров ВЭУ класса S задает разработчик ВЭУ. Выбранные значения должны быть не менее жесткими, чем ожидаемые параметры окружающей среды на месте эксплуатации. Выбранные значения должны быть указаны в проектной документации ВЭУ. Для других экстремальных условий эксплуатации также могут быть необходимы ВЭУ класса S.

В дополнение к базовым параметрам, приведенным в таблице 1, для полного учета внешних факторов при проектировании ВЭУ следует использовать ряд других важных параметров. В случае ВЭУ нормальных (стандартных) классов безопасности от I_{A+} до III_C следует дополнительно использовать параметры, значения которых определяют в соответствии с 6.3—6.5.

Расчетный срок службы ВЭУ классов от I до III — не менее 20 лет.

Для ВЭУ класса S производитель в проектной документации должен привести описание примененных моделей и указать значения расчетных параметров. Если приняты модели, описанные в разделе 6, то достаточно указать значения параметров. Проектная документация ВЭУ класса S должна содержать данные, перечисленные в приложении A. Инструкции по расчетным случаям нагружения класса ВЭУ «S» изложены в приложении B.

Требования к выбору ВЭУ по условиям соответствия площадке размещения описаны в *приложении ДА*.

В 6.3.2.2—6.3.3.7 приведены описания режимов ветра для расчетных случаев нагружения, определенных в 7.4.

6.3 Режимы ветра

6.3.1 Общие требования

ВЭУ должна обеспечивать надежное и безопасное функционирование при режимах ветра, соответствующих выбранному классу.

Расчетные параметры режимов ветра должны быть подробно отражены в проектной документации ВЭУ.

Режимы ветра для обеспечения безопасности и определения силового воздействия на элементы конструкции ВЭУ разделяют на нормальные режимы ветра — режимы, часто возникающие в течение нормальной эксплуатации ВЭУ, и экстремальные режимы ветра. Для экстремальных режимов оценивают их повторяемость за периоды 1 год и 50 лет.

Режимы ветра определяются сочетанием постоянного осредненного воздушного потока с переменным расчетным профилем порыва ветра или с турбулентностью ветра. Во всех случаях должно быть рассмотрено влияние отклонения осредненного потока (далее средний поток) относительно горизонтальной плоскости до 8°. Этот угол отклонения потока принимается постоянным по высоте.

Турбулентность ветра оценивают как среднее значение случайных изменений скорости ветра в течение 10 минут. В том случае, когда используется модель турбулентности, модель должна учитывать изменения скорости, сдвигов и направления ветра и позволять выполнение статистической выборки в

меняющихся сечениях. Три составляющих вектора, описывающие напор турбулентного ветра, определяются как:

- продольная составляющая — по направлению средней скорости ветра,
- боковая составляющая — горизонтальная и перпендикулярная к продольной составляющей;
- нормальная составляющая — перпендикулярная к продольной и боковой составляющим.

Для нормальных классов ВЭУ спектральная плотность мощности векторного поля скоростей ветра, используемая в моделях турбулентности, должна удовлетворять требованиям модели Каймала совместно с моделью когерентности, описанной в приложении С. Данная модель отвечает следующим требованиям:

a) среднеквадратичное отклонение продольной составляющей скорости ветра σ_1 принимается постоянным по высоте и определяется, как указано далее. Составляющие, перпендикулярные к среднему направлению воздушного потока должны иметь следующие наименьшие характерные отклонения:

- боковая составляющая: $\sigma_2 \geq 0{,}7\sigma_1$;
- нормальная составляющая: $\sigma_3 \geq 0{,}5\sigma_1$.

Примечание — Фактические значения могут зависеть от выбора модели турбулентности и требований, изложенных в b);

b) продольный масштаб турбулентности воздушного потока, σ_1, на высоте оси z выражается зависимостью:

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0{,}7z & z \leq 60m \\ 42m & z \geq 60m \end{cases}. \tag{5}$$

Спектральные плотности мощности по трем ортогональным составляющим, $S_1(f)$, $S_2(f)$ и $S_3(f)$, по мере увеличения частоты во внутреннем поддиапазоне должны асимптотически приближаться к следующему виду:

$$S_1(f) = 0{,}05\sigma_1^2(\Lambda_1 / V_{hub})^{-2/3} f^{-5/3}; \tag{6}$$

$$S_2(f) = S_3(f) = \frac{4}{3} S_1(f); \tag{7}$$

c) допускается использовать общепризнанную модель для описания когерентности, определяемой совокупной величиной взаимной спектральной плотности продольных составляющих вектора скорости, поделенной на автоспектральную функцию в пространственно удаленных точках плоскости, нормальной к продольному направлению.

В качестве альтернативы можно использовать универсальную модель Манна, см. приложение С.

Возможно применение других моделей турбулентности, однако для нормальных классов ВЭУ модель турбулентности должна отвечать требованиям a)—c), а также вести к усталостным нагрузкам, которые выше или равны созданным с использованием моделей, изложенных в приложении С. Для класса S может применяться достоверная модель турбулентности.

6.3.2 Нормальные режимы ветра

6.3.2.1 Модель распределения скорости ветра

Выбор модели распределения скорости ветра оказывает существенное влияние на проектирование ВЭУ, потому что определяет частоту изменения нагрузок, действующих на элементы конструкции в нормальных расчетных состояниях. Среднее значение скорости ветра на высоте оси ветроколеса, определенное на 10-минутном интервале, может быть определено в соответствии с распределением Рэлея:

$$P_R\left(V_{hub}\right) = 1 - \exp\left[-\pi\left(\frac{V_{hub}}{2V_{ave}}\right)^2\right], \tag{8}$$

где, для стандартных классов ВЭУ, V_{ave} выбирают из таблицы 1.

6.3.2.2 Модель нормального профиля ветра (НПВ)

Профиль ветра, $V(z)$, определяет среднюю скорость ветра в функции высоты z над уровнем земли. Для стандартных классов ВЭУ нормальный профиль скорости ветра должен быть определен посредством степенного закона в соответствии с:

$$V(z) = V_{hub}(z/z_{hub})^{\alpha}. \tag{9}$$

Показатель α принимается равным 0,2.

Принятая модель профиля ветра используется для определения изменения средней скорости ветра по вертикали в плоскости, ометаемой ветроколесом.

6.3.2.3 Модель нормальной турбулентности (МНТ)

Для модели нормальной турбулентности среднеквадратичное отклонение продольной составляющей скорости ветра дано равным для 90 %-ного квантиля для скорости ветра на высоте оси ВЭУ. Данное значение для стандартных классов ВЭУ задается формулой:

$$\sigma_1 = I_{ref}\,(0{,}75V_{hub} + b);\ b = 5{,}6\ \text{м/с}. \qquad (10)$$

Характерные зависимости для стандартного отклонения σ_1 интенсивности турбулентности σ_1/V_{hub} показаны на рисунке 1.

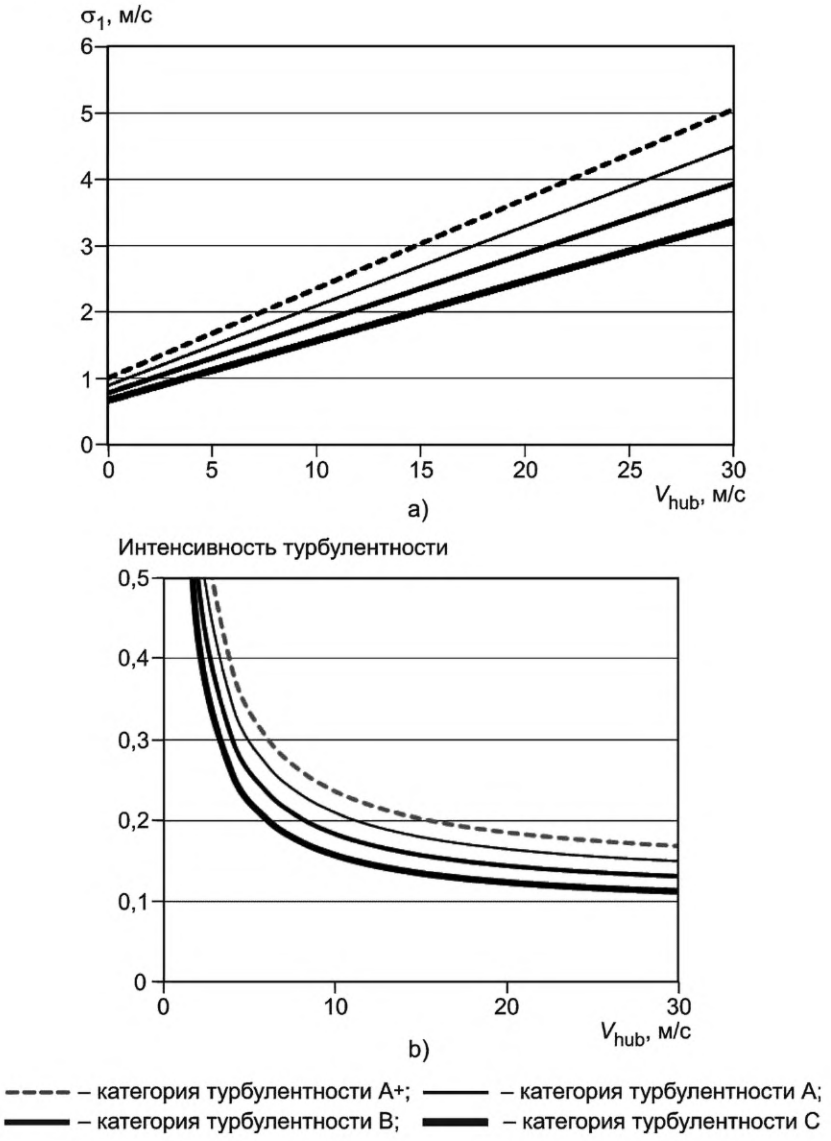


Рисунок 1 — Среднеквадратичное отклонение турбулентности (a) и интенсивность турбулентности (b) для модели нормальной турбулентности

Значения для I_{ref} приведены в таблице 1.

Альтернативой формулы (10) является распределение Вейбулла для σ_1 по вероятностной шкале Вейбулла и параметру формы:

$$P_W(\sigma_1 < \sigma_0) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_0}{C}\right)^k\right], \qquad (11)$$

где $k = 0{,}27V_{hub} + 1{,}4$;

$$C = I_{ref}(0{,}75V_{hub} + 3{,}3). \quad (12)$$

6.3.3 Экстремальные режимы ветра

6.3.3.1 Общие требования

Экстремальные режимы ветра включают как процессы сдвига в потоке ветра, так и пиковые скорости при шторме, а также быстрые изменения скорости и направления ветра.

6.3.3.2 Модель экстремальной скорости ветра (МЭВ)

В качестве МЭВ может быть выбрана как модель стабильного перемещения воздушного потока, так и турбулентная модель ветра. Данные модели ветра должны быть основаны на V_{ref} — базовой скорости ветра и фиксированном значении среднеквадратического отклонения, σ_1. Если тип ВЭУ спроектирован для базовой скорости ветра класса Т, V_{ref} необходимо заменить на $V_{ref,T}$ в модели экстремальной скорости ветра с сохранением других параметров.

Для модели экстремальной скорости ветра экстремальная скорость ветра, V_{e50}, с периодом повторяемости 50 лет, и экстремальная скорость ветра, V_{e1}, с периодом повторяемости 1 год, должны рассчитываться как функция высоты, z, с использованием следующих уравнений:

$$V_{e50}(z) = 1{,}4V_{ref}(z/z_{hub})^{0{,}11} \quad (13)$$

и

$$V_{e1}(z) = 0{,}8V_{e50}(z). \quad (14)$$

В модели стабильного экстремального ветра поправка на краткосрочные отклонения от среднего направления ветра должна выполняться посредством допущения рассогласования ориентации на ветер в диапазоне ±15 °.

Для модели экстремальной скорости турбулентного ветра средние скорости ветра с 10-минутным интервалом в качестве функций z с периодом повторяемости 50 лет и 1 год задаются уравнениями:

$$V_{50}(z) = V_{ref}(z/z_{hub})^{0{,}11}; \quad (15)$$

$$V_1(z) = 0{,}8V_{50}(z). \quad (16)$$

Среднеквадратичное отклонение продольной составляющей турбулентности должно быть:

$$\sigma_1 = 0{,}11V_{hub}. \quad (17)$$

Примечание — Среднеквадратическое отклонение турбулентности для модели экстремальной скорости турбулентного ветра не связано с нормальной или экстремальной моделью турбулентности. Модель стабильного экстремального ветра связана с моделью экстремальной скорости турбулентного ветра посредством пик-фактора приблизительно 3,5.

6.3.3.3 Экстремальный рабочий порыв (ЭРП)

Скорость порыва ветра на высоте оси ветроколеса V_{gust} для периода повторяемости 50 лет для стандартного класса ВЭУ определяется следующей зависимостью:

$$V_{gust} = \text{Min}\left\{1{,}35(V_{e1} - V_{hub});\ 3{,}3\left(\frac{\sigma_1}{1 + 0{,}1\left(\frac{D}{\Lambda_1}\right)}\right)\right\}, \quad (18)$$

где σ_1 — среднеквадратичное отклонение продольной составляющей скорости ветра, определенное по формуле (10);

Λ_1 — продольный масштаб турбулентности согласно формуле (5);

D — диаметр ветроколеса.

Скорость ветра определяют по формуле

$$V(z,t) = \begin{cases} V(z) - 0{,}37V_{gust}\sin(3\pi t/T)(1 - \cos(2\pi t/T)) & \text{при } 0 \le t \le T \\ V(z) & \text{при } t > T \text{ и } t < 0 \end{cases}, \quad (19)$$

где $V(z)$ определена в уравнении (9) и T = 10,5 с.

Пример экстремального рабочего порыва (V_{hub} = 25 м/с, класс IA, D = 42 м) показан на рисунке 2.



Рисунок 2 — Пример экстремального рабочего порыва

6.3.3.4 Экстремальная модель турбулентности (ЭМТ)

Модель экстремальной турбулентности должна использовать модель нормального профиля ветра из 6.3.1.2 и турбулентность со среднеквадратичным отклонением продольной составляющей, определяемым по формуле

$$\sigma_1 = c\, I_{\text{ref}} \left(0{,}072 \left(\frac{V_{\text{ave}}}{c} + 3 \right) \left(\frac{V_{\text{hub}}}{c} - 4 \right) + 10 \right);\ c = 2\ \text{м/с}. \tag{20}$$

6.3.3.5 Экстремальное изменение направления (ЭИН)

Экстремальное изменение направления θ_e определяют по формуле

$$\theta_e = \pm 4 \arctan \left(\frac{\sigma_1}{V_{\text{hub}} \left(1 + 0{,}1 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right) \right)} \right), \tag{21}$$

где σ_1 — определяют по формуле (10);

θ_e — ограничен интервалом ± 180°.

Переходный участок процесса экстремального изменения направления, $\theta(t)$, определяют по формуле

$$\theta(t) = \begin{cases} 0^\circ & \text{при} \quad t < 0 \\ \pm 0{,}5\,\theta_e \left(1 - \cos \left(\frac{\pi t}{T} \right) \right) & \text{при} \quad 0 \le t \le T, \\ \theta_e & \text{при} \quad t > T \end{cases} \tag{22}$$

где T — продолжительность процесса экстремального изменения направления, T = 6 с.

Знак необходимо выбирать так, чтобы на переходном участке возникало наихудшее нагружение. Предполагается, что в конце процесса изменения направления оно остается неизменным. Скорость ветра должна соответствовать модели нормального профиля ветра по 6.3.2.2.

В качестве примера на рисунке 3 показано экстремальное изменение направления (подкласс турбулентности А) для ветроколеса диаметром D = 42 м с высотой оси 30 м для различных V_{hub}. Соответствующий переходный процесс для V_{hub} = 25 м/с показан на рисунке 4.

6.3.3.6 Экстремальный когерентный порыв с изменением направления (ЭКН)

Экстремальный когерентный порыв с изменением направления должен быть

$$V_{\text{cg}} = 15\ \text{м/с}. \tag{23}$$

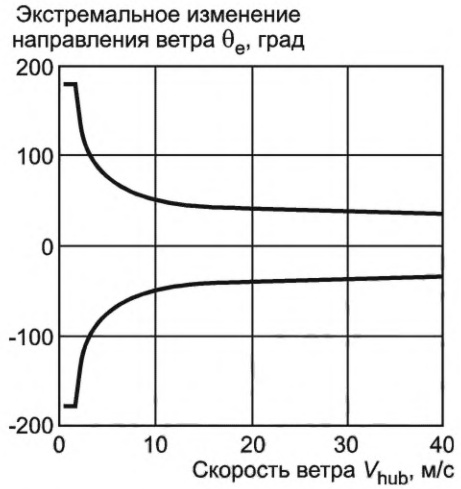


Рисунок 3 — Пример экстремальной величины изменения направления

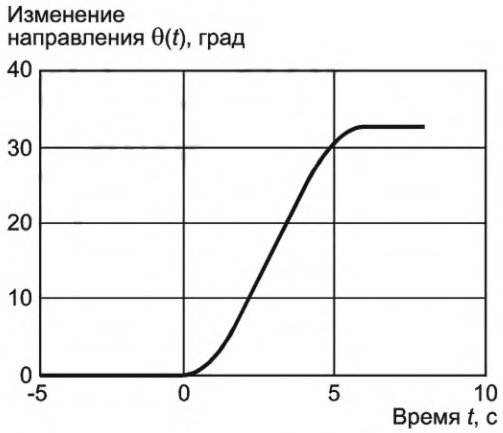


Рисунок 4 — Пример переходного процесса изменения направления

Скорость ветра определяют по формуле

$$V(z,t)=\begin{cases} V(z) & \text{при} \quad t \le 0 \\ V(z)+0{,}5V_{cg}\left[1-\cos\left(\dfrac{\pi t}{T}\right)\right] & \text{при} \quad 0 \le t \le T, \\ V(z)+V_{cg} & \text{при} \quad t \ge T \end{cases} \tag{24}$$

где T — время восстановления, T = 10 с.

В расчетах используют модель нормального профиля скорости ветра $V(z)$ по 6.3.2.2. Нарастание скорости ветра во время экстремального когерентного порыва показано на рисунке 5 для V_{hub} = 25 м/с.

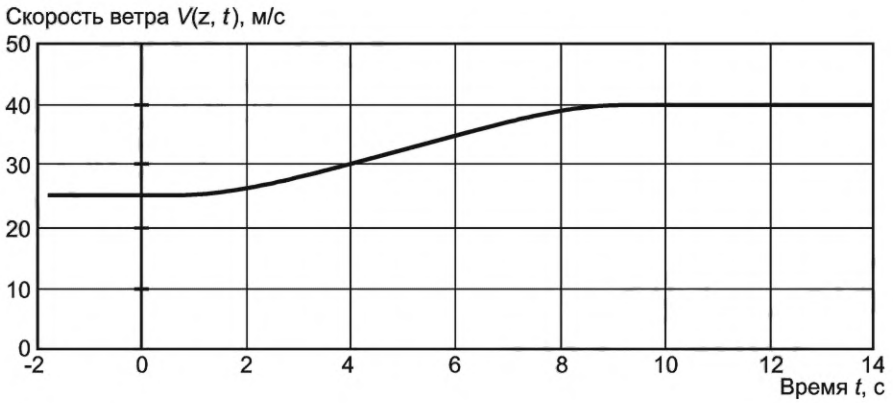


Рисунок 5 — Пример амплитуды экстремального когерентного порыва для ЭКН

Нарастание скорости ветра предположительно происходит одновременно с изменением направления θ от 0° до θ_{cg} включительно. Значение θ_{cg} определяют по формуле

$$\theta_{cg}(V_{hub})=\begin{cases} 180^\circ & \text{при} \quad V_{hub} < 4 \text{ м/с} \\ \dfrac{720^\circ(\text{м/с})}{V_{hub}} & \text{при} \quad 4 \text{ м/с} < V_{hub} < V_{ref} \end{cases}. \tag{25}$$

После этого определяют одновременное изменение направления по формуле

$$\theta(t) = \begin{cases} 0^\circ & \text{при} \quad t < 0 \\ \pm 0{,}5\theta_{cg}(1-\cos(\pi t / T)) & \text{при} \quad 0 \le t \le T \\ \pm\theta_{cg} & \text{при} \quad t > T \end{cases}, \tag{26}$$

где T — время восстановления, T = 10 с.

Изменение направления θ_{cg}, при изменении V_{hub} и изменение направления $\theta(t)$ во времени при переходном процессе для V_{hub} = 25 м/с показаны соответственно на рисунках 6 и 7.

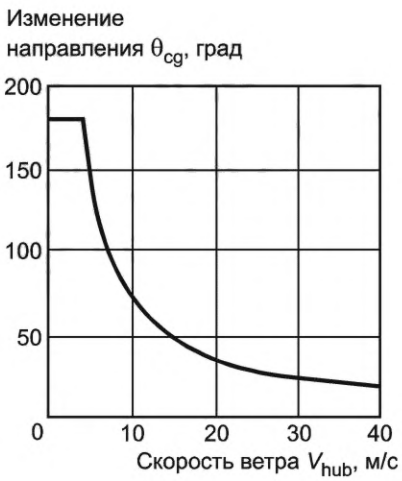


Рисунок 6 — Изменение направления для ЭКН

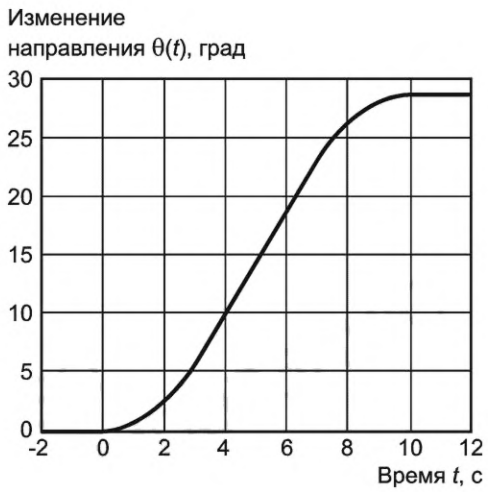


Рисунок 7 — Пример переходного процесса изменения направления

6.3.3.7 Экстремальный сдвиг воздушного потока (ЭСВ)

Экстремальный сдвиг воздушного потока должен объясняться с использованием нижеследующих переходных процессов скорости ветра. Сдвиг (положительный и отрицательный) по вертикали для неустановившейся скорости:

$$V(z,t) = \begin{cases} V_{hub}\left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{\alpha} \pm \left(\frac{z - z_{hub}}{D}\right)\left(2{,}5 + 0{,}2\beta\sigma_1\left(\frac{D}{\Lambda_1}\right)^{\frac{1}{4}}\right)\left(1-\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right) & \text{при} \quad 0 \le t \le T \\ V_{hub}\left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{\alpha} & \text{при} \quad t > T \text{ и } t < 0 \end{cases}. \tag{27}$$

Сдвиг по горизонтали для неустановившейся скорости:

$$V(y,z,t) = \begin{cases} V_{hub}\left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{\alpha} \pm \left(\frac{y}{D}\right)\left(2{,}5 + 0{,}2\beta\sigma_1\left(\frac{D}{\Lambda_1}\right)^{\frac{1}{4}}\right)\left(1-\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right) & \text{для} \quad 0 \le t \le T \\ V_{hub}\left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{\alpha} & \text{при} \quad t > T \text{ и } t < 0 \end{cases}, \tag{28}$$

где как для вертикального, так и для горизонтального сдвига α = 0,2; β = 6,4; T = 12 с, а σ_1 — определяют по формуле (10).

Знак для переходного процесса горизонтального сдвига воздушного потока выбирают так, чтобы произошло наихудшее горизонтальное нагружение переходного процесса. Два экстремальных сдвига воздушного потока не следует применять одновременно.

В качестве примера, экстремальный сдвиг воздушного потока (категория турбулентности А, z_{hub} = 30 м, V_{hub} = 25 м/с, D = 42 м) приведен на рисунке 8, где показаны профили ветра перед наступлением экстремального случая (t = 0 с) и при максимальном сдвиге (t = 6 с). Рисунок 9 показывает скорости ветра в верхней и нижней точках ветроколеса, чтобы проиллюстрировать процесс развития сдвига ветра во времени (условия, как для рисунка 8).



Рисунок 8 — Пример экстремального положительного и отрицательного вертикального сдвига ветра. Профиль ветра до начала сдвига (пунктирная линия) и при наибольшем сдвиге (сплошная линия)

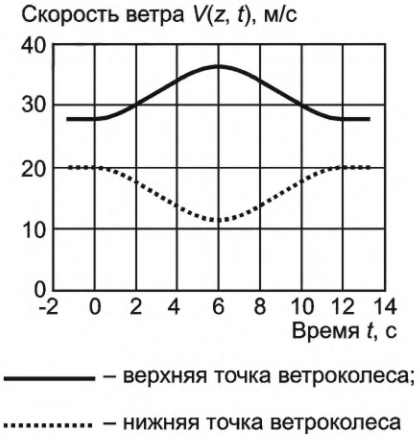


Рисунок 9 — Пример скоростей ветра в верхней и нижней точках ветроколеса, иллюстрирующий переходный положительный сдвиг

6.4 Прочие факторы окружающей среды

6.4.1 Общие требования

Кроме ветра, на целостность конструкции ВЭУ и ее безопасность могут оказывать воздействие также и другие факторы окружающей среды. К числу таких воздействий относятся: температурное, фотохимическое, коррозионное, механическое, электрическое и прочие физические и физико-химические воздействия. Кроме того, комбинация перечисленных факторов может увеличивать результирующее воздействие.

Минимальный набор внешних факторов, который должен быть учтен при проектировании:

- температура;
- влажность;
- плотность воздуха;
- солнечное излучение;
- дождь, град, снег, иней, гололед;
- наличие в окружающем воздухе химически активных веществ;
- наличие в окружающем воздухе механически активных частиц, запыленность;
- солевой туман;
- грозовая обстановка;
- потенциальная сейсмическая опасность.

Учитываемые климатические факторы должны быть определены в виде либо конкретных значений, либо с указанием пределов переменных состояний. При проектировании ВЭУ должна быть также учтена вероятность одновременного воздействия нескольких климатических состояний. В проектной документации должны быть указаны возможные результирующие воздействия всех учтенных факторов окружающей среды.

Для морских прибрежных условий следует учитывать дополнительные факторы окружающей среды (см. *[3]*). Факторы окружающей среды, учитываемые при проектировании ВЭУ класса СС для эксплуатации в зонах с холодным климатом, определены в разделе 14.

Изменения климатических факторов в пределах нормы, соответствующие периоду повторяемости один год, не должны вызывать нарушений расчетного нормального процесса эксплуатации ВЭУ.

Если взаимосвязь не существует, прочие экстремальные факторы окружающей среды в соответствии с 6.4.3 должны быть скомбинированы с факторами нормального режима ветра в соответствии

с 6.3.2. Общее описание, каким образом комбинировать расчетные случаи с внешними факторами, изложено в 7.4.

6.4.2 Нормальные значения прочих факторов окружающей среды

Нормальные значения прочих климатических факторов внешней среды, которые следует учитывать при проектировании:

- температура окружающей среды от минус 10 °С до плюс 40 °С;
- относительная влажность воздуха до 95 %;
- чистота атмосферы соответствует незагрязненной атмосфере над сушей (см. *[4]*);
- интенсивность солнечной радиации (энергетическая освещенность) 1000 Вт/м^2;
- плотность атмосферного воздуха 1,225 кг/м^3.

Если при проектировании ВЭУ учитывают также и другие внешние факторы, то характеризующие их параметры и их значения должны быть отражены в проектной документации и соответствовать требованиям (см. *[3]*).

6.4.3 Прочие экстремальные факторы окружающей среды

К числу прочих экстремальных факторов окружающей среды, которые должны быть рассмотрены при проектировании ВЭУ, относятся: экстремальные температуры, молнии, обледенение и потенциальная сейсмическая опасность.

6.4.3.1 Экстремальные температуры

Расчетными значениями экстремальных перепадов температур являются интервалы как минимум от минус 20 °С до плюс 50 °С для стандартных классов ВЭУ.

6.4.3.2 Молнии

Условия защиты от молний, приведенные в 10.7, являются достаточными для исполнений ВЭУ нормального класса безопасности.

6.4.3.3 Гололед

Для ВЭУ нормального класса требования по гололеду отсутствуют. Для холодного климата требования по гололеду установлены в разделе 14 и приложении *D*.

6.4.3.4 Потенциальная сейсмическая опасность

Для ВЭУ нормального класса требования по потенциальной сейсмической опасности отсутствуют. Оценка сейсмических условий на площадках размещения ВЭУ в случаях, когда они могут оказывать существенное влияние на эксплуатацию ВЭУ и безопасность, рассмотрена в 11.6 и приложении *E*.

6.5 Влияние сети подключения

Проектирование ВЭУ выполняют исходя из следующих нормальных условий на концевых кабельных муфтах:

- номинальное значение и нормальные диапазоны значений частоты в синхронной зоне ЕЭС и технологически изолированных территориальных электроэнергетических системах — по *ГОСТ Р 55890—2013, раздел 4*;
- напряжение — номинальное значение (в соответствии с *ГОСТ 29322*) ±10 %;
- частота — номинальное значение ±2 %;
- несимметрия напряжений — изменение составляющей обратной последовательности напряжения по отношению к составляющей прямой последовательности не должно превышать 2 %;
- циклы автоматического повторного включения — период цикла первого автоматического повторного включения от 0,1 до 5 с, второго — от 10 до 90 с;
- простои — количество отключений от сети — 20 в год. Нормальным следует считать отключение до 6 ч. Экстремальным следует считать отключение до одной недели.

Примечание — Отключение продолжительностью шесть часов принято исходя из продолжительности самой суровой части шторма.

7 Проектирование конструкции

7.1 Общие требования

При проектировании конструкции ВЭУ должны быть обеспечены требуемый уровень безопасности, целостность конструкции и прочность ее несущих элементов в заданном диапазоне нагрузок. Конструктивная целостность ВЭУ в заданных условиях и ее соответствие заданному уровню надежности

должны быть подтверждены расчетами и/или испытаниями на предельную и усталостную прочность элементов конструкции.

Расчет конструкций следует проводить в соответствии с *ГОСТ Р ИСО 2394*, в части, не противоречащей настоящему стандарту.

Расчеты выполняют в соответствии с установленными в настоящем стандарте методами. Описание методов расчета должно быть изложено в проектной документации. Описания должны включать доказательства обоснованности использованных методов расчета или содержать ссылки на соответствующие исследования и документы. Степень нагружения при любом испытании на прочность должна соответствовать коэффициентам запаса, принятым для нормативных нагрузок в соответствии с 7.6.

Резонансные колебания башни, ветроколеса и приводного механизма следует идентифицировать по диапазону частоты вплоть до 2-кратного возбуждения по частоте вращения лопастей, включительно. Возможные резонансные колебания должны быть исследованы на уровнях турбулентности 30 % МНТ подкласса С по турбулентности для РСН 1.2. При обнаружении высоких резонансных нагрузок при низкой турбулентности необходимо принять меры для исключения резонансов, либо необходимо их включить в расчетные нагрузки.

7.2 Методология проектирования

При проектировании ВЭУ должна быть обеспечена устойчивость ВЭУ ко всем возникающим в процессе эксплуатации предельным состояниям. Оборудование и конструкция ВЭУ должны обеспечивать заданные режимы эксплуатации под воздействием ветровых нагрузок, определяемых классом безопасности ВЭУ (см. таблицу 1), соответствовать климатическим характеристикам территории размещения и прочим параметрам окружающей среды, указанным в настоящем стандарте.

Для подтверждения прочности конструкции и ее соответствия требованиям *ГОСТ Р ИСО 2394* допускается использовать результаты испытаний — граничных, климатических, механических, на прочность, на устойчивость или натурных испытаний опытных образцов, а также результаты моделирования и макетных испытаний.

Проектные расчеты должны базироваться на утвержденных методиках и общепризнанных нормах.

Проектирование должно быть основано на аэроупругой модели, которую используют для конструкционных расчетов, после чего результаты подтверждают посредством измерений. Измерения проводят с образцами ВЭУ, которые динамически и конструкционно аналогичны спроектированной ВЭУ, но могут отличаться в деталях (как например, альтернативные проекты башни). Требования к измерению нагрузок см. в *[5].*

7.3 Нагрузки, учитываемые в расчетах

При проектировании должны рассматриваться как минимум нагрузки, описанные в 7.3.1—7.3.4.

7.3.1 Гравитационные и инерционные нагрузки

При проектировании ВЭУ должны быть учтены гравитационные и инерционные нагрузки — статические и динамические нагрузки, действующие на элементы конструкции ВЭУ и возникающие в результате действия силы тяжести, вибрации, вращения и сейсмической активности (или движения несущей конструкции).

Допустимые предельные гравитационные и инерционные нагрузки по вертикальной оси башни должны быть указаны в проектной документации и должны включать исходные и длительные воздействия, связанные с просадкой грунта. Расчет предельных гравитационных и инерционных нагрузок по вертикальной оси башни выполняют отдельно от расчета башни и фундамента на прочность.

7.3.2 Аэродинамические нагрузки

При проектировании ВЭУ должны быть учтены аэродинамические нагрузки — статические и динамические нагрузки, которые вызваны обтеканием воздушным потоком подвижных и неподвижных частей ВЭУ (в том числе башни и фундамента) и силовым взаимодействием воздушного потока с ними. В том числе следует рассматривать аэродинамическую нагрузку ветроколеса/ротора — составляющую аэродинамических сил, действующих на ветроколесо/ротор в направлении ветра.

Процесс обтекания воздушным потоком зависит от частоты вращения ветроколеса, средней скорости воздушного потока, протекающего через площадь, ометаемую ветроколесом, турбулентности, плотности воздуха, аэродинамических профилей поверхностей ВЭУ и их взаимодействия с воздушным потоком, включая аэроупругие эффекты.

При вертикальности башни, меньшей или равной 3°, расчет аэродинамических нагрузок для определения размерных допусков можно не проводить.

7.3.3 Эксплуатационные нагрузки

При проектировании ВЭУ должны быть учтены эксплуатационные нагрузки — нагрузки, возникающие в процессе работы ВЭУ вследствие управляющих воздействий на элементы и системы ВЭУ. Эти нагрузки включают:

- нагрузки, возникающие в процессе регулирования частоты вращения ветроколеса путем изменения вращающего момента за счет поворота лопастей или с помощью других аэродинамических устройств;
- усилия, развиваемые механическим тормозом, установленным в цепи привода;
- переменные нагрузки, возникающие во время пуска и останова ветроколеса;
- нагрузки, вызванные включением — выключением генератора и рысканием.

При расчете характеристик, реакций и нагрузок следует учитывать возможный диапазон изменения эксплуатационных нагрузок. В частности, для механических тормозов при определении реакций и нагрузок в любом процессе торможения должен быть принят во внимание диапазон изменения тормозных характеристик, сил сжатия пружин или давления, поскольку они зависят от температуры, степени износа и старения.

7.3.4 Прочие виды нагрузок

В расчетах также должны быть учтены нагрузки, обусловленные особыми условиями эксплуатации ВЭУ, например:

- нагрузки от волн (для ВЭУ, размещенных в море), аэродинамического следа, ударные, нагрузки, связанные с вихреобразующими вибрациями башни;
- нагрузки, связанные с обледенением (об остальных нагрузках, связанных с холодным климатом, см. раздел 14 и приложение *D*);
- нагрузки, возникающие при транспортировании, установке, монтаже, обслуживании и ремонте ВЭУ согласно 11.4.

7.4 Проектные ситуации и расчетные случаи нагружения

7.4.1 Общие требования

Данный подраздел описывает проектные ситуации и расчетные случаи нагружения ВЭУ и устанавливает их минимальное количество, которое должно быть рассмотрено при проектировании.

При проектировании ВЭУ ставится цель рассмотреть все наиболее важные проектные ситуации, которые возникают в процессе жизненного цикла ВЭУ.

Варианты нагружения должны быть определены комбинированием событий, возникающих в процессе эксплуатации ВЭУ (или прочих ситуаций, возникающих, например, во время сборки, возведения или технического обслуживания), с факторами окружающей среды.

Все варианты нагружения, ожидаемые с достаточной степенью вероятности, должны быть рассмотрены совместно с функционированием системы управления и защиты. Расчетные случаи нагружения (РСН), используемые для проверки структурной целостности ВЭУ, должны быть оценены для следующих проектных ситуаций:

- нормальных проектных ситуаций с соответствующими нормальными или экстремальными факторами внешней среды;
- ситуаций отказа с соответствующими факторами внешней среды;
- ситуаций транспортирования, установки и технического обслуживания с соответствующими факторами внешней среды.

Если существует взаимосвязь между экстремальным фактором внешней среды и ситуацией отказа, то комбинацию этих двух событий следует рассматривать как реальный проектный вариант нагружения и учитывать в расчетах.

Каждая проектная ситуация требует рассмотрения нескольких расчетных случаев нагружения. Минимальное количество расчетных случаев нагружения, которые должны быть рассмотрены в проекте, для каждой проектной ситуации приведено в таблице 2. В этой таблице расчетные случаи нагружения определены для каждой проектной ситуации в соответствии с режимами ветра, электрическими нагрузками и прочими факторами внешней среды.

Если при расчетном случае нагружения, описываемого заданной моделью ветра, система управления предусматривает контролируемый останов до момента достижения максимального угла рыскания и/или скорости ветра, то должно быть показано, что ВЭУ обеспечивает надежное выполнение останова при воздействии турбулентности с теми же самыми определенными изменениями параметров ветра.

Для обеспечения целостности конструкции ВЭУ, имеющих конструктивные особенности, которые не описываются указанными в настоящем стандарте расчетными случаями нагружения, должны быть проведены соответствующие дополнительные расчеты для всех возможных случаев критических нагрузок.

В таблице 2 для каждого расчетного случая нагружения установлен соответствующий ему вид расчета. «У» относится к случаям усталостного нагружения и обозначает расчет на усталостную прочность. «П» относится к расчетам по предельным нагрузкам и связан с прочностными характеристиками материалов, деформациями кромок лопастей, устойчивостью элементов конструкции.

Таблица 2 — Варианты расчетного нагружения

Проектная ситуация	РСН	Режим ветра (в соответствии с 6.3)	Прочие условия	Вид расчета	Частный коэффициент безопасности
1) Выработка электроэнергии	1.1	МНТ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Для экстраполяции экстремальных событий	П	Н
	1.2	МНТ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	—	У	*
	1.3	ЭМТ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	—	П	Н
	1.4	ЭКН $V_{hub} = V_r - 2$ м/с, V_r, $V_r + 2$ м/с	—	П	Н
	1.5	ЭСВ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	—	П	Н
2) Выработка электроэнергии в сочетании с отказом	2.1	МНТ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Отказ в системе управления или потеря электрической нагрузки, или отказ основного уровня функции управления (см. 7.4.3)	П	Н
	2.2	МНТ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Отказ системы управления или отказ, связанный с функцией защиты вторичного уровня (см. 7.4.3)	П	А
	2.3	ЭРП $V_{hub} = V_r \pm 2$ м/с и V_{out}	Отказы в системе управления, защиты, электрической сети, включая потерю электрической нагрузки	П	А
	2.4	МНТ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Отказ системы управления, повреждение в электрической сети или потеря электрической сети	У	*
	2.5	НПВ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Поддержание режима генерации при провале напряжения сети	П	Н
3) Включение	3.1	НПВ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	—	У	*
	3.2	ЭРП $V_{hub} = V_{in}$, $V_r \pm 2$ м/с и V_{out}	—	П	Н
	3.3	ЭИН $V_{hub} = V_{in}$, $V_r \pm 2$ м/с и V_{out}	—	П	Н

Окончание таблицы 2

Проектная ситуация	РСН	Режим ветра (в соответствии с 6.3)	Прочие условия	Вид расчета	Частный коэффициент безопасности
4) Нормальный останов	4.1	НПВ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	—	У	*
	4.2	ЭРП $V_{hub} = V_r \pm 2$ м/с и V_{out}	—	П	Н
5) Аварийный останов	5.1	МНТ $V_{hub} = V_r \pm 2$ м/с и V_{out}	—	П	Н
6) Парковка (останов или холостой ход)	6.1	МЭВ 50-летний период повторяемости	—	П	Н
	6.2	МЭВ 50-летний период повторяемости	Отсоединение от сети	П	А
	6.3	МЭВ 1-летний период повторяемости	Рассогласование ориентации на ветер	П	Н
	6.4	МНТ $V_{hub} < 0{,}7V_{ref}$	—	У	*
7) Парковка и отказ	7.1	МЭВ 1-летний период повторяемости	—	П	А
8) Транспортирование, сборка, техническое обслуживание и ремонт	8.1	МНТ V_{maint} должна быть определена производителем	—	П	Н
	8.2	МЭВ 1-летний период повторяемости	—	П	А

Примечания

1 Условие $V_r \pm 2$ м/с говорит о том, что необходимо проанализировать чувствительность ко всем скоростям ветра.

2 Обозначения:

У — расчет на усталостную прочность (см. 7.6.3);

П — расчет по предельным нагрузкам (см. 7.6.2);

V_{maint} — расчетная скорость ветра при техническом обслуживании.

3 Частный коэффициент безопасности по усталости (см. 7.6.3) обозначен*.

Для ВЭУ, имеющих конструктивные особенности, с целью обеспечения принципа целостности конструкции должны быть рассмотрены соответствующие случаи расчетного нагружения.

Расчетные случаи нагружения, относящиеся к случаям расчета по предельным нагрузкам, подразделяют на нормальные (Н) и аварийные (А). В настоящем стандарте принято, что нормальные варианты расчетной нагрузки воздействуют на ВЭУ часто в течение ее жизненного цикла. Считается, что ВЭУ в процессе эксплуатации находится в нормальном рабочем состоянии. Допускаются незначительные отказы или поломки. Возникновение аварийного расчетного случая рассматривается как более редкое событие. Аварии обычно связаны со случаями возникновения серьезных отказов, которые приводят к активации функций системы защиты. Вид расчетной нагрузки: Н или А — определяет величину частного коэффициента безопасности γ_f для расчета предельной нагрузки. Эти коэффициенты приведены в 7.6.2.2.

В процессе проектирования должны быть рассмотрены скорости ветра из диапазонов, установленных в таблице 2, приводящие к наиболее опасному случаю нагружения ВЭУ. Диапазон скоростей ветра рекомендуется представлять рядом дискретных величин с интервалами, обеспечивающими необходимую точность вычислений (в большинстве случаев приемлемы интервалы в 2 м/с).

7.4.2 Проектная ситуация «Выработка электроэнергии» (РСН 1.1—1.5)

Данная проектная ситуация соответствует режиму: ветроколесо/ротор вращается, ВЭУ работает и подключена к электрической нагрузке. В расчетной схеме следует учесть дисбаланс ветроколеса/ротора. Максимальный дисбаланс массы ветроколеса\ротора и аэродинамическая неуравновешенность (например, шаг лопастей и различие их углов поворота), указанные производителем, должны быть учтены в расчетах.

При расчетах эксплуатационных нагрузок должны быть приняты во внимание и отражены в расчетах отклонения от оптимальных теоретических эксплуатационных случаев, например рассогласование углов рыскания и ошибки системы управления при выполнении функции слежения.

РСН 1.1 и 1.2 включают нагрузки, исходя из турбулентности атмосферы, которая сопровождает процесс нормальной эксплуатации ВЭУ в течение срока ее службы.

РСН 1.3 включает требования к предельным нагрузкам, которые обусловлены экстремальными параметрами турбулентности. РСН 1.4 и 1.5 относятся к переходным процессам, которые были отобраны как потенциально опасные случаи, возникающие в процессе эксплуатации.

Статистический расчет данных моделирования РСН 1.1 (см. 7.6.2.2 и приложение *F*), должны включать как минимум расчет экстремальных значений изгибающих моментов, возникающих в привтулочной части лопасти, и величину изгиба на вершине лопасти ветроколеса. Если экстремальные расчетные значения этих параметров меньше экстремальных расчетных значений, полученных для РСН 1.3, дальнейший анализ РСН 1.1 может быть опущен.

Если экстремальные расчетные значения этих параметров не превышены экстремальными расчетными значениями, полученными для РСН 1.3, то параметр *c* в уравнении (20) для экстремальной модели турбулентности в РСН 1.3 рекомендуется увеличить для выполнения условия равенства или превышения экстремальных расчетных значений параметров, вычисленных в РСН 1.1, экстремальными расчетными значениями в РСН 1.3. Нормативные значения нагрузок, соответствующих другим компонентам ВЭУ, могут быть определены из этого анализа на основании РСН 1.3 с увеличенным значением *c*. В качестве альтернативы этому анализу, надлежащие нормативные значения всех составляющих нагрузки, соответствующих каждому конкретному компоненту ВЭУ, могут быть напрямую определены или экстраполированы из моделирования.

7.4.3 Проектная ситуация «Выработка электроэнергии в сочетании с отказом» (РСН 2.1—2.5)

7.4.3.1 Общие требования

В данной проектной ситуации рассматривают переходные процессы, вызванные отказом или потерей электрической сети, во время выработки ВЭУ электроэнергии. Важным событием для нагружения ВЭУ, подлежащим рассмотрению, является любой отказ в системе управления и защиты или отказ в собственной электрической схеме (например, короткое замыкание в цепи генератора). Такие события считаются также обязательными для анализа, см. РСН 2.4.

Следует выполнить анализ видов и последствий отказов (FMEA), или эквивалентный анализ неисправностей для определения проявлений неисправности, уместных для нагружения ВЭУ.

Азимут ветроколеса во время неисправности может оказывать существенное влияние на уровень нагружения. Положение азимута во время возникновения неисправности должно быть случайным.

Отказы в системе управления относятся к РСН 2.1 и 2.2, описанным в 7.4.3.2. Для конструкций ВЭУ, в которых безопасность обеспечивается двумя независимыми наборами функций (через основной уровень управления и вторичный уровень защиты), можно использовать методику, приведенную в 7.4.3.3.

Примечание — В качестве руководства по идентификации режимов отказа, оценке периодов повторяемости режимов отказа, исключения отказов, а также мер во избежание отказов по общим причинам см. раздел 8.

7.4.3.2 Отказ системы управления (РСН 2.1 и 2.2). Количественный подход

РСН 2.1 соответствует следующим случаям:

a) возникновение отказа, связанного с выполнением функций управления, имеющего ожидаемый период повторяемости режима отказа, равный или меньше периода в 50 лет;

b) возникновение отказа, связанного с выполнением функций управления, для которого ожидаемого периода повторяемости режима отказа достичь невозможно;

c) потеря связи с электрической сетью.

Для событий с ожидаемыми периодами повторяемости режима отказа в рамках между 10 и 50 годами применяемый коэффициент неполной нагрузки представляет собой функцию периода повторяемости режимов отказа, указанных в 7.6.2.2.

Для РСН 2.2 следует рассматривать как аварийные такие редкие события, как отказы реализации функций системы управления или отказы во внутренних электрических и механических системах с периодом повторяемости режима отказа свыше 50 лет.

Отказы с периодом повторяемости свыше 20 лет и проявления неисправности, неуместные для нагруженности ВЭУ, можно не учитывать. Период повторяемости проявления неисправности базируется на статистическом расчете вероятности события, в результате которого возникает отказ части си-

стемы управления или внутренней электрической системы, либо она входит в такое состояние, при котором возможно возникновение отказа элемента конструкции.

7.4.3.3 Отказ системы управления (РСН 2.1 и 2.2). Двухуровневый подход

Данный подход может использоваться для архитектур системы управления, состоящих из двух или более уровней. В рамках данного подхода:

a) основной уровень управления и основной уровень защиты поддерживают рабочие параметры ВЭУ в пределах нормальной эксплуатации и их расчетных пределах, соответственно, и

b) вторичный уровень управления и вторичный уровень защиты поддерживают рабочие параметры ВЭУ в их расчетных пределах. Данные функции должны активироваться в результате отказа функций управления основного уровня или в результате последствий внутреннего или наружного отказа, или сопряженного с опасностью события.

РСН 2.1 включает случаи отказов функции управления основного уровня, активации функций защиты основного уровня или потери соединения с сетью. Отказы функций управления, которые приводят к превышению параметрами ВЭУ установленных пределов и активации функций защиты вторичного уровня, должны быть включены в РСН 2.2.

Отказы функций управления основного уровня, учитываемые в РСН 2.1, как правило, включают в себя отказы, относящиеся к оборотам ветроколеса, углу рыскания и установочному углу лопасти.

РСН 2.2 соответствует редким аварийным события, имеющим отношение к нагружению ВЭУ, включая отказы, относящиеся к активации функций защиты вторичного уровня. Такие отказы могут включать в себя ошибочную активацию приводов, невключение тормозных систем и блокировку системы установки угла лопастей. Данный расчетный случай нагружения должен как минимум касаться следующего: независимой защиты от превышения частоты вращения, защиты от перегрузки/отказа генератора, защиты от неконтролируемого шага лопасти (разноса шага лопасти), защиты от неконтролируемого рыскания и избыточной вибрации или противоударной защиты.

7.4.3.4 Прочие проектные ситуации выработки электроэнергии в сочетании с возникновением отказа или потерей связи с электрической сетью (РСН 2.3—2.5)

При РСН 2.3 потенциально опасный режим ветра, ЭРП, рассматривается вместе с отказом собственной или внешней электрической сети (включая потерю связи с электрической сетью). Данный случай рассматривается как аварийный; время возникновения этих двух событий должно быть выбрано таким образом, чтобы рассмотреть в расчете наихудший случай нагружения.

В качестве альтернативы описанного выше варианта РСН 2.3 и в таблице 2 РСН 2.3 может, наоборот, рассматриваться как нормальное событие (например, частный коэффициент безопасности для нагрузки 1,35), которое необходимо проанализировать с использованием стохастических ветровых моделей (МНТ — $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$) в сочетании с отказом внутренней или внешней электрической системы, включая потерю связи с электрической сетью. В этом случае должно быть выполнено 12 имитаций реакции для каждой рассматриваемой средней скорости ветра. Для каждого моделирования отклика выбирают экстремальный отклик после возникновения электрического повреждения. Неисправность должна быть введена после того, как влияние начальных условий станет незначительным. Для каждой средней скорости ветра номинальная экстремальная реакция оценивается как среднее из 12 выбранных экстремальных реакций плюс трехкратная стандартная реакция. Нормативное значение отклика для РСН 2.3 определяется как крайнее значение среди номинальных крайних значений реакции.

Если отказ или потеря электрической связи с сетью не вызывают немедленной остановки ВЭУ, а следующее в результате этого дальнейшее нагружение может привести к существенному усталостному повреждению, то вероятная продолжительность этого случая наряду с получающимся усталостным повреждением при нормальных параметрах турбулентности должна быть рассмотрена в РСН 2.4. Изготовитель должен оценить ожидаемую частоту/продолжительность указанных событий.

Примечание — Если соответствующие данные/информация отсутствуют, для перечисленных событий можно применять следующую частоту/продолжительность:

- 10 остановов в год по проявлению превышения скорости;
- 24 часа в год эксплуатации для проявлений ошибок по рысканию;
- 24 часа в год эксплуатации для проявлений ошибок по шагу лопасти;
- 20 раз в год применительно к потере электрического соединения.

Для РСН 2.5 поддержание режима генерации при провале напряжения сети считается нормальным событием. Расчетное проявление непрерывного низкого напряжения должно быть обусловлено перепадом напряжения и продолжительностью.

Примечание — Случаи поддержания режима генерации при провале напряжения сети нормально определяются электроэнергетическими компаниями как случаи сетевых возмущений или отказов, с которыми ВЭУ должна общаться без проведения остановов. Причина такого требования заключается в том, что при проведении останова ВЭУ (особенно в условиях ветропарков) это может вызвать неисправности сети.

7.4.4 Проектная ситуация «Включение» (РСН 3.1—3.3)

Эта проектная ситуация включает все события, приводящие к нагружению ВЭУ в течение переходных процессов из неподвижного (заторможенного) состояния или состояния покоя (парковки) до момента начала выработки электроэнергии. Число расчетных случаев должно основываться на особенности функционирования системы управления.

Примечание — Если хронологические данные по включениям аналогичных ВЭУ отсутствуют, можно предложить следующие годовые частоты для РСН 3.1:

- 1000 процедур включения при V_{in};
- 50 процедур включения при V_r;
- 50 процедур включения при максимальной стартовой скорости ветра.

Для РСН 3.2 для каждой скорости ветра должно учитываться не менее четырех хронологических событий между ЭРП и событием включения. Первая установка времени выбирается таким образом, чтобы начало ЭРП происходило в момент достижения производства электроэнергии на уровне 50 % максимальной мощности. Последняя установка времени выбирается таким образом, чтобы начало ЭРП происходило в момент достижения выработки электроэнергии на уровне 95 % максимальной мощности. Необходимо выполнять не менее двух установок времени, с равномерным распределением в интервале от 50 % до 95 % максимальной мощности.

Для каждой скорости ветра нормативное значение нагрузки рассчитывается как среднее значение экстремального расчетного переходного значения для четырех четко определенных моментов времени.

В качестве альтернативы порыву ветра ЭРП взамен можно проанализировать РСН 3.2 с использованием не менее 12 стохастических ветровых моделей для каждой средней скорости ветра с ЭМТ. Для каждой средней скорости ветра номинальная экстремальная реакция оценивается как средняя из смоделированных экстремальных реакций.

7.4.5 Проектная ситуация «Нормальный (контролируемый) останов ВЭУ» (РСН 4.1, 4.2)

Эта проектная ситуация включает все события, приводящие к нагружению ВЭУ в течение нормальных переходных процессов с момента окончания выработки электроэнергии до заторможенного состояния (неподвижного) или состояния покоя (парковки). Число расчетных случаев, включенных в проект, должно основываться на особенности функционирования системы управления.

Примечание — Если хронологические данные по включениям аналогичных ВЭУ отсутствуют, можно предложить следующие годовые частоты для РСН 4.1:

- 1000 процедур останова при V_{in};
- 50 процедур останова при V_r;
- 50 процедур останова при V_{out}.

Для РСН 4.2 установка времени порыва ветра события останова должна выбираться таким образом, чтобы порыв ветра ЭРП начинался в отличное от останова время, как минимум с шестью равномерно распределенными событиями от 10 с перед началом останова до достижения мощности 50 % от исходного уровня выработки электроэнергии.

Для каждого четкого момента времени должно применяться не менее четырех равномерно распределенных позиций азимута ветроколеса. Для каждой скорости ветра нормативное значение нагрузки рассчитывается как среднее значение экстремальных расчетных нагрузок среди учитываемых установок времени и положений азимута.

Если за счет системы безопасности управления событие останова автоматически запускается во время порыва ветра ЭРП, то такое событие также должно приниматься в расчет при анализе.

В качестве альтернативы порыву ветра ЭРП взамен можно проанализировать РСН 4.2 с использованием не менее 12 стохастических ветровых моделей для каждой средней скорости ветра с ЭМТ. Для каждой средней скорости ветра номинальная экстремальная реакция оценивается как средняя из смоделированных экстремальных реакций.

7.4.6 Проектная ситуация «Аварийный останов ВЭУ» (РСН 5.1)

При данной проектной ситуации рассматривают нагрузки, возникающие в процессе аварийного останова.

Азимутальное положение ветроколеса во время аварийного останова может иметь значительное влияние на уровень нагрузки. При расчетах рассматривают совместную вероятность неисправности, связанную с азимутальным положением и характеристиками ветра. Азимутальное положение во время аварийного останова выбирают таким образом, чтобы иметь возможность рассчитать максимальную нагрузку.

7.4.7 Проектная ситуация «Парковка (останов или холостой ход)» (РСН 6.1—6.4)

При данной проектной ситуации ветроколесо запаркованной ВЭУ либо неподвижно, либо совершает холостой ход (вращается, не вырабатывая электроэнергии). В РСН 6.1, 6.2 и 6.3 такие ситуации должны рассматриваться на основе модели экстремальной скорости ветра. Для РСН 6.4 должна быть рассмотрена нормальная модель турбулентности.

Для РСН, которые соответствуют МЭВ, допускается использовать как модель экстремального стационарного ветрового потока, так и турбулентную модель экстремальной скорости ветра. Если используется турбулентная модель экстремальной скорости ветра, то характеристики должны быть определены на основе полномасштабного динамического моделирования или квазистатического анализа с соответствующими поправками для порывов и динамических реакций (см. *[6]).* Если используется модель экстремального стационарного ветрового потока, то воздействия резонансных характеристик должны быть определены методами квазистатического анализа, представленного выше. Если отношение резонансных характеристик к фоновым не превышает 5 %, то рекомендуется использовать статический анализ на основе модели экстремального стационарного ветрового потока.

Если конструкция системы установки на ветер (рыскания) допускает возникновение рассогласования при воздействии нормативной нагрузки, к среднему значению рассогласования следует добавить наибольшее возможное неблагоприятное рассогласование. Если ВЭУ имеет систему установки на ветер, которая допускает вращение при экстремальных ветровых режимах (например, свободное вращение, пассивная установка на ветер или полусвободное вращение), то рассогласования в механизме установки на ветер будут определяться турбулентными изменениями направления ветра и динамическими характеристиками механизма установки на ветер, и следует использовать турбулентную модель ветра. В расчете должны быть рассмотрены ситуации, при которых ВЭУ испытывает существенные отклонения от положения равновесия или под воздействием ветра (в диапазоне от нормальной рабочей скорости до экстремальной скорости) изменяется ее состояние равновесия.

В РСН 6.1 для ВЭУ с активной системой управления рысканием рассогласование установки на ветер должно быть принято в диапазоне ±15° (для модели экстремального стационарного ветрового потока) или ±8° (для турбулентной модели экстремальной скорости ветра), если можно обеспечить ограничение несовпадения оси ветроколеса с направлением скорости ветра.

В РСН 6.2 должен быть рассмотрен случай отключения ВЭУ от электрической нагрузки в начале грозы, имеющей экстремальные параметры ветра. Если резервное питание не обеспечивает работу системы управления, системы установки на ветер и выравнивание по ветру в течение как минимум 6 часов, то должно быть рассмотрено воздействие от изменения направления ветра в диапазоне ±180°.

Частные коэффициенты безопасности нагрузок для РСН 6.1 и 6.2 в 7.6.2.2 получают исходя из предположения, что коэффициент вариации годовой максимальной скорости ветра меньше 15 %.

Примечание — Если коэффициент вариации годовой максимальной скорости CV больше 15 %, частные коэффициенты безопасности для РСН 6.1 и РСН 6.2 должны быть линейно увеличены на коэффициент η от 1,0 при CV = 15 % до 1,15 при CV = 30 %. Если $\eta > 1{,}0$, при оценке целостности конструкции можно использовать скорректированное значение предельной средней скорости ветра за 10 мин $\tilde{V}_{50} = V_{50}\sqrt{\eta}$, см. *приложение ДА, ДА.9* и *ДА.10*. Коэффициент вариации годовой максимальной скорости ветра можно получить аппроксимацией, используя распределение Гумбеля и предположив, что доступны значения скорости ветра, например за 50 и 100 лет, V_{50} и V_{100}:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot \frac{1}{\frac{\beta}{\alpha} + 0{,}5772}. \qquad (29)$$

Параметры α и β получают, используя формулы:

$$\alpha = \frac{V_{100} - V_{50}}{p_{100} - p_{50}}, \quad \beta = V_{50} - \alpha p_{50} \quad \text{при } p_{100} = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{100}\right)\right) \text{ и } p_{50} = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{50}\right)\right). \qquad (30)$$

В РСН 6.3 должен быть рассмотрен экстремальный ветер с периодом повторяемости один год при максимальном рассогласовании установки на ветер. При использовании модели экстремального стаци-

онарного потока воздуха должно быть принято максимальное рассогласование установки на ветер до ±30°, для турбулентной модели экстремальной скорости ветра — ±20°.

Если в случаях РСН 6.1 со стабильной экстремальной моделью ветра, РСН 6.2 и 6.3 рассогласование установки на ветер оценивается с использованием дискретных значений, приращение при рассогласовании установки на ветер не должно превышать 10° в секторе максимальной подъемной силы на лопастях.

В РСН 6.4 должно быть определено ожидаемое число часов простоя (отсутствия выработки энергии), когда под воздействием переменных нагрузок, вызванных соответствующим воздействием ветра (например, от веса вращающихся вхолостую лопастей), может возникнуть существенное усталостное повреждение в каком-либо из элементов конструкции.

7.4.8 Проектная ситуация «Парковки в сочетании с отказом» (РСН 7.1)

Эта проектная ситуация включает отклонения от нормального поведения запаркованной ВЭУ, последовавшие в результате отказов электрической сети или самой ВЭУ. Если какой-либо отказ в сети подключения, исключая ситуацию отключения от сети, вызывает отклонения от нормального поведения ВЭУ в состоянии парковки, то возможные последствия должны быть предметом анализа. Состояния отказа должны быть рассмотрены МЭВ для периода повторяемости ветра один год. Режимы ветра МЭВ должны соответствовать либо турбулентной модели, либо квазистатической с соответствующими поправками на порывы и динамические характеристики.

В случае отказа в системе установки на ветер должно быть рассмотрено рассогласование ±180°. Если рассогласование установки на ветер оценивается с использованием дискретных величин, то приращение при рассогласовании установки на ветер не должно превышать 10° в секторе максимальной подъемной силы на лопастях. Для прочих отказов рассогласование установки на ветер должно соответствовать РСН 6.1.

Если рассогласование в системе управления рысканием может произойти при воздействии нормативной нагрузки (РСН 7.1), то должно быть принято в расчет возможное наиболее неблагоприятное рассогласование.

7.4.9 Проектная ситуация «Транспортирование, сборка, техническое обслуживание и ремонт» (РСН 8.1, 8.2)

Для РСН 8.1 изготовитель должен указать все климатические параметры и расчетные случаи, допустимые при транспортировании, установке, сборке в полевых условиях, техническом обслуживании и ремонте ВЭУ. Максимальные установленные параметры ветра должны быть рассмотрены при проектировании, если они приводят к существенному нагружению ВЭУ. Для обеспечения приемлемого уровня безопасности изготовитель должен предусмотреть достаточный резерв между установленными и принятыми при проектировании величинами параметров ветра. Рекомендуется к установленной величине скорости ветра добавить 5 м/с для обеспечения резерва.

РСН 8.2 должен включать все состояния ВЭУ при транспортировании, сборке, техническом обслуживании и ремонте, продолжительность которых превышает одну неделю. В соответствии с этим должны быть рассмотрены случаи, когда:

- несущая конструкция башни возведена не полностью;
- возведена несущая конструкция без гондолы;
- на возведенной ВЭУ установлено неполное количество лопастей ветроколеса.

В случае несущей конструкции башни без гондолы необходимо использовать надлежащие средства, чтобы избежать критических скоростей ветра в результате порожденных вихрем поперечных вибраций, или необходимо добавить расчетный случай усталостного нагружения. Предполагается, что электрическая сеть в любом из этих случаев отключена. Рекомендуется принять меры для уменьшения нагрузок в любом из перечисленных выше случаев до подключения ВЭУ к электрической сети.

Примечание — Руководство по башенным нагрузкам в результате вихреобразующих вибраций приведено в *[7]*.

Блокировочные устройства должны выдерживать нагрузки, являющиеся результатом случая РСН 8.1. Блокировочные устройства без резервирования должны быть спроектированы по классу компонентов 3. В частности, должно быть принято во внимание воздействие максимальных расчетных эксплуатационных нагрузок. Если необходимо использование подъемных приспособлений, рекомендуется дополнительно применять стандарты для подъемных приспособлений, включая коэффициенты безопасности/факторы воздействия. Если не установлено на постоянной основе, подъемное приспо-

собление само по себе не рассматривается в настоящем стандарте и должно быть спроектировано и испытано по соответствующим стандартам для подъемных приспособлений.

7.5 Расчет нагрузок

Нагрузки, описанные в 7.3.1—7.3.4, должны быть рассмотрены для каждого РСН. В соответствующих случаях необходимо принять во внимание:

- возмущения поля скоростей ветра, вызванные работой самих ВЭУ (эффекты аэродинамического следа, «затенение» башней и т. д.);
- влияние пространственного потока на аэродинамические характеристики лопасти (например, трехмерный срыв потока и аэродинамические концевые потери);
- нестационарные аэродинамические процессы;
- динамику конструкции и ее собственные колебания;
- аэроупругие эффекты;
- особенности функционирования системы управления и защиты ВЭУ.

Для расчета нагрузок, действующих на элементы конструкции ВЭУ, обычно используется моделирование на основе подобной динамической модели. Некоторые варианты нагружения используют в качестве исходных данных о турбулентном воздействии ветра. Для таких вариантов полное количество данных, соответствующих продолжительности нагружения, должно быть достаточно большим, чтобы гарантировать статистическую надежность расчета нормативной нагрузки. Для расчета каждого среднего значения при минимальном количестве данных, удовлетворяющих этому условию, являются данные шести 10-минутных стохастических интервалов или данные за непрерывный 60-минутный период, при этом для моделирования используется скорость ветра, измеренная на высоте оси ветроколеса. Для каждого случая при данной скорости ветра в РСН 2.1, 2.2 и 5.1 должно быть выполнено не менее 12 испытаний.

Так как начальные условия, используемые при динамическом моделировании, обычно оказывают влияние на статистику нагружения в начале испытания, то данные, полученные в течение первых 5 с (или более, в случае необходимости), должны быть исключены из рассмотрения для любого интервала исходных данных при исследовании турбулентности.

Необходимо гарантировать, чтобы во время применения счета цикла временного ряда нагружения остатки от каждого временного ряда учитывались по полуциклам для оценки усталостного режима отказа. Кроме того, получение достаточного решения должна обеспечивать дискретизация диапазона нагрузок.

При использовании турбулентных ветров для динамического моделирования следует обращать внимание на разрешающую способность сетевой модели в отношении пространственного и временного разрешения.

Примечание — Относительно пространственного разрешения максимальное расстояние между примыкающими точками должно составлять менее 25 % Λ_1 [формула (5)] и не более 15 % диаметра ветроколеса. Подразумевается, что данное расстояние представляет собой расстояние по диагонали между точками в каждой ячейке сетки, определяемой четырьмя точками. В случае неравномерно распределенной сетки среднее значение над поверхностью ветроколеса между ячейками сетки может рассматриваться как представительное пространственное разрешение, но данное расстояние, как правило, уменьшается по направлению к кромке лопасти.

В тех случаях, когда местные нагрузки или напряжения в критических сечениях рассматриваемых элементов ВЭУ обусловлены совместным нагружением пространственной системы сил, для точного определения расчетных нагрузок допускается использовать временные ряды ортогональных нагрузок, полученные в результате моделирования. Когда такие ортогональные составляющие временных рядов используются для вычисления усталостных и предельных нагрузок, они объединяются с сохранением как направления, так и величины. Таким образом, прямой метод основан на получении достоверного напряжения как временной диаграммы нагружения. Затем этот единственный параметр используется в проектных расчетах экстремальных и усталостных нагрузок, что позволяет избежать расчетов комбинированных нагрузок.

Составляющие предельной нагрузки также допускается объединять традиционным методом при условии, что экстремальные величины составляющих нагрузки возникают одновременно. В случае, если преследуется эта опция, и минимальные, и максимальные значения составляющих должны применяться во всех возможных комбинациях во избежание возникновения неустойчивости.

Определение экстремальных расчетных нагрузок при нескольких одновременных нагрузках приведено в приложении *G*.

7.6 Расчет предельной прочности

7.6.1 Метод

7.6.1.1 Общие требования

Метод расчета предельной прочности основан на использовании частных коэффициентов безопасности. Частные коэффициенты безопасности учитывают неопределенность, непостоянство прикладываемых нагрузок и свойств материалов, различного рода погрешности, неполное соответствие расчетных моделей и методов расчета, степень ответственности несущих элементов конструкции и последствия отказов.

Для расчета ВЭУ по предельным состояниям в соответствующих случаях должны быть выполнены следующие четыре вида расчетов:

- расчет предельной прочности (см. 7.6.2);
- расчет усталостной прочности (см. 7.6.3);
- расчет на устойчивость (прогибы и т. д.) (см. 7.6.4);
- проверка критических деформаций (зазор между лопастью и башней и т. д.) (см. 7.6.5).

Каждый тип расчета устанавливает свои зависимости для описания предельного состояния и имеет дело с различными видами неопределенностей и неточностей, учитываемых с помощью частных коэффициентов безопасности.

7.6.1.2 Частные коэффициенты безопасности для нагрузок и сопротивлений

Расчетные значения нагрузок и сопротивлений определяют с помощью частных коэффициентов безопасности по нагрузкам и сопротивлениям в соответствии с формулами:

$$F_d = \gamma_f F_k, \tag{31}$$

$$R_d = \frac{1}{\gamma_M} R_k, \tag{32}$$

где F_d — расчетное значение суммарной внутренней нагрузки или реакция, возникающая внутри рассматриваемого элемента конструкции в результате одновременного воздействия всех составляющих внешней нагрузки для рассматриваемого варианта нагружения;

γ_f — частный коэффициент безопасности по нагрузкам;

F_k — нормативное значение нагрузки;

R_d — расчетная величина, учитывающая свойства материала (сопротивления), см. приложение *H*;

γ_M — частные коэффициенты безопасности для материалов (сопротивлений), учитывающие неопределенности значений параметров материалов и неопределенности в моделях сопротивления, см. приложение *H*;

R_k — нормативное значение свойств сопротивлений, включая влияния длительности воздействия нагрузки, влияния масштабных факторов и т. п., учитываемые посредством переводного коэффициента, см. приложение *H*.

Частные коэффициенты безопасности по нагрузкам, используемые в настоящем стандарте, учитывают:

- возможные неблагоприятные отклонения/неточности в определении нагрузок по сравнению с нормативной величиной;
- неполное соответствие расчетной модели нагрузки.

Частные коэффициенты безопасности по сопротивлению γ_M, используемые в настоящем стандарте, как и в *ГОСТ Р ИСО 2394*, учитывают:

- возможные негативные отклонения/погрешности прочностных характеристик материала по сравнению с нормативными характеристиками;
- возможную неточность оценки сопротивления расчетных сечений или несущей способности нагруженных элементов конструкции;
- погрешности геометрических размеров;
- несоответствие свойств материала элемента конструкции свойствам материала, полученным в результате испытаний опытных образцов;
- погрешности переводных коэффициентов.

В некоторых случаях перечисленные выше неточности и неопределенности учитываются по отдельности, но в данном стандарте, как и во многих других, коэффициенты, относящиеся к нагрузкам, объединены в один коэффициент γ_f, а относящиеся к сопротивлениям — в γ_M. Значения γ_f и γ_M даны в 7.6.2—7.6.5. Однако эти значения могут быть заменены, если документально подтверждено, что допущения, приводящие к этим значениям, являются заниженными, и в этом случае может быть проведена калибровка коэффициентов запаса прочности по нагрузке и материалам для соответствия уровню безопасности, установленному в настоящем стандарте.

Примечание — В приложении *Н* представлено руководство по проверке частных коэффициентов безопасности для материалов.

7.6.1.3 Частный коэффициент безопасности по назначению

Частный коэффициент безопасности по назначению γ_n учитывает последствия отказа и степень ответственности элемента конструкции. Данный коэффициент зависит от класса рассматриваемого элемента:

- элементы 1-го класса: к данному классу относятся безопасные элементы конструкции, отказ которых не приводит к отказу основных частей ВЭУ, например заменяемые подшипники, находящиеся под контролем системы управления;
- элементы 2-го класса: к данному классу относятся «непредохраняемые» элементы конструкции, отказы которых могут привести к отказу основных частей ВЭУ;
- элементы 3-го класса: к данному классу относятся «непредохраняемые» механические элементы, которые связывают приводы и тормоза с главными элементами конструкции без резервирования функций защиты ВЭУ. Данные о блокировочных устройствах см. в 7.4.9.

Частные коэффициенты безопасности, учитывающие последствия отказа:

- элемент класса 1: $\gamma_n = 0{,}9$;
- элемент класса 2: $\gamma_n = 1{,}0$;
- элемент класса 3: $\gamma_n = 1{,}2$.

Последовательности интенсивности отказа должны быть включены в контрольную нагрузку, как, например, полномасштабные испытания лопастей.

Остальные значения γ_n применяются для расчета критической деформации (см. 7.6.5).

7.6.1.4 Применение общепризнанных стандартов и нормативов для материалов

При определении структурной целостности элементов ВЭУ можно использовать национальные или международные стандарты проектирования для соответствующего материала. Особую осторожность следует проявить при совместном использовании частных коэффициентов безопасности, установленных в национальных или международных стандартах, и частных коэффициентов безопасности настоящего стандарта. При проектировании ВЭУ необходимо обеспечить уровень безопасности не ниже установленного настоящим стандартом.

Различные стандарты подразделяют частные коэффициенты безопасности для сопротивления γ_M на несколько составляющих коэффициентов, учитывающих различные типы неопределенности свойств материалов, например, естественную нестабильность прочностных характеристик, методы промышленного контроля или способ получения заготовки. Частные коэффициенты безопасности для материалов, приведенные в настоящем стандарте, соответствуют так называемым «главным частным коэффициентам безопасности для материалов», учитывающим естественную нестабильность прочностных характеристик. Если используемый стандарт устанавливает специальные частные коэффициенты безопасности или использует уменьшенные их значения, чтобы учесть прочие неопределенности, это следует учесть при выполнении расчетов.

Отдельные стандарты для проверочных расчетов могут устанавливать другие соотношения частных коэффициентов безопасности по нагрузкам и материалам. Разделение коэффициентов в настоящем стандарте установлено по *ГОСТ Р ИСО 2394* и *ГОСТ 12.2.007.0*. Если разделение коэффициентов в выбранном стандарте имеет отклонение от *ГОСТ Р ИСО 2394* и *ГОСТ 12.2.007.0*, то должны быть выполнены необходимые поправки для коэффициентов, установленных в выбранном стандарте, при выполнении проверочных расчетов согласно данному стандарту.

7.6.2 Расчет предельной прочности

7.6.2.1 Общие требования

Предельное состояние оценивают через функции нагрузки *S* и сопротивления *R* из условия:

$$\gamma_n \cdot S(F_d) \le R_d. \qquad (33)$$

Функцию S при расчете предельной прочности принимают равной предельному значению реакции конструкции, т. е. $S(F_d) = F_d$. И формула (33) приобретает вид:

$$\gamma_n \gamma_f F_k \le \frac{1}{\gamma_M} R_k. \quad (34)$$

Следует учитывать, что γ_n является последовательностью интенсивности отказа и к нему нельзя прибегать как к коэффициенту безопасности по материалам.

По условию предельной прочности должен быть проверен каждый нагруженный элемент конструкции ВЭУ для каждого соответствующего случая нагружения, установленного в таблице 2, и обеспечено условие предельной прочности в соответствии с формулой (34) для самого опасного предельного состояния, установленного на основе полученного наименьшего запаса.

7.6.2.2 Частные коэффициенты безопасности для нагрузок

Для РСН 1.1 нормативное значение нагрузки должно быть определено методом статистического анализа экстремального нагружения для нормальных расчетных случаев при условии соответствия одному из следующих альтернативных вариантов:

a) нормативное значение определяют как наибольшее (или наименьшее) значение среди средних значений 10-минутных экстремальных значений, определяемых для каждой скорости ветра в данном диапазоне, умноженное на 1,35. Данный метод может применяться только для расчета момента внутри плоскости и момента снаружи комеля лопасти и прогиба на конце;

b) нормативное значение определяют как наибольшее (или наименьшее) значение среди 99-го процентиля (или 1-го процентиля в случае минимума) значений 10-минутных экстремальных значений, определяемых для каждой скорости ветра в данном диапазоне, умноженное на 1,2;

c) нормативное значение определяют как значение, соответствующее 50-летнему периоду повторяемости, основанному на методах экстраполяции нагрузки, с учетом распределения скорости ветра, указанной в 6.3.2.1, и нормальной модели турбулентности в 6.3.2.3. Руководство по экстраполяции нагрузки приведено в приложении *F*.

Расчетную нагрузку определяют умножением нормативных нагрузок в соответствии с любым из этих альтернативных вариантов на частный коэффициент безопасности для РСН 1.1, указанный в таблице 3.

Таблица 3 — Частные коэффициенты безопасности для нагрузок γ_f

Неблагоприятные нагрузки		Благоприятные нагрузки[1)]
Тип расчетного случая (см. таблицу 2)		Все расчетные случаи
Нормальные (Н)	Аварийные (А)	
1,35[2)]	1,1	0,9

[1)] Инерционные и гравитационные нагрузки, которые существенно уменьшают суммарную величину внутренних усилий в элементах конструкции, считаются благоприятными. В случае как благоприятных, так и неблагоприятных нагрузок, формула (32) приобретает вид:

$$\gamma_n S(\gamma_{f,unfav} F_{k,unfav}, \gamma_{f,fav} F_{k,fav}) \le R(f_d).$$

[2)] Для расчетного случая нагружения РСН 1,1 при условии, что нагрузки определены методом статистической экстраполяции для заданного интервала скорости ветра между V_{in} и V_{out}, частный коэффициент безопасности по нагрузке для нормальных расчетных случаев принимается равным $\gamma_f = 1{,}25$.

Если для нормального расчетного случая может быть определено нормативное значение отклика $F_{gravity}$ на воздействия силы тяжести, и эта нагрузка является неблагоприятной, то частный коэффициент безопасности по нагрузкам рекомендуется определить в соответствии с зависимостями:

$$\gamma_f = 1{,}1 + \varphi \cdot \varsigma^2,$$

где $\varphi = \begin{cases} 0{,}15 \text{ для РСН 1,1} \\ 0{,}25 \text{ прочие} \end{cases}$ и $\zeta = \begin{cases} 1 - \left| \dfrac{F_{gravity}}{F_k} \right|; & |F_{gravity}| \le |F_k| \\ 0; & |F_{gravity}| > |F_k| \end{cases}$.

Окончание таблицы 3

Для расчетного нагружения РСН 2.1 частный коэффициент безопасности может быть рассчитан из следующей формулы, если была оценена средняя наработка на отказ $T_{ст}$, в годах, для рассматриваемого режима отказа (см. 7.4.3.2):

$$\gamma_f = \begin{cases} 1{,}35 & T_{ср} \le 10 \\ 1{,}71 - 0{,}155 \ln(T_{ср}) & 10 < T_{ср} \le 50 \\ 1{,}10 & T_{ср} > 50 \end{cases}.$$

Для расчетного случая нагружения РСН 2.5 частный коэффициент безопасности должен составлять 1,2.

Для всех трех вышеуказанных альтернативных вариантов данные, используемые в статистическом расчете, должны быть извлечены из временного ряда моделирований ВЭУ в течение 10 минут по продолжительности в диапазоне работы ВЭУ для РСН 1.1. Для каждой скорости ветра требуется минимум пятнадцать моделирований из (V_r – 2 м/с) к максимальной, и шесть моделирований требуется для каждой скорости ветра ниже (V_r – 2 м/с). При отборе данных проектировщик должен учитывать эффект независимости между пиками по статистическому расчету и, по возможности, минимизировать зависимость. Руководство по проверкам зависимостей приведено приложении *F*.

Для случаев нагружения с указанными детерминированными явлениями в поле ветра нормативное значение нагрузки должно быть вычислено для самого худшего варианта переходного процесса. Если выполняется больше моделирований при данной скорости ветра, представляющей азимут ветроколеса, в качестве нормативного значения для случая нагружения берется среднее значение из вычисленных самых худших вариантов переходного процесса при каждом азимуте. В приложении *G* можно найти руководство по извлечению совпадающей по времени нагрузки I. Для случаев набегания турбулентного воздушного потока должна быть определена средняя величина из числа самых опасных вычисленных нагрузок для различных 10-минутных случайных наборов данных, за исключением РСН 2.1, 2.2 и 5.1, для которых значение нормативной нагрузки должно быть равно средней величине наибольших половин максимальных нагрузок.

Частные коэффициенты безопасности для нагрузок должны быть не менее установленных в таблице 3.

Подход, изложенный в 7.6.1.2, при котором частный коэффициент безопасности для нагрузок применяется к динамической нагрузке, предполагает, что надлежащее представление динамической реакции является приоритетной задачей. Там, где надлежащее представление поведения нелинейного материала или геометрических нелинейностей (как, например, для фундаментов), или обоих является предметом приоритетной задачи, реакция расчетной нагрузки S_d должна быть получена из структурного расчета для комбинации расчетных нагрузок F_d, где расчетная нагрузка получается путем умножения нормативных нагрузок F_k на определенный частный коэффициент безопасности γ_f для благоприятных и неблагоприятных нагрузок:

$$F_d = \gamma_f F_k. \quad (35)$$

Динамические нагрузки в башне на границе (усилия сдвига и моменты изгиба) с учетом γ_f из таблицы 3 должны применяться в качестве граничных условий.

Использование частных коэффициентов безопасности по нагрузкам для нормальных и аварийных расчетных случаев, определенных в таблице 3, требует, чтобы выбранная модель расчета нагрузки была подтверждена результатами измерений нагрузок. Эти измерения должны быть выполнены на ВЭУ, имеющей конструкцию, подобную конструкции рассматриваемой ВЭУ в отношении аэродинамических характеристик, осуществления процессов управления и динамических реакций.

Для гравитационных фундаментов предельные состояния, учитывающие общую устойчивость (движение твердого тела без разрушения грунта) и несущую способность грунта и фундамента, должны рассматриваться и рассчитываться в соответствии с общепринятыми стандартами и нормами. В общем случае, частный коэффициент безопасности γ_f = 1,1 для неблагоприятных гравитационных нагрузок и γ_f = 0,9 для благоприятных гравитационных нагрузок применяется для обеспечения нагрузки на фундамент, обратной засыпки и запаса плавучести. Если посредством соответствующего управления качеством и надзора может быть продемонстрировано, что плотность материала фундамента, указанная в проектной документации, отвечает требованиям площадки, то частный коэффициент безопасности для

нагрузки на гравитационный фундамент γ_f = 1,0 можно использовать для предельных состояний несущей способности грунта и фундамента. Если статическое давление рассчитывается на уровне грунтовых вод, то рекомендуется использовать частный коэффициент безопасности для плавучести γ_f = 1,0.

В качестве альтернативы контроль несущей способности грунта и фундамента может базироваться на частном коэффициенте безопасности γ_f = 1,0 как для благоприятных, так и для неблагоприятных гравитационных нагрузок, а контроль общей устойчивости может базироваться на частном коэффициенте безопасности γ_f = 1,1 для неблагоприятных гравитационных нагрузок и γ_f = 0,9 для благоприятных гравитационных нагрузок, с использованием во всех случаях консервативной оценки удельных весов или плотностей вероятности, определяемых как 5 %/95 % квантилей. Нижний квантиль необходимо использовать при благоприятной нагрузке. В других случаях используется верхний квантиль.

7.6.2.3 Частные коэффициенты безопасности для сопротивлений в случае отсутствия для них значений, установленных в нормативных документах

Частные коэффициенты безопасности для сопротивлений должны быть определены в соответствии с имеющимися данными испытаний свойств материалов. Уровень безопасности должен соответствовать частному коэффициенту безопасности для сопротивлений γ_M = 1,2 для свойств материалов с 95 %-ной вероятностью безотказной работы. Это значение предполагает отсутствие систематической ошибки (обычно систематический консерватизм в модели сопротивления) и небольшую неопределенность, связанную с моделью сопротивления (коэффициент вариации менее 5 %), см. приложение *Н*. Этот частный коэффициент безопасности применяется к элементам, обладающим упругим поведением, отказы которых могут приводить к отказу главных элементов конструкции ВЭУ.

Примечание — В качестве альтернативы, нормативные прочностные характеристики могут быть отобраны как 95 %-ный квантиль (определенный с 95 %-ной достоверностью), используя байесовский подход, см. приложение *Н* и *ГОСТ Р ИСО 2394*.

Для получения расчетных значений сопротивлений необходимо учитывать масштабные факторы, допустимые пределы и ухудшение свойств в результате внешних воздействий, например ультрафиолетового излучения или влаги. Данные эффекты могут быть учтены посредством поправочных коэффициентов к частному коэффициенту безопасности для сопротивления или посредством переводного коэффициента, используемого для получения нормативного значения сопротивления, см. приложение *Н*.

При режимах пластических деформаций частный коэффициент безопасности для сопротивления γ_M должен быть не менее 1,1 в следующих случаях:

- для материалов с четко определенным пределом упругости (предел текучести составляет менее 90 % от предела прочности);
- при разрыве болта в соединении при достаточном количестве болтов, чтобы обеспечить режим пластических деформаций.

Для «непредохраняемых» механических/структурных элементов, не обладающих упругими свойствами, отказы которых быстро приводят к отказу главных элементов конструкции ВЭУ, главный частный коэффициент безопасности для материалов должен быть не менее чем:

- 1,3 для материалов с нечетко определяемым пределом упругости (предел текучести составляет более 90 % от прочности на разрыв или сжатие);
- 1,2 для глобальной потери устойчивости изогнутых оболочек типа трубчатых башен и лопастей.

Примечание — Применяемые для трубчатых стальных башен с D/t < 300 расчеты на основе теории мембран включают погрешность, которую можно учесть, уменьшив γ_M до 1,1.

7.6.2.4 Частные коэффициенты безопасности для материалов в случае использования значений, установленных для них в нормативных документах

Используемые в расчетах значения объединенных частных коэффициентов безопасности для нагрузок, материалов и учета последствий отказа, γ_f, γ_M и γ_n, должны быть не менее установленных в 7.6.1.3, 7.6.2.2 и 7.6.2.3.

7.6.3 Усталостное разрушение

7.6.3.1 Общие требования

Расчеты на усталостную прочность должны быть выполнены по соответствующей надежной методике. Например, в соответствии с методикой Майнера предельное состояние считается достигнутым, когда накопленное повреждение превысит единицу. В данном случае повреждение, накопленное за расчетный срок службы ВЭУ, должно быть меньше или равно единице. Выражения для расчета усталостной прочности должны учитывать как особенности цикла нагружения, его диапазон, так и среднее

значение деформаций (напряжений). Для расчета приращения повреждения, связанного с каждым циклом усталостного нагружения, все частные коэффициенты безопасности (для нагрузок, материалов и последствий отказа) должны быть применимы к рассматриваемому диапазону циклических деформаций (или напряжений). Пример методики Майнера приведен в приложении *I*.

7.6.3.2 Частный коэффициент безопасности для нагрузок

Частный коэффициент безопасности для нагрузок γ_f должен быть 1,0.

7.6.3.3 Частные коэффициенты безопасности для сопротивлений, в случае отсутствия значений, установленных для них в нормативных документах

Частный коэффициент безопасности для сопротивлений γ_M должен быть не менее 1,7 при условии, что кривая *S–N* основана на 50 %-ной вероятности безотказной работы и коэффициенте вариации меньше 15 %. Для элементов с большим коэффициентом вариации усталостной прочности (в диапазоне от 15 % до 20 %), состоящих из многих компонентов (композитные материалы), как, например, железобетон или волоконные материалы, частный коэффициент безопасности должен быть увеличен и составлять не менее 2,0.

Примечание — Усталостная прочность здесь определяется как диапазоны напряжений для заданного числа циклов.

Характеристики усталостной прочности должны быть основаны на результатах статистически значимого количества испытаний, их нормативные значения должны учитывать: масштабный фактор, допуски, ухудшение свойств в результате внешних воздействий, например ультрафиолетового излучения, а также скрытые дефекты.

Для сварных и конструкционных сталей при построении кривых *S–N* традиционно используется 97,7 %-ная вероятность безотказной работы. В этом случае коэффициент γ_M может быть принят равным 1,25, в соответствии с методикой отказоустойчивой оценки (см. приложение *H*). В тех случаях, когда осуществляются периодические осмотры, позволяющие обнаружить критическое развитие усталостной трещины, допускается использовать более низкое значение γ_M, в соответствии с методикой отказоустойчивой оценки (см. приложение *H*). Во всех случаях, γ_M должен быть больше 1,0.

Для волоконных материалов распределение прочностных характеристик должно быть установлено на основе данных испытаний конкретного материала. Построение кривой *S–N* должно основываться на 95 %-ной вероятности безотказной работы с уровнем доверительной вероятности 95 %. В этом случае γ_M рекомендуется принять равным 1,35. Аналогичный подход допускается использовать для других материалов.

7.6.3.4 Частные коэффициенты безопасности материалов в случае использования значений, установленных для них в нормативных документах

Используемые в расчетах значения объединенных частных коэффициентов безопасности для нагрузок, материалов и последствий отказа должны быть не менее установленных в 7.6.3.2 и 7.6.3.3, с учетом соответствующих квантилей, установленных в настоящем стандарте.

7.6.4 Устойчивость

Несущие части «непредохраняемых» элементов конструкции должны сохранять устойчивость в процессе воздействия расчетных нагрузок. Для всех других элементов конструкций упругие деформации под действием расчетной нагрузки допустимы. Под воздействием нормативных нагрузок все элементы конструкции должны сохранять устойчивость.

Для получения расчетной нагрузки должен быть выбран частный коэффициент безопасности по нагрузкам γ_f, минимальная величина которого должна соответствовать установленной в 7.6.2.2. Частные коэффициенты безопасности для материала должны быть не менее указанных в 7.6.2.3.

7.6.5 Проверка критических деформаций

7.6.5.1 Общие требования

При проектировании должна быть выполнена проверка, показывающая, что для всех случаев нагружения и всех расчетных случаев, установленных в таблице 2, деформации, способные повлиять на структурную целостность ВЭУ, отсутствуют.

Максимальные упругие деформации в неблагоприятном направлении должны быть определены для случаев нагружения, установленных в таблице 2. Нормативное значение результирующих деформаций определяется способом, совместимым с другими компонентами нагрузки. Полученное нормативное значение деформации затем следует умножить на общий частный коэффициент безопасности для нагрузок, материалов и последствий отказа.

7.6.5.2 Частный коэффициент безопасности для нагрузок

Величина γ_f должна быть выбрана из таблицы 3.

7.6.5.3 Частный коэффициент безопасности для упругих свойств материалов

Величина γ_M должна быть равна 1,1 кроме тех случаев, когда упругие свойства определены в результате полномасштабных испытаний и мониторинга, в случае которых ее можно уменьшить. Особое внимание должно быть уделено учету неопределенности, связанной с геометрическими размерами, и точностью метода расчета деформаций.

7.6.5.4 Частный коэффициент безопасности, учитывающий последствия отказа

Частный коэффициент безопасности для последствий отказа, γ_n, должен быть 1,0.

Рассчитанные упругие деформации должны быть добавлены к положению рассматриваемого элемента в недеформированном состоянии в самом неблагоприятном направлении. Полученное положение должно гарантировать отсутствие касания.

7.6.5.5 Деформация концов лопастей

Одним из наиболее важных расчетов является проверка того, что не происходит механического касания между лопастью и башней. Объединенный коэффициент безопасности, $\gamma_f\gamma_n\gamma_m$, для зазора лопасть-башня должен быть не менее 1,15.

В целом, деформацию лопастей необходимо рассчитывать для случаев предельного нагружения. Деформации, вызванные случаями предельного нагружения, могут быть рассчитаны на основании балочных моделей, конечноэлементных моделей и т. п. Все соответствующие случаи нагружения из таблицы 2 приходится учитывать с соответствующими частными коэффициентами безопасности.

Кроме того, для РСН 1.1 обязательным является статистический анализ максимальной деформации конца лопасти или минимального зазора башни в соответствии с 7.4.1. Здесь можно использовать прямой метод динамического анализа или анализ зазора башни. Вероятность превышения для деформации в самом неблагоприятном направлении должна быть такой же, как для нормативной нагрузки. Для анализа вершины лопасти нормативная деформация затем умножается на объединенные частные коэффициенты безопасности для нагрузок, материалов и последствий отказа и добавляется к недеформированной позиции в наиболее неблагоприятном направлении и полученное положение должно гарантировать отсутствие касания. В случае прямого динамического анализа зазора башни минимально допустимый зазор определяется посредством умножения номинального недеформированного зазора на соотношение объединенных частных коэффициентов для нагрузок, материалов и последствий отказа минус один к объединенному частному коэффициенту $\left(\text{т. е. } \frac{\gamma_f\gamma_n\gamma_m - 1}{\gamma_f\gamma_n\gamma_m}\right)$.

7.6.6 Специальные частные коэффициенты безопасности

Если величины нагрузок были установлены испытаниями или на основе расчетов, подтвержденных испытаниями, и при этом обеспечен более высокий уровень надежности, то частные коэффициенты безопасности для нагрузок допускается уменьшить. Значения всех использованных частных коэффициентов безопасности должны быть отражены в проектной документации.

8 Система управления

8.1 Общие положения

Система управления должна обеспечивать управление ВЭУ активными и пассивными средствами для поддержания рабочих параметров в пределах, указанных в проекте. Система управления должна включать в себя контуры управления для нормальной работы, а также сигнализацию и механизмы выключения для исключения выхода значений параметров за допустимые пределы. Она может включать в том числе датчики, логические элементы, приводы, сети связи и источники питания.

Раздел 8 устанавливает требования в части обеспечения системой управления соответствующего уровня защиты.

Система управления должна обеспечивать безопасное функционирование ВЭУ и требуемый уровень защиты от разрушения конструкций основных компонентов ВЭУ.

Система управления может выполнять задачи только управления ВЭУ или также быть частью системы управления ВЭС.

Система управления может быть спроектирована с двумя независимыми наборами функций (первичный уровень — функции управления, вторичный уровень — функции защит) или с одним набором функций, обеспечивающих безопасную работу.

Ручное или автоматическое вмешательство не должно ставить под угрозу выполнение функций защиты. Любое устройство, допускающее ручное вмешательство, должно находиться в хорошо видимом, доступном для персонала месте. В случае необходимости на данные устройства должны быть нанесены соответствующие обозначения.

Если выбор режима управления осуществляют, например, для технического обслуживания, он должен регулироваться переключателем, который может эффективно блокироваться в каждом положении, соответствующем одному режиму.

Настройки системы управления должны быть защищены от несанкционированного доступа.

Дополнительные функции системы управления, необходимые для обеспечения безопасности персонала, должны быть реализованы по соответствующим стандартам безопасности, например *ГОСТ ISO 13849-1* или *ГОСТ Р МЭК 62061*.

Особые требования к холодному климату см. в 14.6.

8.2 Функции управления

Должны быть обеспечены контроль, управление или ограничение/изменение следующих функций и/или параметров:

- мощность/активная и реактивная мощность ВЭУ (или ВЭС);
- частота вращения ветроколеса/ротора;
- соединение с электрической нагрузкой;
- процедуры выключения и остановки;
- автоматический пуск;
- все функции, связанные с измерением скорости ветра;
- закручивание кабелей;
- вибрация, превышающая допустимые пределы;
- установка на ветер;
- угол рыскания.

В задачи системы управления ВЭУ, если она является частью системы управления ВЭС, функционирующей в составе Единой энергетической системы России, дополнительно входят функции, связанные с:

- участием ВЭС в регулировании напряжения в точке подключения ВЭС к сети в соответствии с заданным законом;

- участием ВЭС в регулировании частоты в соответствии с заданным законом.

Система управления таких ВЭУ также должна контролировать или ограничивать величину активной и реактивной мощности ВЭУ (или ВЭС, в зависимости от условий взаимодействия систем управления ВЭУ и ВЭС).

Система управления должна обеспечивать безаварийное выполнение функций контроля, управления, поддержания параметров установки в заданных пределах при расчетных условиях нагрузки.

Способность системы управления обеспечивать безотказное функционирование ВЭУ должна быть подтверждена расчетами РСН (за исключением случаев нагружения РСН 2.1 и 2.2).

При отказе системы управления ВЭУ должна поддерживать безопасный режим работы, который может включать поддержку эксплуатации или останов ВЭУ.

Должно быть четко определено поведение ВЭУ после отказа, включая любые процедуры для автоматического или ручного запуска (см. 8.7).

8.3 Функции защиты

Система управления должна использовать функции защиты для предотвращения перегрузок конструкции в результате режимов отказов. Данные функции защиты могут быть реализованы либо как функции управления, применяющие в своей основе расчетные меры безопасности, либо как отдельные функции защиты вторичного уровня.

Примечание — Руководство по применению запроектированных мер безопасности для систем управления приведено в *ГОСТ Р 54125—2010, пункты 6.2.11 и 6.2.12.*

Функции защиты должны иметь более высокий приоритет, чем функции управления. В случае конфликта между системами защиты и управления, функции защиты должны преобладать над функциями управления. Функция защиты вторичного уровня для приведения ВЭУ в безопасный режим эксплуатации должна иметь более высокий приоритет, чем функция управления первого уровня.

Функции, обеспечивающие защиту конструкции от перегрузок, должны реализовываться посредством многоканальных архитектур с диагностическим покрытием, обеспечивающим в достаточной мере повышенное время безотказной работы (см. архитектуру для систем категории 2 по *ГОСТ ISO 13849-1*).

Способность функций защиты защищать конструкции от перегрузок должна быть подтверждена расчетами РСН 2.1 и 2.2, см. 7.4.3.2 и 7.4.3.3.

8.4 Анализ отказов системы управления

8.4.1 Общие требования

Неисправности и ошибки в системах, выполняющих функции управления и защиты, могут вызвать ряд режимов отказа, в которых режим отказа определяется как поведение системы управления в случае неисправности или ошибки. Такие режимы отказов могут вызывать события, оказывающие влияние на конструкцию ВЭУ.

Пример — Неисправность датчика может привести к ошибочному ходу шага А (режим отказа), что может привести к избыточной частоте ветроколеса/ротора (событие).

Режимы отказов системы управления должны идентифицироваться в соответствии с требованиями настоящего раздела и оцениваться в соответствии с требованиями, указанными в 7.4.3.

FMEA или эквивалентный анализ неисправностей должен проводиться для определения проявлений неисправности, уместных для нагружения ВЭУ. Это может включать в себя анализ дерева отказов или аналогичные методики идентификации любых отказов по общим причинам.

Группа событий, указываемых в анализе неисправностей, должна включать в себя как минимум следующее:

- чрезмерную частоту вращения ветроколеса/ротора;
- вибрацию, превышающую допустимые пределы;
- чрезмерную выработку энергии;
- неисправности исполнительного механизма, например ошибочное срабатывание системы рыскания или системы установки на ветер.

8.4.2 Независимые отказы и отказы по общим причинам

Считается, что независимые отказы не происходят одновременно. Если есть вероятность независимых отказов, необходимо задействовать меры по предотвращению отказов по общим причинам, при этом следует иметь достаточное диагностическое покрытие для защиты от скрытых отказов.

Примечание — Оценка достаточности мер против отказов по общим причинам может быть выполнена по *ГОСТ ISO 13849-1*.

8.4.3 Исключение ошибок

Отказы системы управления, подпадающие под действие функции исключения ошибок, как описано в общепризнанных стандартах, можно пропустить.

Примечание — Исключения ошибок описаны в таких стандартах, как *[8].* Для механических компонентов уместны исключения ошибок как для «непредохраняемых» компонентов.

Все механические компоненты системы управления, которые используют для исключения ошибок, относят к компонентам класса 3. Они должны быть рассчитаны согласно 7.6 с соответствующими частными коэффициентами безопасности учета последствий отказов. Следует выполнить расчеты указанных компонентов на предельную прочность, усталость, деформацию и критическую деформацию.

8.4.4 Периоды повторяемости режимов отказов

Если в расчетах нагружения (см. 7.4.3.2) указываются периоды повторяемости режимов отказов, то указанные периоды необходимо демонстрировать общепризнанными методами.

Примечание — Методы демонстрации вероятности отказов, включая нормативные значения для компонентов см. *ГОСТ Р МЭК 61508-6* или *ГОСТ Р МЭК 62061*.

Для механических компонентов периоды повторяемости режимов отказов необходимо устанавливать только в случае неприменения функции исключения ошибок.

8.4.5 Систематические отказы

Для функций защиты и функций управления, где заявлены периоды повторяемости режимов отказов свыше 10 лет, должны быть приняты меры по предотвращению систематических отказов (включая отказы программного обеспечения), определенные в общепризнанных стандартах.

Примечание — Меры по предотвращению систематических отказов и отказов программного обеспечения установлены в *ГОСТ Р МЭК 62061—2015, подразделы 6.4, 6.10 и 6.11* (см. также *[9], подраздел 4.6, приложения G и J)*.

8.5 Ручное управление

Ручное или автоматическое вмешательство не должно ставить под угрозу способность соблюдения установленных пределов системой управления. Любое устройство, позволяющее ручное вмешательство, должно находиться в хорошо видимом, доступном для персонала месте, с нанесением маркировки, при необходимости.

Там, где имеется возможность выбора режима управления, например для технического обслуживания, выбор режима предопределяется селектором, который можно заблокировать в каждом положении, соответствующем одному режиму.

Установки системы управления должны быть защищены от несанкционированного доступа.

8.6 Функция кнопки аварийного останова

Функция кнопки аварийного останова должна осуществляться с использованием общепризнанных методов и принципов проектирования (см., например, *[10]*, где дано руководство по обеспечению готовности кнопки аварийного останова, местоположению, выбору функциональности останова и режимов перезагрузки).

Необходимо определить, какая категория останова выбирается. Должны быть четко определены любые функциональные возможности, требуемые от системы управления при активации кнопки аварийного останова.

Примечание — Данное требование особенно важно при выборе категории останова 1 (регулируемый останов).

Должно быть четко определено поведение всех систем, влияющих на нагружение элементов конструкции после активации кнопки аварийного останова.

Примечания

1 Отключение электрических систем может влиять на нагружение приводного механизма. Когда поведение функции аварийного останова зависит от рабочих условий, должны быть четко определены данные зависимости.

2 Применение механического дискового тормоза в случае активации аварийной кнопки может быть обусловлено скоростью вращения и/или скоростью ветра и т. п.

Эффекты активации кнопки аварийного останова должны оцениваться согласно РСН 5.1 для всех соответствующих рабочих сценариев (см. 7.4).

8.7 Ручное, автоматическое и дистанционное повторное включение

Механизмы повторного включения ВЭУ вслед за остановкой должны быть четко определены и соответствовать следующим требованиям.

Поведение повторно включенной ВЭУ и процедуры повторного включения после отказа функции управления должны определяться на базисе анализа режима отказа (например, посредством анализа дерева отказов).

Примечание — В процедуре повторного включения должны быть учтены причины останова ВЭУ для обоснования безопасности для повторного включения ВЭУ. Например, повторное включение нельзя считать безопасным без проверки на предмет, была ли ВЭУ остановлена по причине чрезмерного механического удара.

Если отказы в функциях, определяющих возможность возникновения повторного включения, могут оказывать влияние на нагружения ВЭУ, то эти неисправности необходимо рассматривать как проявления неисправностей, как определено в 8.4.1.

Поведение после отказа функции управления может определяться посредством ручных или автоматических процедур, выполняемых по месту или дистанционно. В случае дистанционного повторного включения оно должно включать в себя проведение любого дистанционного осмотра (например, посредством использования дистанционных камер и/или данных SCADA, и подходящие критерии, которые должны соответствовать требованиям до того, как посчитают безопасным допустить дистанционное повторное включение.

Автоматическое повторное включение не должно допускаться, пока не будут определены автоматическая диагностика и критерии, необходимые для обеспечения поддержания безопасности ВЭУ (т. е. в пределах приемлемого риска повреждения ВЭУ) после повторного включения.

Примечание — Такая диагностика может состоять из автоматического подтверждения того, что пределы расчета конструкции по скорости ветроколеса/ротора и ускорению в верхней части башни не были превышены.

Необходимо учитывать риски и последствия непреднамеренного дистанционного повторного включения (например, из-за ошибки системы связи).

ВЭУ со способностью к автоматическому или дистанционному включению должна быть оснащена средствами отключения непосредственно на установке и средствами отключения функции автоматического повторного включения и функции дистанционного повторного включения.

Количество и частота допустимых дистанционных или автоматических повторных включений должны быть четко определены на основании прогнозируемых остановов, предусмотренных в оценке расчетных нагружений. Функция повторного включения должна обеспечивать непревышение указанных пределов.

В оценке расчетных нагружений должны быть учтены последствия многократных повторных включений до вышеуказанных пределов.

На управление количеством и частотой допустимых дистанционных или автоматических повторных включений не должны оказывать влияние внешние факторы, такие как потеря (и перезапуск) сетевого питания, внешние нагрузки, проведение ремонтных работ и т. п.

Не должно быть ошибочных повторных включений ВЭУ из-за указанных внешних факторов.

8.8 Система торможения

Система торможения должна быть способна привести ветроколесо/ротор в состояние холостого хода или его полной остановки из любого рабочего состояния, включая потерю мощности.

Должны быть предусмотрены способы и средства, которые обеспечивают возможность полной остановки ветроколеса/ротора при опасном состоянии холостого хода при любой скорости ветра, меньшей, чем предельная скорость, установленная для технического обслуживания и ремонта, см. 7.4.9, если это не принимается во внимание на основании результатов оценки риска.

Рекомендуется, чтобы, по крайней мере, одна из систем торможения работала по аэродинамическому принципу, воздействуя непосредственно на вал ветроколеса. Если эта рекомендация не выполнена, по крайней мере одна из систем торможения должна быть установлена на валу ветроколеса/ротора ВЭУ.

Конструкция тормозов должна обеспечивать надежное срабатывание даже в случае отказа внешнего источника, осуществляющего их питание. Тормоз после приведения его в действие должен быть способен удерживать ветроколесо в состоянии полной остановки при заданных параметрах ветра не менее 1 ч. На периоды более длительных отключений от сети должна быть предусмотрена возможность приведения тормоза в действие как с помощью резервного источника питания, так и вручную.

9 Механические системы

9.1 Общие требования

Механическая система, рассматриваемая в настоящем стандарте — это любая система, которая состоит не только из неподвижных элементов конструкции или электротехнических устройств, но также из подвижных элементов. Подвижные элементы используют или передают относительное движение через соединения звеньев, подшипников, валов, направляющих, зубчатых колес и других устройств. Механическая система ВЭУ, как правило, состоит из элементов цепи привода (мультипликатора, валов, муфт), вспомогательных устройств (тормозов, механизмов поворота лопастей, привода ориентации на ветер). Вспомогательные устройства допускается проектировать с электрическим, гидравлическим или пневматическим приводом.

Все механические системы в цепи привода, в системах управления и защиты должны быть разработаны в соответствии с настоящим стандартом и другими соответствующими национальными стандартами Российской Федерации. Частные коэффициенты безопасности должны соответствовать элементам 2-го класса согласно 7.6.1.2, за исключением элементов, для которых должен быть установлен 3-й класс.

В процессе проектирования должны быть разработаны процедуры технического обслуживания системы охлаждения и фильтрации смазывающей жидкости, выполнение которых гарантирует работоспособность названной системы в заданном рабочем диапазоне температур.

Остаточный срок службы любого подверженного износу элемента, входящего в систему торможения, должен автоматически контролироваться через установленные интервалы времени. ВЭУ должна быть остановлена и заблокирована при выявлении предельной для выполнения аварийного останова величины допустимого износа трущихся элементов. Все устройства системы торможения должны быть разработаны и поддерживаться в таком состоянии, чтобы обеспечивать время срабатывания в заданных пределах.

Расчет нагрузок должен быть выполнен на основе прикладываемого давления, предусмотренного проектом, и кривых торможения, включая как средний уровень торможения, так и минимальный, допускающий минимальное трение. Если тормоз позволяет скольжение при минимальном уровне торможения при приведении его в действие, то конструкция должна быть разработана с гарантией отсутствия перегрева, ухудшения рабочих характеристик и риска возникновения пожара.

Особые требования для холодных климатических условий (см. 14.7).

9.2 Ошибки при сборке

Должны быть предусмотрены конструктивные меры, исключающие возможность неправильной сборки элементов конструкции, что является источником риска для ВЭУ. Если конструктивными методами избежать неправильной сборки не представляется возможным, то должны быть сделаны соответствующие надписи на русском языке непосредственно на сопрягаемых элементах или на их корпусах. Чтобы избежать риска нанесения ущерба или травмирования обслуживающего персонала на подвижных и вращающихся частях машин и элементов конструкции (или их корпусах), должны быть сделаны надписи на русском языке, указывающие направление движения. Прочая необходимая информация должна быть отражена в инструкции по управлению и руководствах по техническому обслуживанию.

Должны быть предусмотрены соответствующие надписи на русском языке или конструктивные меры, исключающие возможность неправильного соединения элементов электрической, гидравлической, пневматической и прочих систем, если неправильное их соединение может быть источником риска (например, трубки, шланги или клеммные коробки).

9.3 Гидравлические или пневматические системы

Вспомогательное оборудование, имеющее гидравлический или пневматический привод, должно быть рассчитано, сконструировано и оснащено таким образом, чтобы исключить любую потенциальную опасность, связанную с использованием названных видов привода. Гидравлические и пневматические системы должны иметь в своем составе средства изоляции или освобождения от накопленной энергии. Конструкция всех элементов названных систем, трубок и/или шлангов, наполненных рабочей жидкостью или газом, должна выдерживать расчетные значения параметров внешних и внутренних воздействующих факторов или должна быть предусмотрена соответствующая защита. На стадии проектирования необходимо оценить риск повреждения ВЭУ вследствие разрушений в гидравлической/пневматической системах и принять меры к его минимизации. Должны быть предприняты меры по минимизации риска травматизма из-за повреждения систем.

9.4 Главный мультипликатор

Главный мультипликатор должен соответствовать *ГОСТ Р 54418.4.*

9.5 Система установки на ветер

Система установки на ветер, как правило, состоит:

- из устройств, обеспечивающих ее неподвижность (например, гидравлические тормоза);
- устройств, изменяющих ее ориентацию (например, электрические двигатели, мультипликаторы и шестерни);
- устройств, обеспечивающих возможность относительного перемещения (например, подшипники).

Все двигатели должны соответствовать техническим требованиям раздела 10.

Все элементы цепи передачи механизма установки ветроколеса на ветер, не имеющие резервирования, такие как последнее поворотное колесо, должны быть приняты в расчет как элементы конструкции 2-го класса. В случае применения многоприводного механизма установки на ветер, гарантирующего

достаточное резервирование в рассматриваемой системе, и при соблюдении условия возможности легкой замены, мультипликатор и последняя приводная шестерня могут быть рассчитаны, как компоненты 1-го класса.

Должны быть предусмотрены меры безопасности при точечном выкрашивании (см. *[11]*). Расчеты зубчатых колес по условию контактной прочности должны быть выполнены и проверены в соответствии с *ГОСТ 21354,* а также учитывая *[12]*. Допускается использование верхнего графика усталостной кривой для коэффициента долговечности Z_{NT}, допускающего ограниченное точечное выкрашивание.

Реверсивная изгибающая нагрузка, действующая на зубья зубчатых колес передачи поворотного механизма, должна быть рассчитана в соответствии с *ГОСТ 21354—87*, *приложение В*. Минимальные значения коэффициентов запаса прочности S_F и S_H приведены в таблице 4. Эти значения должны быть обеспечены при использовании нормативных нагрузок F_k. Поэтому S_F и S_H включают в себя частные коэффициенты безопасности по последствиям отказа γ_n, свойствам материалов γ_M и нагрузкам γ_f.

Таблица 4 — Минимальные коэффициенты запаса прочности $S_{H,min}$ и $S_{F,min}$ передачи поворотного механизма установки на ветер

Показатель	Компонент класса 1	Компонент класса 2
Поверхностная усталостная прочность (выкрашивание)	$S_{H,min} = 1,0$	$S_{H,min} = 1,1$
Изгибная усталостная прочность зуба	$S_{F,min} \geq 1,1$	$S_{F,min} = 1,25$
Изгибная прочность по статическим нагрузкам	$S_{F,min} \geq 1,0$	$S_{F,min} = 1,2$

Более низкие значения коэффициентов запаса прочности S_F и S_H, допускается применять при наличии постоянного надежного мониторинга. Если выбраны запасы прочности ниже 1,0, то в руководстве по обслуживанию должны быть установлены рекомендуемые интервалы замены деталей.

9.6 Система управления лопастями

Система управления лопастями может состоять из средств, обеспечивающих поворот лопастей (например, гидравлические приводы, электрические двигатели, мультипликаторы, тормоза и зубчатые колеса) и устройств, обеспечивающих вращение (например, подшипник).

Любые двигатели должны соответствовать техническим требованиям раздела 10. Для систем управления лопастями с индивидуальными двигателями/приводами, гарантирующими достаточное резервирование, рекомендуется назначить класс 2.

Для элементов 2-го класса, мультипликаторы и зубчатые колеса должны соответствовать требованиям 9.5.

9.7 Аварийные тормоза

Механические тормоза, которые используются для реализации функций защиты (см. 7.4.3.3), в основном являются устройствами с элементами трения, имеют гидравлический или механический привод (энергия сжатой жидкости или сжатой пружины). Остаточный срок службы любых изнашиваемых компонентов, например тормозных накладок, должен находиться под постоянным контролем системы управления и защиты, которая должна выполнить останов и блокировку ВЭУ при выявлении предельной величины износа материала, установленного для выполнения аварийной остановки.

Определение расчетных нагрузок должно быть основано на рассмотрении процессов торможения с соответствующими диапазонами изменения тормозных моментов. Если конструкция тормоза допускает проскальзывание в состоянии полной остановки с минимальным тормозным моментом, всякий раз, когда он должен удерживать ВЭУ в стационарном состоянии, период проскальзывания при турбулентном ветре должен быть достаточно коротким, чтобы не допустить перегрева тормоза, ухудшения его рабочих характеристик и риска возникновения пожара.

9.8 Подшипники качения

9.8.1 Общие требования

Расчет номинальных параметров подшипников качения должен выполняться в соответствии с *ГОСТ 18854*, *ГОСТ 18855* (см. также *[13]*). В расчете должны быть учтены режим эксплуатации, состояние смазки, а также окружающая среда подшипника. Использование всех расчетных коэффициентов должно быть обосновано в соответствии с *ГОСТ 18855*.

Расчетные нагрузки при расчетах подшипников должны соответствовать различным случаям нагружения в соответствии с 7.4 и использовать коэффициенты безопасности в соответствии с 7.6. Расчет подшипников должен учитывать предполагаемое число циклов нагружения в течение срока службы, характер нагружения, например непрерывный, как для подшипников главного вала, или колебательный, как в механизмах поворота лопастей и установки на ветер.

9.8.2 Подшипники главного вала

Измененный исходный номинальный срок службы L_{10mr} (90 %-ной вероятности безотказной работы) подшипников главного вала должен соответствовать или превышать заданный расчетный срок службы ВЭУ.

9.8.3 Подшипники генератора

Измененный исходный номинальный срок службы L_{10mr} (90 %-ной вероятности безотказной работы) подшипников генератора должен соответствовать или превышать заданный расчетный срок службы ВЭУ.

Подшипникам генератора, которые можно заменить в ВЭУ без специальных инструментов, можно задавать укороченный срок службы.

9.8.4 Подшипники поворота лопастей и системы установки на ветер

Для подшипников поворота лопастей и системы установки на ветер отношение уровня статической нагрузки к расчетной должно быть не менее 1,0 в соответствии с *ГОСТ 18854*. При расчете должна быть учтена податливость сопряженных деталей.

При расчете этих подшипников следует учитывать условия недостаточной смазки.

10 Электрическая система

10.1 Общие требования

Электрическая система ВЭУ включает все электрическое оборудование, установленное в ВЭУ, включая выводы ВЭУ.

Раздел 10 включает в себя электрические элементы, специфические для проектов ВЭУ, имеющих свойства и функции, как правило, не связанные со стандартами на другие системы или элементы. Раздел 10 распространяется на общие компоненты ВЭУ, но не предусматривает включение всех элементов. Специфические элементы диктует проект ВЭУ и эти элементы и узлы должны оцениваться по местонахождению и сфере применения электрического, механического и связанного с экологией монтажа, как определено в 10.2.

Коллекторная сеть в настоящем стандарте не рассматривается.

10.2 Общие технические требования к электрической системе

При проектировании электрической системы ВЭУ должен быть гарантирован максимальный уровень безопасности для людей и домашнего скота. При всех нормальных и экстремальных внешних условиях, определенных в разделе 6 настоящего стандарта, в процессе эксплуатации и технического обслуживания должна быть минимизирована возможность повреждения как самой ВЭУ, так и сети подключения.

Электрическая система, включая все электрическое оборудование и компоненты, должна быть выполнена в соответствии с национальными стандартами Российской Федерации. Если в настоящем стандарте не оговорено иное, конструкция электрической системы ВЭУ должна соответствовать требованиям *ГОСТ Р МЭК 60204-1* и *ГОСТ 12.2.007.0*.

Оборудование, имеющее внутренние и внешние цепи с номинальным напряжением свыше 1000 В переменного тока или 1500 В постоянного тока, должно отвечать требованиям *ГОСТ 12.2.003* (для определения требований к такому оборудованию ВЭУ см. также *[14]*). Изготовитель в проектной документации должен перечислить стандарты, использованные при проектировании.

При проектировании электрической системы следует учитывать, что вырабатываемая ВЭУ электроэнергия может в любой момент времени слабоуправляемо меняться из-за естественных неуправляемых изменений кинетической энергии ветра, воздействующей на ВЭУ.

Требования, связанные с эксплуатацией ВЭУ в холодном климате (см. в 14.8).

Изготовитель должен указать стандарты, в соответствии с которыми разработана электрическая система ВЭУ.

10.3 Условия среды внутри ветроэнергетических установок

Данный подраздел относится к условиям среды внутри ВЭУ, отличающимся от внешних условий окружающей среды.

Условия среды внутри ВЭУ должны определяться для мест, в которых расположены все основные компоненты и сборочные узлы ВЭУ, и регулироваться (см. *[15]*). Обычно должны рассматриваться условия окружающей среды ступицы, секций башни, гондолы, фундамента башни, цоколя, а также, если необходимо, других компонентов ВЭУ.

Условия среды внутри ВЭУ зависят от конкретных систем контроля окружающей среды и прогнозируемого загрязнения окружающей среды, предусмотренного по проекту конкретной ВЭУ. Необходимо учитывать отопление, охлаждение и вентиляцию.

Изготовитель должен определить следующие характеристики рабочих условий окружающей среды внутри каждого сборочного узла ВЭУ и основных компонентов при эксплуатации, хранении и транспортировке:

- температуру теплоносителя (мин./макс.);
- температуру окружающей среды (мин./макс.);
- влажность (мин./макс.);
- уровень загрязнения;
- вибрацию;
- категорию перенапряжения;
- высоту над уровнем моря для учета в тепловых воздействиях, для ВЭУ, рассчитанных для работы на уровне свыше 1000 м;
- высоту над уровнем моря для учета в координации изоляции, для ВЭУ рассчитанных для работы на уровне свыше 2000 м.

Если необходимо, используют классификацию *[15]*.

Данные характеристики условий окружающей среды используют для координации изоляции.

При оценке требований к координации изоляции для оборудования ВЭУ с конструктивными особенностями, если иное не оговорено в требованиях к элементам с конструктивными особенностями в настоящем стандарте следует использовать *ГОСТ Р МЭК 60664.1* и *ГОСТ IEC 60664-3* для оборудования с номинальным напряжением до 1000 В переменного тока, а *[16]* и *[17]* для оборудования с номинальным напряжением 1000 В переменного тока и выше. Данная оценка координации изоляции относится к категории перенапряжения, степени загрязнения и условиям окружающей среды для электрического оборудования внутри ВЭУ.

Загрязнение среды внутри ВЭУ соответствует степени загрязнения 3. Специализированные зоны, где имеются токопроводящие загрязнения, как например, пыль от коллекторных щеток и тормозная пыль, относят к зонам со степенью загрязнения 4.

Внутри некоторых участков оборудования степень загрязнения можно понизить при помощи герметизации, капсулирования и т. п. Понижения степени загрязнения внутри всего оборудования можно также достичь, используя защитные ограждения в соответствии со стандартом *ГОСТ 14254*. Можно предпринять шаги в отношении контроля и понижения степени загрязнения в месте наличия пластической деформации за счет деталей конструкции или с учетом рабочих характеристик компонента или оборудования.

Степени загрязнения 2 можно достичь, снижая возможные скопления отходов (фильтрующая вентиляция) и конденсацию или высокую влажность в местах наличия пластической деформации. Для контроля конденсации можно использовать тепло в течение длительного срока посредством нагревателей или непрерывной подачи напряжения на используемое оборудование. Считается, что непрерывная подача напряжения имеет место при бесперебойной эксплуатации оборудования каждый день и в течение 24 часов в сутки или при эксплуатации оборудования с перерывами в продолжительности, не допуская охлаждения до точки конденсатообразования.

Степени загрязнения 1 можно достичь посредством герметизации, прессования оборудования или замыкания, или путем ограждения по степени защиты IP 67.

Категория перенапряжения IV должна применяться для определения мест разъединительных интервалов внутри ВЭУ. Устройства защиты от перенапряжений, рассчитанные на защиту управляющих и защитных цепей и иных цепей для безопасной эксплуатации ВЭУ, должны включать в себя цепи мониторинга или другие автоматические устройства для определения вышедшего из строя устройства защиты от импульсных перенапряжений. Использование защиты от импульсных перенапряжений можно

задействовать в целях локального снижения категории перенапряжения ниже IV категории для конкретного оборудования или цепей.

Прямые или ближние удары молнии могут создать условия для сильного перенапряжения во внешних электрических системах и электрических системах ВЭУ, включая цепи оборудования по всей площади ступицы, гондолы и башни. Устройства защиты от импульсных перенапряжений должны быть установлены в непосредственной близости от защищаемого оборудования.

10.4 Защитные устройства

Электрическая система ВЭУ должна соответствовать требованиям *серии стандартов на низковольтные электроустановки [18]* и включать устройства, гарантирующие защиту от сбоев как внутри самой ВЭУ (внутри оборудования, сборочных узлов, компонентов и т. п.), так и защиту от сбоев сети подключения, которые могут привести к опасной ситуации или опасному состоянию ВЭУ. Защитные устройства должны выполнять следующие функции: защиту от коротких замыканий, перегрузки по току, замыкания на землю, перегрева и дугового замыкания. Реализация защитных функций устройств должна быть отстроена от действия защит в примыкающей сети.

10.5 Разъединительные устройства

Должно быть предусмотрено устройство или устройства для отключения оборудования от всех источников электропитания, которые могут находиться под опасным напряжением или напряжение которых может превышать предельно допустимое значение, или от которых может поступать электроэнергия с опасным уровнем напряжения или опасным уровнем других характеристик электроэнергии. Уровни опасного напряжения и других характеристик электроэнергии определены в *ГОСТ Р МЭК 60204-1* (см. также *[14]*).

Устройство(а), с помощью которого(ых) осуществляется аварийный останов, должно(ы) выполнять функции разъединения только в предаварийных/аварийных ситуациях.

Полупроводниковые устройства отключения без дополнительных отключающих контактов в воздушном зазоре не удовлетворяют требованиям 10.4. Не допускается использовать полупроводниковые приборы в качестве единственных самостоятельных отключающих приборов и устройств.

Должна быть предусмотрена возможность отключения электрической системы ВЭУ от источников электрической энергии, если это требуется по условиям технического обслуживания, ремонта, осмотра или испытаний.

В конструкции ВЭУ должны быть предусмотрены вспомогательные электрические схемы с независимым источником питания (система собственных нужд) и отключающим устройством для освещения, обеспечения технологических процессов и осуществления мер безопасности во время технического обслуживания или ремонта. Данные вспомогательные схемы должны находиться под напряжением в то время, когда все остальные электрические схемы отключены.

Для электрических схем и оборудования с номинальным напряжением свыше 1000 В переменного тока или 1500 В постоянного тока см. также *[14], раздел 5.*

10.6 Система заземления

Система заземления ВЭУ должна соответствовать требованиям *серии стандартов на низковольтные электроустановки [18], Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) [19] и серии стандартов на защиту от молнии* (*см. также [20]*). В проектной документации должен быть указан диапазон проводящих свойств грунтов, которому соответствует данная система заземления, а также должны быть даны рекомендации на случай, если будет установлено несоответствие указанному диапазону.

Примечание — Дополнительные учитываемые факторы изложены в *ГОСТ Р 54418.24*.

Выбор и установка оборудования заземления должны быть выполнены в соответствии с *ГОСТ Р 50571.5.54.*

В любой электрической схеме, рассчитанной на напряжение свыше 1000 В переменного тока или 1500 В постоянного тока, должны быть предусмотрены средства и способы заземления на период технического обслуживания и ремонта (см. *[14]*).

10.7 Молниезащита

Защита ВЭУ от ударов молний должна соответствовать *ГОСТ Р 54418.24*. При проектировании молниезащиты должна быть выполнена оценка рисков травм и недостаточной безопасности персонала.

Должна быть предусмотрена защита следующих зон:

- лопастей ветроколеса/ротора;
- ступицы/вращающегося устройства;
- гондолы;
- башни.

Дополнительные компоненты молниезащиты ВЭУ для подключения к системе молниезащиты ВЭС, электрической системе ВЭС или включения, например внешние трансформаторы и распределительные устройства, в настоящем стандарте не рассматриваются.

Элементы молниезащиты электрических систем внутри ВЭУ должны быть выполнены в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 62305-4*.

10.8 Проводка

Электрические кабели должны быть рассчитаны на электрические характеристики, класс воспламеняемости, механические воздействия и условия окружающей среды в местах применения, а также должны быть смонтированы способом, на который они рассчитаны. Бронированные кабели и изолирующие трубы должны использоваться в том случае, когда имеется вероятность повреждения кабелей грызунами и другими животными.

Кабели должны быть защищены или рассчитаны на снижение возможного риска пожара в случае отказа.

Контрольные кабели должны быть проложены отдельно или защищены от силовых кабелей, если отказы изоляции не рассмотрены специально при анализе отказов.

Контрольные кабели допускается прокладывать рядом с силовыми кабелями до 1 кВ.

Кабельные зажимы, опоры и компенсаторы натяжения должны соответствовать типу кабеля, чтобы предотвращать повреждение изоляции кабеля.

Кабели должны быть защищены или надлежащим образом расположены, чтобы предотвратить повреждение от абразивного истирания и износа.

10.9 Самовозбуждение

Любая цепь электрической схемы ВЭУ, которая допускает возникновение самовозбуждения, должна быть выполнена по нормально разомкнутой схеме без фиксации включенного состояния и надежно удерживаться в разомкнутом состоянии в случае потери связи с сетью подключения.

Если конденсаторная батарея подключается параллельно с асинхронным генератором (для улучшения характеристик мощности), то в электрической схеме необходимо предусмотреть соответствующий выключатель, который должен отключать конденсаторную батарею при потере сети, чтобы избежать самовозбуждения генератора. Если в цепи генератора ВЭУ предусмотрены устройства, не допускающие его самовозбуждения, то в соответствующей документации должно быть указано, что самовозбуждение генератора исключено.

10.10 Защита от электромагнитных импульсных воздействий молнии

Конструкция защиты от электромагнитных импульсных воздействий молнии должна быть выполнена в соответствии с требованиями *ГОСТ Р МЭК 62305-4*.

Границы защиты от электромагнитных импульсов молнии должны быть выбраны таким образом, чтобы любое перенапряжение, возникающее в электрическом оборудовании, не превышало предельных значений, определяемых изоляцией оборудования.

10.11 Качество электроэнергии

Качество электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ, должно соответствовать *ГОСТ Р 51991*, *ГОСТ 32144 и ГОСТ 29322*.

Процедуры по *ГОСТ Р 54418.21* могут использоваться для подтверждения соответствия требованиям сети передачи и распределения мощности.

10.12 Электромагнитная совместимость

Все электрические компоненты, установленные в ВЭУ, должны отвечать требованиям соответствующих стандартов или требованиям *ГОСТ 30804.6.2* и требованиям к функциональной безопасности системы управления, установленным в разделе 8, если они выше.

10.13 Электронные системы и устройства преобразования энергии

Электронные системы и устройства преобразования энергии должны соответствовать окружающей среде, в которой они установлены (см. *[21], таблица 18*). Внутренняя часть ВЭУ не считается кондиционируемым пространством. Если оборудование преобразования энергии должно быть установлено внутри кондиционируемого пространства, т. е. пространства, в котором будут поддерживаться заданные параметры окружающей среды, выбор такого оборудования выполняют по отношению к окружающей среде в этом пространстве. Степень загрязнения следует выбирать исходя из уровня влажности и конденсации влаги в результате проникновения влаги при длительном обесточивании. В целях обеспечения конкретного применения внутри ВЭУ, при выборе оборудования преобразования энергии учитываемые значения параметров окружающей среды в процессе эксплуатации можно соответственно изменять относительно нормативных значений (см., например, *[21].*

Электронные системы и устройства преобразования энергии напряжением выше 1000 В переменного тока или 1500 В постоянного тока должны соответствовать *ГОСТ Р МЭК 61800-4*.

Управление и защита оборудования преобразования энергии должны также соответствовать требованиям раздела 8.

10.14 Петли проводки

Проводка, подверженная перемещению, прогибу или скручиванию в ходе эксплуатации ВЭУ, должна быть проверена на соответствие условиям эксплуатации и долговечность. Проверку следует проводить для условий окружающей среды и электрических условий в процессе эксплуатации на месте установки проводки. Срок службы проводки в условиях на месте установки должен быть более номинального срока службы ВЭУ.

Если при работе ВЭУ может происходить скручивание или прогиб гибких кабелей, таких как кабели между вращающимися частями (гондолы) и частями неподвижной конструкции (башни или фундамент), то ВЭУ должна быть спроектирована таким образом, чтобы в процессе эксплуатации не происходило повреждение жил или их изоляции.

Технические средства, управляющие предотвращением повреждения проводов или их изоляции, включая ограничение вращения, должны считаться частью системы управления.

Если большое количество кабелей сгруппировано и связано вместе, нагрузка на жгут должна быть распределена таким образом, чтобы отдельные кабели не подвергались нагрузкам, превышающим допустимые предельные значения.

Жгуты должны быть рассчитаны на воздействие механических нагрузок и крутящих и изгибающих моментов, возникающих в процессе эксплуатации.

Сечение и предельно допустимые температуры кабеля должны быть оценены исходя из рабочей температуры жгута на месте эксплуатации с учетом типичного размера жгута, количества кабелей в жгуте, по которым может протекать максимальный ток в нормальном режиме, включая электрические выводы, аналогичные по расстоянию при конечном монтаже.

10.15 Токосъемные кольца

Токосъемные кольца должны соответствовать 10.2 и *ГОСТ Р МЭК 60204-1* и должны быть рассчитаны на электрические условия и условия окружающей среды, в которых они находятся внутри ВЭУ. Токосъемные кольца должны быть рассчитаны на нормальные и аварийные условия эксплуатации (перегрузки), в которых они могут работать. Нормальные расчетные характеристики токосъемного кольца основаны на электрических нагрузках цепи. Расчетные характеристики по перегрузкам должны основываться на допустимой нагрузке по току короткого замыкания источника и могут включать токовую защиту, если она предусмотрена.

Токосъемные кольца, используемые в критических для безопасности цепях питания и управления, должны быть снабжены средствами защиты от отказов и износа.

10.16 Проводники и другие компоненты для передачи электроэнергии, расположенные вертикально

Кабельные линии и шинопроводы, проложенные вертикально, размещенные на башне, должны отвечать требованиям *ГОСТ IEC 61439-1*, *ГОСТ IEC 61439-6* — для шинопроводов, и *ГОСТ Р 50571.5.52* — для кабельных линий.

Проводники и компоненты для передачи электроэнергии должны отвечать соответствующим стандартам в отношении диапазона рабочих температур, условий окружающей среды, электроизоляции, потенциальных возможностей сопротивления электрическим импульсам и короткому замыканию.

Кабельные линии, шинопроводы и другие компоненты ВЭУ для передачи энергии, расположенные вертикально, должны обладать достаточной механической прочностью, чтобы выдерживать прогнозируемые механические нагрузки (деформацию, смещение и нагружение) для определенного использования по результатам расчетных случаев нагружения для конкретного компонента внутри конкретной ВЭУ. Секции и элементы кабельных линий должны быть надежно закреплены к башне или к элементам башни, предназначенным для поддержки узлов кабельных линий.

При оценке этих кабельных линий, шинопроводов и компонентов должны учитываться следующие условия:

a) статические нагрузки на элементы системы;

b) ожидаемый прогиб и силы на узлах передачи и несущей конструкции в результате изгиба при ожидаемых экстремальных условиях;

c) ожидаемое направление силы и величина смещения узла;

d) усталость элементов, ослабление крепежа;

e) масштабный фактор, износ, деформация и пластическая деформация полимерных электроизоляционных материалов;

f) потеря электропроводности или электроизоляционных свойств;

g) эксплуатация в отношении намеченного срока службы ВЭУ или установленный период технического обслуживания для узла.

Узлы оценивают посредством испытаний, анализа или их сочетания.

Для представления всей системы можно использовать масштабированное испытание.

Механическую и конструкционную прочность узла электропередачи и опорных элементов можно оценивать посредством анализа по оценке РСН. РСН должны включать и рассматривать силы, воздействующие на узел, сборочные узлы и элементы, включая изоляционные и проводящие материалы.

В режимы короткого замыкания для систем вертикальной передачи энергии должны быть включены электрические, тепловые и механические воздействия на элементы, а также на установленные системы.

Если в методику анализа не включены воздействия истирания/износа и ползучести материала на электроизоляцию, может потребоваться проведение испытаний.

10.17 Электроприводы и двигатели-преобразователи

Требования к электроприводам и двигателям-преобразователям см. в *[22]*.

Управляющие элементы электроприводов и двигателей-преобразователей системы поворота лопастей и установки на ветер должны дополнительно соответствовать надлежащим требованиям согласно разделу 8.

10.18 Электрические машины

Требования к электрическим машинам см. в *[23]*. Электрические машины должны иметь номинальную производительность при длительной эксплуатации, подходящую для намеченной сферы применения.

Примечание — Необходимо учитывать длину соединительного кабеля, форму кривой напряжения возбуждения, использование изолированных подшипников и устройства заземления вала.

Турбогенератор должен быть рассчитан на непрерывную эксплуатацию (режим работы S1 в соответствии с *ГОСТ IEC 60034-1*).

Сочетание электрической машины, приводимой в действие приводом частотного преобразователя, должно координироваться электроизоляционными номинальными параметрами.

10.19 Силовые трансформаторы

Низковольтные трансформаторы, встроенные в ВЭУ (включая выводы), или должны быть закрытого исполнения, или должны располагаться в специально отведенных местах за ограждениями или панелями.

Высоковольтные трансформаторы, встроенные в ВЭУ, должны отвечать требованиям ограниченного доступа и блокировки (см. 10.21).

10.20 Низковольтные комплектные устройства распределения и управления

Низковольтные комплектные устройства (НКУ) распределения и управления и аппаратура управления, работающие под напряжением до 1000 В переменного тока или 1500 В постоянного тока должны отвечать требованиям *ГОСТ IEC 61439-1* и других частей *[24]* и должны быть рассчитаны для электрических и экологических условий, которым они подвергаются внутри ВЭУ.

Все ограждения НКУ и аппаратуры управления должны быть обеспечены предупреждающей маркировкой, требуемой по *ГОСТ IEC 61439-1* и другими частями *[24]*.

10.21 Высоковольтные комплектные распределительные устройства

Высоковольтные КРУ, эксплуатируемые под напряжением выше 1000 В переменного тока или 1500 В постоянного тока должны отвечать требованиям *[25]* и должны быть рассчитаны для электрических и экологических условий, которым они подвергаются внутри ВЭУ.

Высоковольтные КРУ должны размещаться в местах, доступных только для уполномоченного персонала. Предупреждающая маркировка должна быть нанесена на места доступа персонала к ВЭУ, люк или дверь защитного оборудования, а также, если это необходимо для обеспечения безопасности за пределами доступа, люка или двери.

Высоковольтное КРУ, установленное в местах доступа персонала, осуществляющего нормальное техническое обслуживание, должно быть заключено в металлическую оболочку и защищено в соответствии с классификацией КРУ по стойкости к внутренней дуге (IAC). Для всего станционного оборудования, к которому персонал может иметь доступ при нормальной работе и техническом обслуживании, КРУ должно отвечать доступу A IAC согласно *ГОСТ Р 55190*.

Высоковольтные КРУ должны успешно пройти испытания на воздействие внутренней дуги током короткого замыкания для требуемой защиты по IAC длительностью не менее 1 с (см., например, *ГОСТ Р 55190—2022, приложение А)* и иметь соответствующую маркировку.

Высоковольтные КРУ должны быть установлены в соответствии с инструкцией изготовителя по заданным изготовителем параметрам. Предохранительные устройства должны осуществлять гарантированное отключение, не создавая рисков для персонала или оборудования.

КРУ, настроенные на автоматическую работу, должны иметь возможность отключения блокировки и переключения на ручной режим управления в случае необходимости в процессе эксплуатации, либо для устранения аварийных ситуаций.

В соответствии с требованиями 10.4, высоковольтные КРУ и связанные элементы управления должны иметь средства для блокировки в безопасном состоянии.

КРУ с элегазовыми выключателями должны быть установлены в зонах с достаточной вентиляцией для защиты персонала от утечки.

10.22 Ступицы

Оборудование внутри ступицы должно быть обеспечено ограждениями, рассчитанными на применение в электрических и экологических условиях в соответствии с *ГОСТ 14254* для защиты электрических элементов от повреждения. Электрошкафы и ограждения должны быть обеспечены дверьми или надежно закрепленными крышками.

Проводка, связанная с системой управления, должна быть механически защищена от повреждения из-за вращения ступицы, взаимодействия обслуживающего персонала и непреднамеренных ударов внутри ступицы.

11 Сборка, монтаж и установка

11.1 Общие требования

Сборку, монтаж и установку ВЭУ следует проводить на основе требований системы стандартов безопасности труда, защиты окружающей среды и настоящего стандарта. Должны быть учтены конструктивные особенности ВЭУ, производства работ по конкретному сооружению/конструкции/оборудованию, климат, рельеф и другие особенности площадки размещения.

ВЭУ должна быть смонтирована в соответствии с рекомендациями изготовителя. Должна быть выполнена проверка правильности работы смазки и предпусковое освидетельствование всех элементов конструкции.

Изготовитель ВЭУ должен предоставить руководство по монтажу (как часть инструкции по монтажу, пуску, регулированию и обкатке изделия), ясно описывающее требования к сборке, установке и монтажу ВЭУ и комплектующего оборудования. Работы по сборке, установке и монтажу ВЭУ должны выполняться специально обученным квалифицированным персоналом.

Организация работ должна исключать возможность возникновения опасных ситуаций. Площадку для ВЭУ следует подготовить и эксплуатировать таким образом, чтобы работы можно было выполнять безопасно и эффективно. В том числе должны быть предусмотрены меры по предотвращению несанкционированного доступа. Производитель работ должен своевременно распознавать и устранять имеющиеся и потенциальные факторы риска.

Должны быть составлены перечни планируемых работ, вестись журналы выполненных работ и фиксироваться их результаты.

Персонал, выполняющий работы по сборке, установке и монтажу ВЭУ, должен использовать соответствующие средства защиты глаз, органов слуха, головы и специальную обувь. Все работники, занятые на верхолазных работах и в работах на высоте, выше уровня земли или воды, должны быть специально обучены и аттестованы для выполнения этих работ и должны использовать ремни безопасности, устройства безопасности для выполнения верхолазных работ, прочие приспособления и приборы безопасности *в соответствии с правилами [26]*. При работах на воде при необходимости следует использовать спасательные жилеты.

Должны быть приняты соответствующие меры, чтобы избежать возникновения поперечных колебаний в возведенной башне ВЭУ (без установленной гондолы) при воздействии критических скоростей ветра и турбулентности. Значения этих критических скоростей ветра и меры предосторожности должны быть указаны в руководстве по монтажу.

Оборудование для сборки, установки и монтажа должно содержаться в исправном состоянии и соответствовать требованиям выполняемой задачи. Краны, тали и грузоподъемное оборудование, включая все стропы, крюки и прочая техника, должны отвечать требованиям безопасного подъема.

Во время установки ВЭУ площадка должна поддерживаться в таком состоянии, чтобы не было угрозы безопасности.

Должны быть приняты особые меры предосторожности в случае возможного возникновения экстремальных ситуаций, таких как град, гроза, сильный ветер, землетрясение, обледенение, при сборке, установке и монтаже ВЭУ.

11.2 Планирование работ

Сборка, монтаж и установка ВЭУ и комплектующего оборудования должны отвечать требованиям к качеству указанных работ, требованиям безопасности, установленным в соответствующих нормативных документах, и соответствовать системе стандартов безопасности труда.

Рекомендуется, чтобы планы проведения работ (руководство по сборке, монтажу и установке) включали:

- нормы безопасности при проведении земляных работ;
- подробные чертежи и спецификации, обеспечивающие выполнение работ, и план осуществления контроля;
- описание технологии, обеспечивающей надежное и качественное монтаж/установку закладных деталей, таких как каркасы, болты, якоря и арматура;
- стандарты и нормы для производства бетонных смесей, их транспортировки, взятия контрольных образцов и их анализа, заливки, отделки укладки изоляции, трубопроводов и проводки;
- нормы безопасности при проведении взрывных работ;

- порядок производства работ по установке элементов конструкции башни (мачты) и элементов крепления.

11.3 Доставка на площадку

Для крупногабаритного оборудования должна быть разработана инструкция по транспортированию. Требования к транспортированию крупногабаритных грузов должны соответствовать ГОСТ 15846, ГОСТ 26653 и правилам дорожного движения Российской Федерации [27].

Работы по доставке оборудования ВЭУ на площадку следует выполнять с учетом требований безопасности и следующего:

- наличия преград и маршрутов движения;
- наличия и особенностей дорожного движения;
- вида и состояния дорожного покрытия;
- ширины дороги и просветов;
- несущей способности дорожного покрытия и грунта;
- грузоподъемности транспорта;
- требований к перемещению оборудования в пределах строительной площадки.

11.4 Параметры окружающей среды

Монтажа ВЭУ следует проводить при значениях параметров окружающей среды, указанных в ее технической документации. Следует учитывать следующие факторы окружающей среды и характеризующие их параметры:

- скорость ветра;
- температура окружающей среды;
- снегопад и гололед;
- предельная дальность видимости;
- песчаная буря;
- гроза;
- видимость;
- дождь.

11.5 Документация

ВЭУ должна сопровождаться технической документацией, включающей полный комплект чертежей, спецификаций и инструкций и т. п., необходимых для выполнения сборочных, монтажных, подъемных, транспортных и строительных работ. Виды и комплектность конструкторских документов должны соответствовать *ГОСТ 2.102*.

Документация должна содержать информацию о всех допустимых нагрузках на оборудование при выполнении перечисленных выше работ в соответствии с *ГОСТ Р 51991*. Должны быть указаны веса всех сборочных единиц, обозначены точки подъема, приведено описание технологии транспортирования, подъема, установки и монтажа оборудования. В комплект оборудования должны входить специальные устройства и приспособления, предназначенные для выполнения данных видов работ.

Инструкции по монтажу и погрузочно-разгрузочным работам должны включать информацию по ожидаемым нагрузкам и точкам безопасного подъема элементов конструкции и/или узлов.

11.6 Перемещение, погрузка, разгрузка и хранение

Перемещение оборудования ВЭУ в пределах площадки во время монтажа должно осуществляться в соответствии с рекомендациями изготовителя.

При размещении ВЭУ на холмистой местности все тяжелое оборудование и элементы конструкции, устанавливаемые на площадке, имеющей уклон, должны быть зафиксированы от самопроизвольного перемещения. Все погрузочно-разгрузочные и сборочные работы рекомендуется выполнять на площадках соответствующего размера, расположенных ниже площадки установки ВЭУ. Там, где это обеспечить невозможно, все тяжелое оборудование должно быть надежно закреплено в устойчивом положении.

Чтобы предотвратить риск повреждения лопастей, гондолы, прочих аэродинамических элементов конструкции и легких решетчатых конструкций, следует выполнить их фиксацию с помощью канатов, стоек и грунтовых якорей.

11.7 Фундамент/распорные системы

Если это указано изготовителем, для обеспечения безопасности при установке или сборке необходимо применять специальные инструменты, фиксаторы, приспособления и другое оборудование.

11.8 Сборка и монтаж

Сборка и монтаж ВЭУ должны проводиться в соответствии с рекомендациями изготовителя.

Сборка и монтаж должны осуществляться персоналом, прошедшим обучение и проинструктированным в отношении надлежащих безопасных методик сборки и монтажа.

После сборки следует проверить правильности работы системы смазки и предпусковое освидетельствование всех элементов конструкции.

В процессе установки и монтажа любой элемент электрической системы ВЭУ не должен находиться под напряжением, за исключением тех случаев, когда это необходимо по условиям технологии монтажа. В этом случае питание следует подавать в соответствии с технологией, разработанной, оформленной в письменном виде и предоставленной изготовителем ВЭУ.

Все элементы конструкции, самопроизвольное движение которых (вращательное или поступательное) является потенциальным источником опасности, в процессе монтажа должны быть закреплены так, чтобы сделать их самопроизвольное движение невозможным.

11.9 Крепежные соединения

Резьбовые крепежные изделия и прочие крепежные приспособления должны быть установлены с соблюдением рекомендуемого изготовителем момента вращения и прочих инструкций. У соединений, обозначенных как ответственные, должен быть выполнен контроль усилий затяжки и соблюдены прочие требования, предъявляемые к соединениям такого типа.

В частности, должно быть проверено следующее:

- правильности сборки, соединения и крепления растяжек, тросов, винтовых стяжек, монтажных мачт, опор и прочих устройств;
- надлежащее присоединение подъемных устройств для обеспечения требований безопасности подъемных работ.

11.10 Краны, лебедки и подъемное оборудование

Краны, лебедки и прочее подъемно-транспортное оборудование, включая крюки, тросы, стропы, должно соответствовать нормам безопасности при выполнении подъемно-транспортных работ по *ГОСТ 12.3.009* и *ГОСТ 12.3.002*.

Все грузоподъемное оборудование, стропы и крюки должны быть проверены и аттестованы на предмет безопасности нагружения.

12 Ввод в эксплуатацию, эксплуатация и техническое обслуживание

12.1 Общие требования

В руководстве ВЭУ по эксплуатации и техническому обслуживанию должны быть подробно изложены операции по вводу в эксплуатацию, эксплуатации, техническим осмотрам и техническому обслуживанию ВЭУ с соблюдением норм системы стандартов безопасности труда.

При разработке и изготовлении ВЭУ, которые могут работать в составе ВЭС, функционирующих в составе Единой энергетической системы России, следует учитывать требования к ним, установленные в правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации [28]. Все аспекты, необходимые для учета указанных требований должны быть отражены в документации к ВЭУ: инструкции по монтажу, пуску, регулированию и обкатке изделия; руководстве по эксплуатации; специальных инструкциях и других документах, когда это необходимо.

При вводе в эксплуатацию ВЭУ подключение оборудования ВЭУ к электрической сети и первоначальную подачу питания проводят в соответствии с инструкцией по порядку подключения оборудования, предоставленной изготовителем.

В проект должны быть включены положения по безопасному доступу для проведения осмотров и техобслуживанию всех элементов конструкции.

Электрическое измерительное оборудование, временно установленное на ВЭУ для выполнения измерений, также должно отвечать требованиям раздела 10.

Обслуживающий персонал при выполнении работ, связанных с обслуживанием и эксплуатацией установки, должен использовать соответствующие рекомендованные средства защиты органов зрения, слуха, специальную обувь и головные уборы. Весь персонал, выполняющий верхолазные работы и работы на высоте, в том числе над поверхностью воды, должен быть обучен для выполнения данных видов работ. В процессе выполнения перечисленных видов работ персонал должен использовать соответствующие привязные ремни или другие устройства безопасности. В случае выполнения работ над поверхностью воды необходимо предусмотреть плавучие спасательные средства. При необходимости, в воде следует использовать спасательные жилеты.

12.2 Общие требования для осуществления безопасности эксплуатации, проведения осмотров и технического обслуживания

Управление процессом нормальной эксплуатации ВЭУ должно осуществляться оперативным персоналом, расположенным на уровне земли. Должна быть обеспечена возможность выполнения определенной, местной, ручной коррекции автоматической системы/системы дистанционного управления.

При выявленных внешних событиях, которые являются по отношению к ВЭУ отказами и не являются критическими для безопасности, типа потери и восстановления электрической нагрузки, допускается автоматическое возвращение к нормальной эксплуатации после ликвидации отказа.

Ограждения, предусмотренные для защиты персонала от случайного контакта с подвижными элементами конструкции, которые в процессе эксплуатации подлежат частому осмотру, должны быть зафиксированы, если не предусматривается частый доступ, при условии которого они могут быть выполнены подвижными/съемными.

Ограждения должны:

- иметь прочную конструкцию;
- не допускать легкого проникновения, и
- по возможности, позволять выполнять основное техническое обслуживание без демонтажа.

При проектировании должны быть предусмотрены устройства, обеспечивающие возможность подключения диагностического оборудования для обнаружения неисправностей.

Для обеспечения гарантий безопасности обслуживающего и ремонтного персонала в конструкции должны быть предусмотрены:

- безопасные проходы, пути доступа и рабочие места для осмотра и планового технического обслуживания;
- соответствующие средства защиты персонала от случайного контакта с вращающимися элементами конструкций или движущимися частями;
- средства обеспечения безопасного функционирования и эксплуатации спасательных тросов, привязных ремней безопасности или других установленных средств безопасности при выполнении верхолазных работ и работ на уровне выше земли;
- устройства блокировки вращения ветроколеса, механизма ориентации на ветер или иного механического движения, как например, механизма поворота лопастей на период обслуживания в соответствии с режимами ветра и расчетными случаями, определенными в РСН 8.1, а также устройства для безопасной разблокировки;
- предупреждающие знаки в отношении проводов под напряжением;
- устройства, предусмотренные для разряда накопленного электричества;
- устройства соответствующей пожарной безопасности для персонала, а также альтернативный путь эвакуации из гондолы.

Процедуры технического обслуживания должны включать требования к безопасности персонала, входящего в огороженное рабочее пространство, например во внутреннюю часть ступицы или лопасти, которые предусматривают немедленные спасательные действия в любой опасной ситуации, которая известна дежурному персоналу.

12.3 Инструкции по вводу в эксплуатацию

12.3.1 Общие требования

Изготовитель ВЭУ должен предоставить инструкции по вводу в эксплуатацию.

***12.3.2* Подключение к сети**

Инструкции изготовителя должны включать процедуры первоначального включения электрической системы ВЭУ и подключения оборудования ВЭУ к электрической сети.

***12.3.3* Испытания при вводе в эксплуатацию**

Инструкции производителя должны включать методики проведения испытаний ВЭУ после монтажа для подтверждения того, что параметры работы ВЭУ при заданных эксплуатационных параметрах всех приборов и устройств, систем управления и защиты соответствуют расчетным параметрам безопасности. Инструкции должны как минимум включать в себя проверку следующих функций:

- надежное включение;
- надежное выключение;
- безопасное аварийное отключение;
- безопасное аварийное отключение при превышении скорости ветра (для поверки допускается использовать достоверное моделирование ветра с требуемой скоростью);

а также проверку правильности функционирования системы защиты (см. раздел 8).

***12.3.4* Документирование**

Документация ВЭУ (руководства и инструкции) должна включать требования о фиксации всех значений определяемых параметров, результатов испытаний, ввода в эксплуатацию, контроля, а также минимальный срок хранения указанных данных.

***12.3.5* Действия после ввода в эксплуатацию**

По завершении монтажа и перед эксплуатацией в рекомендованный производителем пусковой период должны быть завершены все специальные работы, необходимые для функционирования ВЭУ.

Данные операции могут включать, но не ограничиваться предварительной затяжкой крепежа, заменой смазывающих жидкостей, проверкой прочих элементов на предмет настройки и работы, и правильной регулировкой параметров управления.

Площадка ВЭУ должна быть восстановлена для предотвращения опасных рисков и эрозии.

***12.4* Руководство по эксплуатации**

***12.4.1* Общие требования**

Руководство по эксплуатации должно быть предоставлено производителем ВЭУ и дополнено информацией об особенностях на месте размещения ВЭУ, выявленных к моменту ввода в эксплуатацию. Руководство должно как минимум включать:

- требования, которые должны выполняться в процессе эксплуатации специально обученным и подготовленным персоналом;
- пределы безопасной эксплуатации и описание систем;
- процедуры запуска и останова;
- перечень действий при аварийном сигнале;
- план аварийных процедур, а также установленные требования в отношении обязательности:
  a) использования установленных мер защиты зрения, ног, слуха и головы;
  b) обучения персонала, поднимающегося на башню или работающего на высоте выше уровня земли или воды, таким работам, если такие работы необходимы, и использования при проведении таких работ сертифицированных специальных технических средств, таких, как ремни безопасности, безопасные средства восхождения или иные устройства безопасности;
  c) при необходимости, в окружении воды необходимо использовать средства обеспечения плавучести.

В наличии должно быть руководство, доступное для эксплуатационного и обслуживающего персонала на языке, на котором может читать и понимать указанный персонал.

***12.4.2* Инструкции по протоколированию процессов эксплуатации и технического обслуживания**

Техническая документация должна включать инструкции по протоколированию процессов эксплуатации и технического обслуживания, содержащие как минимум описание процессов фиксации:

- величины выработанной энергии;
- длительности времени работы;
- времени пребывания в отключенном состоянии;
- даты и времени выявления отказов;

- даты и времени проведения обслуживания и ремонтов;
- причин отказов и обслуживания.

А также:

- описание предпринятых действий;
- перечень замененных деталей.

Техническая документация должна включать протоколы фиксации перечисленного выше, которые должны храниться как минимум весь период эксплуатации ВЭУ/ВЭС.

12.4.3 **Инструкции по незапланированным автоматическим остановам**

В руководстве должно быть установлено требование, чтобы после любого незапланированного автоматического выключения, вызванного отказом или неисправностью, если в руководстве по эксплуатации или инструкциях не предусмотрено иное, оператор обследовал причину до повторного включения ВЭУ. Все незапланированные автоматические выключения должны быть зарегистрированы.

12.4.4 **Инструкции по предотвращению снижения надежности**

Руководство по эксплуатации должно включать положения о действиях по обслуживанию и ремонту ВЭУ, обеспечивающие предотвращение ситуаций ненормального функционирования или уменьшения надежности ВЭУ. Такие инструкции должны как минимум содержать:

- методы обеспечения надежности;
- требования о выявлении причин любого признака ненормального функционирования или уменьшения надежности ВЭУ;
- требования об устранении причин любого признака ненормального функционирования или уменьшения надежности, находящихся в компетенции обслуживающего персонала ВЭУ (ВЭС);
- информацию о действиях по реализации указанных выше требований;
- список причин любого признака ненормального функционирования или уменьшения надежности, находящихся в компетенции обслуживающего персонала ВЭУ (ВЭС);
- список причин любого признака ненормального функционирования или уменьшения надежности, не находящихся в компетенции обслуживающего персонала ВЭУ (ВЭС) и информацию о действиях в случае выявления таких причин/признаков.

Руководство по эксплуатации ВЭУ, как часть указанных выше инструкций или отдельно, должно также включать информацию:

- о возможных аварийных ситуациях ВЭУ, способах их обнаружения и оповещения о них;
- о реакции ВЭУ на аварийные ситуации;
- о действиях персонала в случаях аварийных ситуаций.

12.4.5 **Планирование рабочих процедур**

В руководстве должны быть установлены требования по обеспечению безопасного процесса эксплуатации ВЭУ, включая:

- эксплуатацию электрических систем;
- координирование работ по обслуживанию и ремонту;
- описание процедур по поддержанию оборудования в чистоте;
- описание верхолазных работ на башне;
- процедуры обращения с оборудованием;
- порядок действий при плохой погоде;
- процедуры по поддержанию связи и порядок действий в аварийных ситуациях.

12.4.6 **План действий в аварийных ситуациях**

Должны быть учтены аварийные ситуации, возникновение которых возможно в процессе эксплуатации, а их описание и порядок действий персонала изложены в руководстве по эксплуатации.

В руководстве должно содержаться требование, запрещающее персоналу приближаться к ВЭУ, если на ней возник пожар или существует реальная угроза разрушения конструкции, до тех пор, пока риск точно не установлен.

При разработке плана действий в аварийных ситуациях необходимо принять во внимание, что угроза разрушения конструкции ВЭУ возрастает в случае:

- высоких скоростей ветра;
- гололеда;
- грозы, ударов молний;
- сейсмических явлений;
- разрыва или ослабления анкерных растяжек;
- аварии тормоза;
- дисбаланса ветроколеса;

- ослабления крепежа;
- отказов в системе смазки;
- пыльных бурь;
- пожара и наводнения;
- прочих видов аварий.

12.5 Руководство по техническому обслуживанию

Руководство по техническому обслуживанию должно быть разработано производителем ВЭУ и дополнено информацией об особенностях на месте размещения ВЭУ, выявленных к моменту ввода в эксплуатацию. Руководство должно как минимум включать:

- требование в отношении того, что проверки и техобслуживание должны проводиться персоналом, соответствующим образом подготовленным или проинструктированным для этих работ, через заданные интервалы времени в соответствии с инструкциями, изложенными в руководстве по техническому обслуживанию ВЭУ;
- описание подсистем ВЭУ и их принципа действия;
- график проведения смазочных работ, предписывающий частоту смазывания, виды смазок или других специальных жидкостей;
- порядок действий при повторном вводе в эксплуатацию;
- периоды технических осмотров и процедур;
- идентификацию деталей, подверженных износу, критерии их замены и инструкции по их замене;
- процедуры контроля работоспособности подсистем защиты;
- полную схему проводки и схему межэлементных соединений;
- графики осмотра и подтяжки растяжек и болтовых соединений, графики предварительного нагружения, натягивание и затягивание;
- диагностические процедуры и руководство по выявлению и устранению неисправностей;
- описание и требования к работам по внеплановому техническому обслуживанию;
- рекомендованный перечень запасных частей, инструментов и принадлежностей (запас инструментов и принадлежностей, см. *ГОСТ Р 2.601*);
- комплект производственных сборочных и монтажных чертежей;
- список инструментов и приспособлений.

13 Дополнительные требования к ветроэнергетическим установкам, предназначенным для эксплуатации в зонах с холодным климатом

13.1 Общие требования

Холодные климатические условия включают условия обледенения и/или условия низких температур. К условиям низких температур относятся условия с температурой окружающей среды ниже принятой для нормальных климатических условий (см. 6.4.2). Условия обледенения («атмосферное обледенение») включают в себя все процессы, при которых перемещающиеся или падающие капли воды, дождь, изморось или мокрый снег в атмосфере начинают примерзать или прилипать к любому объекту, находящемуся на открытом воздухе. Типы обледенения, ледовые классы и воздействия обледенения на объекты указаны в *ГОСТ Р ИСО 12494*. Для простоты, в настоящем стандарте холодные климатические условия приравнены к условиям обледенения и условиям низких температур, если не установлено другое.

Должно быть определено влияние холодного климата на структурную целостность систем безопасности ВЭУ, на конструкции и системы ВЭУ.

Примечание — В зарубежных нормативных документах и литературе принято использовать сокращения CC — холодные климатические условия (Cold Climate), IC — условия обледенения (Icing Climate) и LTC — условия низких температур (Low Temperature Climate).

13.2 Условия обледенения и условия низких температур

При работе ВЭУ в условиях низких температур как минимум необходимо учитывать их влияние на следующее:

- материалы элементов конструкции;

- плотность воздуха;
- пусковые процедуры;
- вязкость масел и смазок.

Как минимум, необходимо учитывать следующие особенности работы ВЭУ в условиях обледенения:

- пониженные технические характеристики ВЭУ по причине обледеневших лопастей;
- неравномерное распределение льда на лопастях ВЭУ;
- отслоение и осыпание льда с лопастей;
- воздействия обледенения на измерения ветра;
- возросшие уровни шума;
- длительные остановки.

13.3 Факторы внешней среды холодного климата

13.3.1 Общие требования

Условия холодного климата отличаются от условий нормального климата (6.4.2) диапазоном значений температуры окружающей среды, плотностью воздуха и льдообразованием.

13.3.2 Класс безопасности ВЭУ для холодного климата

Внешние условия, которые должны быть учтены при проектировании ВЭУ, зависят от предполагаемой площадки размещения или типа площадки для установки ВЭУ. Для учета воздействий низких температур используют значения трех температур окружающей среды, которые обобщенно описывают площадки размещения ВЭУ в холодном климате, но не дают точное представление о какой-либо конкретной площадке.

Класс безопасности ВЭУ для холодного климата характеризуется следующими температурами окружающей среды:

- минимально допустимая температура окружающей среды для эксплуатации ВЭУ (мгновенное значение), $\theta_{min,operation}$, равна минус 30 °С;
- минимально допустимая температура окружающей среды, ожидаемая в среднечасовом значении (период повторяемости 1 год), $\theta_{1year,min}$, равна минимальной задаваемой температуре и равна минус 40 °С;
- средняя годовая температура окружающей среды, θ_{mean}, равна минус 5 °С.

Прочие условия окружающей среды соответствуют нормальным климатическим условиям (см. 6.4.2).

13.4 Проектирование конструкции

При проектировании ВЭУ для условий низких температур плотность воздуха считается равной 1,225 кг/м^3, чтобы допустить использование ВЭУ, спроектированных в соответствии со стандартными классами ВЭУ.

Воздействие фактической плотности воздуха на площадке под влиянием температуры и высоты должно учитываться в ходе анализа пригодности конкретной площадки.

Примечание — Для площадок на уровне моря наиболее характерна плотность воздуха 1,3 кг/м^3.

13.5 Расчетные случаи и варианты нагружения

13.5.1 Общие требования

Холодные климатические условия создают особые расчетные случаи для ВЭУ. Для условий обледенения необходимо учитывать влияние нарастания льда на аэродинамические и весовые характеристики лопастей. Для эксплуатации в условиях низких температур в проекте ВЭУ необходимо учитывать низкие температуры окружающей среды (см. 13.3.2), приводящие к более высокой плотности воздуха, чем в нормальных климатических условиях (см. 6.4.2), необходимости выбора подходящих материалов (см. 13.5.3) и связанным с этим последствиям.

Нарастание льда на лопастях ветроколеса/ротора часто происходит при температурах выше, чем минимальные температуры окружающей среды (см. 13.3.2).

В холодных климатических условиях необходимо оценивать измененные технические характеристики ВЭУ, приводящие к сдвигу точки эксплуатации ВЭУ. Как минимум, необходимо учитывать следующее:

- неблагоприятное поведение контроллера ВЭУ, например по причине некорректных точек момента вращения и поворота лопастей в результате различных аэродинамических характеристик лопастей;
- увеличение циклов «пуск-остановка»;
- изменение в поведении лопастей ВЭУ;
- изменения собственной частоты по причине дополнительной массы льда на лопасти.

Последствием вышеуказанных воздействий обледенения может быть возрастание нагрузки. Возрастание нагрузки при обледенении может также быть последствием дисбалансов в результате измененной аэродинамики ветроколеса/ротора и дополнительной массы льда. Дополнительные указания можно найти в приложении *D*.

13.5.2 **Расчет нагрузок**

Для холодных климатических условий должно быть учтено влияние на поведение контроллера ВЭУ и нагрузки обледенения, прежде всего нарастания льда на лопастях ветроколеса/ротора, и низких температур при возросшей плотности воздуха. Дополнительные указания можно найти в приложении *D*.

13.5.3 **Выбор подходящих материалов**

Для учета влияния условий низких температур холодного климата расчет всех нагрузок должен соответствовать измененному диапазону температур в целях учета свойств материала. Значение плотности воздуха согласно 13.4 может использоваться для всех температурных диапазонов холодного климата.

Верификации предельной прочности для элементов конструкции, подверженных воздействию окружающей температуры, должны учитываться для $\theta_{min,operation}$, за исключением нагрузок, полученных из РСН 7.1, 8.1 и 8.2, учитываемых с $\theta_{1year,min}$. В качестве альтернативы производителем может также быть определена минимальная температура для РСН 8.1. Должны учитываться верификации для усталостной прочности θ_{mean}.

Примечание — Минимальную температуру и случаи соответствующих нагружений для элементов конструкции, не подверженных влиянию условий окружающей среды, должен определять производитель.

13.6 Системы управления

В дополнение к требованиям для нормальных климатических условий, указанным в разделе 8, элементы системы управления должны быть спроектированы с учетом сдвига точки эксплуатации ВЭУ в результате обледенения ВЭУ, специфических температур окружающего воздуха и остановки согласно определению в 13.3.2. Холодные климатические условия особенно следует учитывать в следующих случаях:

- при обеспечении безопасности функционирования контроллера ВЭУ в холодных климатических условиях;
- при необходимости осуществления процедуры пуска для безопасного обратного включения ВЭУ после события, ведущего к остыванию ветрогенератора до минимальной рабочей температуры окружающей среды $\theta_{min,operation}$ или ниже (из-за нарушения энергоснабжения, технического обслуживания или иных причин);
- когда необходимо учитывать их воздействие на динамику ВЭУ из-за разных значений плотности воздуха;
- при возрастании критически важной для безопасности энергии, например, в ступице;
- при воздействии льда/низких температур на датчики и обработку данных.

Если эксплуатация обледеневшей ВЭУ не учитывается в прогнозируемых нагрузках, необходимо принять меры для предотвращения эксплуатации обледеневшей ВЭУ. Эти меры должны быть зарезервированы; единичный отказ не должен привести к непредусмотренной эксплуатации обледеневшей ВЭУ.

13.7 Механические системы

В дополнение к требованиям к механическим системам для нормальных климатических условий, рассматриваемым в разделе 9, механические системы ВЭУ должны проектироваться с учетом минимальных значений температур окружающей среды во время эксплуатации и остановки, указанных в 13.3.2.

Необходимо обеспечить достижение значения температуры масла в мультипликаторе, предотвращающего повреждение до передачи энергии. В отношении процедуры холодного пуска — см. 13.6.

13.8 Электрические системы

В дополнение к требованиям к электрическим системам для нормальных климатических условий, рассматриваемым в разделе 10, электромонтаж ВЭУ должен проектироваться с учетом окружающих температур окружающей среды во время эксплуатации и остановки, указанных в 13.3.2.

Возможность эксплуатации ВЭУ в холодных климатических условиях особенно следует учитывать при:

- расчетах и выборе материалов электрических компонентов конструкции;
- разработке процессов восстановления сети при выключении ВЭУ при минимальной температуре окружающей среды $\theta_{1year,min}$, описанной в 13.3.2;
- разработке процедур пуска согласно определению в 13.6.

Приложение А
(обязательное)

Проектные данные для создания ветроэнергетических установок специального класса безопасности (класса S)

А.1 Общие проектные данные для создания ВЭУ класса S

При проектировании ВЭУ специального класса безопасности для всех условий, отличающихся от условий для нормальных классов безопасности ВЭУ, указанных в 6.2, в проектной документации должны быть указаны как минимум следующие данные.

А.1.1 Характеристики ВЭУ

Номинальная мощность, кВт.

Рабочий диапазон скорости ветра на уровне оси ветроколеса V_{in} – V_{out}, м/с.

Расчетный срок службы, лет.

Описание системы молниезащиты.

Жесткость и демпфирующие свойства фундамента.

А.1.2 Параметры ветра

А.1.2.1 Общие

Среднеквадратичное отклонение интенсивности турбулентности как функция средней скорости ветра.

Модель и параметры турбулентности.

Экстремальные скорости ветра на уровне оси ветроколеса V_{e1} и V_{e50}, м/с.

Модель экстремального порыва ветра и параметры для периодов повторяемости 1 год и 50 лет.

Модель экстремального изменения направления и параметры для периодов повторяемости 1 год и 50 лет.

Модель экстремального когерентного порыва ветра и параметры.

Модель и параметры экстремального когерентного порыва ветра с изменением направления.

Модель и параметры экстремального сдвига воздушного потока.

А.1.2.2 Суммарные или в секторе (30 ° или меньше)

Среднегодовая скорость ветра, м/с.

Осредненный угол наклона набегающего потока, °.

Распределение скорости ветра (Вэйбулл, Рейли, измерения, другой), модель профиля.

Модель и параметры профиля ветра.

Среднее значение интенсивности турбулентности в секторе и стандартное отклонение как функция средней скорости ветра.

Модель и параметры влияния аэродинамического следа [эффективная интенсивность турбулентности или динамика изгибания аэродинамического следа]

А.1.3 Условия, накладываемые электрической сетью

Номинальное напряжение и его диапазон, В.

Номинальная частота и ее диапазон, Гц.

Асимметрия напряжений, В.

Годовое количество и максимальная продолжительность отключений от сети.

Автоматическое повторное включение (АПВ) (описание).

График потребления реактивной мощности.

Требования к управлению мощностью.

Требования к графику нагрузки.

Метод заземления нейтрали

Метод обнаружения/защиты от замыкания на землю.

Предельные токи короткого замыкания и их продолжительность.

Полное сопротивление короткого замыкания на клеммах ВЭУ.

Режим работы при внешнем симметричном и несимметричном коротком замыкании (описание).

Фоновое искажение гармонического напряжения сети.

Наличие несущей частоты (ВЧ), сигнализирующее о наличии аналогий частоты.

Прочие требования по обеспечению совместимости с сетью.

А.1.4 Прочие факторы окружающей среды (при их наличии)

Плотность воздуха, кг/м^3.

Нормальные и экстремальные температурные диапазоны, °С.

Относительная влажность воздуха, %.

Солнечное излучение (энергетическая освещенность), В/м^2.

Дождь, град и снег.

Модель и параметры обледенения.

Химически активные вещества в атмосфере.

Запыленность атмосферы (механические частицы).
Грозовая обстановка.
Солевой туман, г/м^3.
Модель землетрясения и расчетные параметры.

А.2 Дополнительные проектные данные описания ВЭУ класса S для холодного климата (класс CC-S)

См. таблицу А.1.

Таблица А.1 — Дополнительные проектные данные описания ВЭУ класса S для холодного климата (класс CC-S)

Обозначение	Единица измерения	Описание
$\theta_{min,operation}$	K	Минимально допустимая температура окружающей среды для эксплуатации ВЭУ
$\theta_{1year,min}$	K	Минимальная температура окружающей среды, ожидаемая в среднечасовом значении
$\rho(\theta_{min,operation})$	кг/м^3	Плотность воздуха для случаев расчетного нагружения, связанная с минимально допустимой температурой окружающей среды для эксплуатации ВЭУ $\theta_{min,operation}$
$\rho(\theta_{1year,min})$	кг/м^3	Плотность воздуха для случаев расчетного нагружения в холодном климате, связанная с минимальной температурой окружающей среды, ожидаемая в среднечасовом значении $\theta_{1year,min}$

В ходе анализа пригодности площадки следует учитывать воздействие фактической плотности воздуха на площадке, изменяющейся под влиянием температуры и высоты.

Плотности воздуха для расчета нагрузок и при определении кривой мощности рассчитывают с применением закона идеального газа по формуле

$$p(\theta) = \frac{p}{R_0 \cdot \theta}, \quad (A.1)$$

где p = 101325 Н/м^2 (на уровне моря);
R_0 = 287 Дж/(кг · К);
θ = $\theta_{1year,min}$ + 35 К для расчета $\rho(\theta_{1year,min})$;
θ = $\theta_{min,operation}$ + 25 К для расчета $\rho(\theta_{min,operation})$.
Можно использовать поправки на различные высоты.

Примечание — Для определения соответствующей плотности воздуха для температуры $\theta_{1year,min}$ может быть принято значение $\theta_{1year,min}$ плюс 35 К и для $\theta_{min,operation}$ может быть принято значение $\theta_{min,operation}$ плюс 25 К. Увеличение на 35 К и 25 К, соответственно, эквивалентно значениям для нормальных климатических условий в 6.4.2 и 6.4.3.2. Стандартная плотность воздуха для нормальных климатических условий составляет 1,225 кг/м^3 при 15 °С; диапазон температур окружающей среды — от минус 10 °С до плюс 40 °С, т. е. (15 ± 25) °С. Экстремальный температурный диапазон — от минус 20 °С до плюс 50 °С, и составляет (15 ± 35) °С.

Для того, чтобы использовать ВЭУ, спроектированную в соответствии со стандартными классами ВЭУ, в холодном климате, можно использовать в расчетах плотность воздуха 1,225 кг/м^3.

Приложение В
(справочное)

Расчетные нагрузки и оценка площадки для размещения ветроэнергетических установок специального класса безопасности (класса S)

В.1 Общие требования

Расчеты проводят для эксплуатационных режимов или расчетных случаев, указанных в разделе 7, при внешних условиях, характерных для класса S. Для расчетов используют параметры, указанные в приложении А.

В проектных ситуациях с выработкой электроэнергии можно использовать МНТ и ЭМТ для каждого сектора с условиями ветра, определяемыми для этого сектора или для всех секторов с использованием совокупных ветровых условий. Для других проектных ситуаций анализ выполняется для всех секторов с использованием совокупных ветровых условий. Совокупные ветровые условия должны обеспечивать соответствующие усталостные и экстремальные нагрузки или расчетные значения параметров. Необходимо учитывать потенциальные вариации значений сдвига ветра, плотности и прочих параметров, которые могут воздействовать на усталостное нагружение ВЭУ.

Должны быть учтены воздействия аэродинамического следа, сейсмические нагрузки в случаях нагрузки, как предусмотрено для других режимов, при необходимости.

При диапазоне скоростей ветра, указанном в таблице В.1, следует учитывать скорости ветра, создающие наиболее неблагоприятные нагрузки на ВЭУ. Диапазон скоростей ветра может быть представлен рядом дискретных величин с достаточным разрешением для обеспечения точности вычислений. При определении расчетных случаев нагружения сделана ссылка на режимы ветра, описанные в разделе 6.

Примечание — В целом, расчет для отклонения 2 м/с считается достаточным.

Для оценки пригодности площадки должны быть выполнены расчеты как минимум для расчетных случаев предельного нагружения РСН 1.1, РСН 1.3, РСН 6.1 и РСН 6.2. Если случаи предельного нагружения адекватны для стандартных классов, проведение дальнейших оценок не требуется. Если необходимо, следует учесть другие случаи нагрузок в проектных ситуациях 1), 6) и 7) в таблице В.1. Расчетные случаи 2), 3), 4), 5) и 8) в таблице В.1 необходимо учитывать только, когда поведение системы управления и сборка, узел, процедуры техобслуживания и ремонта зависят от площадки.

Таблица В.1 — Варианты расчетного нагружения

Проектная ситуация	РСН	Режим ветра[1)]	Прочие условия	Вид расчета	Частные коэффициенты безопасности
1) Выработка электроэнергии	1.1	$МНТ_S$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Для экстраполяции экстремальных событий	П	Н
	1.2	$МНТ_S$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Влияния аэродинамического следа	У	*
	1.3	$ЭМТ_S$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	—	П	Н
	1.4	$ЭКН_S$ $V_{hub} = V_r - 2$ м/с, V_r, V_r +2 м/с	—	П	Н
	1.5	$ЕСВ_S$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	—	П	Н
	1.6	$ЭМТ_S$ $V_{hub} = V_r \pm 2$ м/с и V_{out}	Влияния аэродинамического следа	П	Н
	1.7	$МНТ_S$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Льдообразование. Влияния аэродинамического следа	П	Н
	1.8	$МНТ_S$ $V_{hub} = V_r$	Землетрясение в сочетании с потерей связи с электрической сетью	П	Н

Продолжение таблицы В.1

Проектная ситуация	РСН	Режим ветра[1)]	Прочие условия	Вид расчета	Частные коэффициенты безопасности
2) Выработка электроэнергии в сочетании с отказом	2.1	$МНТ_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Нормальный отказ системы управления или потеря связи с электрической сетью, или отказ основного уровня функции управления (см. 7.4.3)	П	Н
	2.2	$МНТ_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Аварийный отказ системы управления или связанный с ним отказ функции защиты вторичного уровня (см. 7.4.3)	П	А
	2.3	$ЭРП_s$ $V_{hub} = V_r \pm 2$ м/с и V_{out}	Внешнее или внутреннее электрическое повреждение, в том числе потеря связи с электрической сетью	П	А
	2.4	$МНТ_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Отказ системы управления, электрическое повреждение или потеря связи с электрической сетью	У	*
	2.5	$НПВ_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Поддержание режима генерации при провале напряжения сети	П	Н
3) Включение	3.1	$НПВ_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	—	У	*
	3.2	$ЭРП_s$ $V_{hub} = V_r \pm 2$ м/с и V_{out}	—	П	Н
	3.3	$ЭИН_s$ $V_{hub} = V_r \pm 2$ м/с и V_{out}	—	П	Н
4) Нормальный останов	4.1	$НПВ_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	—	У	*
	4.2	$ЭРП_s$ $V_{hub} = V_r \pm 2$ м/с и V_{out}	—	П	Н
5) Аварийный останов	5.1	$МНТ_s$ $V_{hub} = V_r \pm 2$ м/с и V_{out}	—	П	Н
6) Парковка (останов или холостой ход)	6.1	$МЭВ_s$ 50-летний период повторяемости	—	П	Н
	6.2	$МЭВ_s$ 50-летний период повторяемости	Отсоединение от сети	П	А
	6.3	$МЭВ_s$ 1-летний период повторяемости	Рассогласование ориентации на ветер	П	Н
	6.4	$МНТ_s$ $V_{hub} < 0{,}7\ V_{ref}$	—	У	*
	6.4	$МНТ_s$ $V_{hub} < 0{,}7\ V_{ref}$	Льдообразование	П	Н
	6.6	$МНТ_s$ $V_{hub} < 0{,}7\ V_{ref}$	Диапазон экстремальных температур	П	Н
	6.7	$МНТ_s$ $V_{hub} < 0{,}7\ V_{ref}$	Землетрясение в сочетании с потерей связи с электрической сетью	П	Н
7) Парковка в сочетании с отказом	7.1	$МЭВ_s$ 1-летний период повторяемости	—	П	А

Окончание таблицы В.1

Проектная ситуация	РСН	Режим ветра[1)]	Прочие условия	Вид расчета	Частные коэффициенты безопасности
8) Транспортирование, сборка, техническое обслуживание и ремонт	8.1	$МНТ_s$ V_{maint} должна быть определена производителем	—	П	Н
	8.2	$МЭВ_s$ 1-летний период повторяемости	—	П	А

[1)] Для конструкции класса S режимы ветра (амплитуды порыва, интенсивность турбулентности и т. п.) определяются разработчиком, как указано в приложении А.

Примечание — Обозначения:

$ЭКН_s$ — экстремальный когерентный порыв с изменением направления, специфичный для площадки. При отсутствии специфических значений принимают, что он аналогичен ЭКН по 6.3.3.6;

$ЭИН_s$ — экстремальное изменение направления, специфичное для площадки. При отсутствии специфических значений можно применять формулы (21) и (22), используя представительное экстремальное среднеквадратическое отклонение окружающей турбулентности $\hat{\sigma}_c$ вместо σ_1;

$ЭРП_s$ — экстремальная величина рабочего порыва, специфичная для площадки. При отсутствии специфических значений, можно применять формулы (18) и (19), используя представительное экстремальное среднеквадратическое отклонение окружающей турбулентности $\hat{\sigma}_c$ вместо σ_1;

$МЭВ_s$ — модель экстремальной скорости ветра, специфичная для площадки. При отсутствии специфических значений можно применять формулы (13)—(17), используя специфичную для площадки экстремальную скорость ветра с периодом повторяемости 50 лет вместо V_{ref};

$ЭСВ_s$ — экстремальный сдвиг воздушного потока, специфичный для площадки. При отсутствии специфических значений можно прибегнуть к уравнениям (27) и (28) в 6.3.3.7, используя представительное экстремальное среднеквадратическое отклонение окружающей турбулентности $\hat{\sigma}_c$ вместо σ_1 и специфический для площадки коэффициент сдвига ветра вместо $\alpha = 0{,}2$;

$МНТ_s$ — модель нормальной турбулентности, специфичная для площадки, как функция скорости ветра на высоте оси ветроколеса $\hat{\sigma}_c/V_{hub}$ (см. 6.3.2.3);

$ЭМТ_s$ — экстремальная модель турбулентности, специфичная для площадки, как функция скорости ветра, измеренной на высоте оси $\hat{\sigma}_{1,ETM}/V_{hub}$ (см. 6.3.2.3 и примечание в 8.4.5) $\hat{\sigma}_c/V_{hub}$;

$НПВ_s$ — модель нормального профиля ветра, специфичная для площадки. При отсутствии специфичной для площадки модели нормального профиля ветра, можно использовать формулу (9) из 6.3.2.2 со специфичным для площадки коэффициентом сдвига ветра на высоте оси ветроколеса вместо $\alpha = 0{,}2$;

$V_r \pm 2$ м/с — должна быть проанализирована чувствительность ко всем скоростям ветра в диапазоне;

У — расчет на усталостную прочность (см. 7.6.3);

П — расчет по предельным нагрузкам (см. 7.6.2);

Н — нормальный;

А — аварийный;

Частный коэффициент безопасности по усталости (см. 7.6.3) обозначен*.

В.2 Проектная ситуация «Выработке электроэнергии» (РСН 1.1—1.9)

При данной проектной ситуации ветроколесо/ротор вращается, ВЭУ работает и подключена к электрической нагрузке. В предполагаемой расчетной схеме ВЭУ следует учесть дисбаланс ветроколеса/ротора. Максимальный дисбаланс массы ветроколеса/ротора и аэродинамическая неуравновешенность (например, шаг лопастей и отклонение закручивания), указанные производителем, должны быть учтены в проектных расчетах.

Дополнительно, при расчетах эксплуатационных нагрузок должны быть приняты во внимание и отражены в расчетах отклонения от оптимальных теоретических эксплуатационных случаев, например, рыскание и ошибки системы управления.

Расчетные случаи нагружения 1.1 и 1.2 образуются в результате турбулентности, относятся к специфическим особенностям атмосферы площадки размещения и сопровождают процесс нормальной эксплуатации ВЭУ в течение срока ее службы. Для РСН 1.2, влияния аэродинамического следа учитываются дополнительно — в качестве руководства см. приложение *Е*. РСН 1.3 включает требования для предельных нагрузок, которые обусловлены экстремальными параметрами турбулентности, специфическими для площадки. РСН 1.4 и 1.5 относятся к переходным процессам, которые были отобраны как потенциально опасные случаи, возникающие в процессе эксплуатации ВЭУ.

Статистический расчет данных моделирования РСН 1.1 должен включать, как минимум, расчет экстремальных значений момента внутри плоскости и момента снаружи комеля лопасти и прогиба на конце. Если экстремальные расчетные значения вышеуказанных моментов в комеле лопасти меньше экстремальных расчетных значений, полученных для РСН 1.3, дальнейший анализ РСН 1.1 можно пропустить.

Если экстремальные расчетные значения вышеуказанных моментов в комеле лопасти не меньше экстремальных расчетных значений, полученных для РСН 1.3, то параметр c в уравнении (20) для экстремальной модели турбулентности, используемой в РСН 1.3 может быть увеличен, пока экстремальные расчетные значения, вычисленные в моментах комеля лопасти в РСН 1.3 не станут равны или не превысят экстремальные расчетные значения этих параметров. Нормативные значения нагрузок, соответствующих другим компонентам ВЭУ могут быть определены из этого анализа на основании РСН 1.3 с увеличенным значением экстремальной турбулентности. В качестве альтернативы этому анализу, надлежащие нормативные значения всех составляющих нагрузки, соответствующих каждому конкретному компоненту ВЭУ, могут быть напрямую определены или экстраполированы из моделирования.

В случае РСН 1.6 должна быть выполнена оценка нагрузок в результате специфичной для площадки окружающей модели ЭМТ в комбинации с режимом аэродинамического следа внутри ветроколеса. Внутри ВЭУ на расстоянии S должны быть учтены режимы нагружения между минимальным интервалом S_{min} (определяемым производителем) и $S = 20D$, где D — диаметр ветроколеса.

Руководство по использованию моделей аэродинамического следа для РСН 1.6 приведено в приложении E. Если используется добавленная модель турбулентности аэродинамического следа, должна применяться максимальная интенсивность турбулентности осевого аэродинамического следа. При использовании динамической модели изгибающегося аэродинамического следа необходимо учитывать как минимум пять средних углов наклона волны:

$$\theta_{wake} = 0°; \pm\theta_{hub\text{-}tip}; \pm 1{,}5\theta_{hub\text{-}tip}, \text{ где } \theta_{hub\text{-}tip} = \sin^{-1}\left(\frac{D}{2S}\right). \quad \text{(В.1)}$$

Количество переходных событий для РСН 2.4, РСН 3.1 и РСН 4.2 может зависеть от площадки и его необходимо учитывать в анализе специфичных для площадки нагружений. При отсутствии информации, может быть использовано количество событий, предлагаемое в 7.4.3, 7.4.4 и 7.4.5.

Приложение С
(справочное)

Применение моделей турбулентности

В настоящем приложении приведены две модели турбулентности для определения расчетной нагрузки: модель однородного сдвига Манна и спектральная и экспоненциальная когерентная модель Каймала. Предполагается, что турбулентные пульсации скорости ветра являются стационарным полем случайных векторов, составляющие которого имеют гауссово (статистическое) распределение с нулевым математическим ожиданием. Параметры моделей были выбраны с учетом удовлетворения основным требованиям к турбулентности, приведенным в 6.3. Рекомендуется применять первую из указанных моделей. В настоящем приложении приведены две модели турбулентности для определения расчетной нагрузки: модель однородного сдвига Манна и спектральная и экспоненциальная когерентная модель Каймала.

Предполагается, что турбулентные пульсации скорости ветра являются стационарным полем случайных векторов, составляющие которого имеют гауссово (статистическое) распределение с нулевым математическим ожиданием.

Параметры моделей выбирают с учетом удовлетворения основных требований к турбулентности, приведенным в 6.3.

С.1 Модель однородного сдвига Манна

Описание этой модели несколько отличается от предыдущих моделей тем, что здесь определен трехмерный спектральный тензор скорости ветра (см., например, *[29]*). Модель предполагает, что изотропный энергетический спектр Кармана быстро искажается однородным сдвигом средней скорости (см., например, *[30]*). Спектральные компоненты тензора представляются выражениями:

$$\Phi_{11}(k_1,k_2,k_3)=\frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4}\left(k_0^2-k_1^2-2k_1(k_3+\beta(k)k_1)\zeta_1+(k_1^2+k_2^2)\zeta_1^2\right); \quad (C.1)$$

$$\Phi_{22}(k_1,k_2,k_3)=\frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4}\left(k_0^2-k_2^2-2k_2(k_3+\beta(k)k_1)\zeta_2+(k_1^2+k_2^2)\zeta_2^2\right); \quad (C.2)$$

$$\Phi_{33}(k_1,k_2,k_3)=\frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4}\left(k_1^2+k_2^2\right); \quad (C.3)$$

$$\Phi_{12}(k_1,k_2,k_3)=\frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4}\left(-k_1k_2-k_1(k_3+\beta(k)k_1)\zeta_2-k_2(k_3+\beta(k)k_1)\zeta_1+(k_1^2+k_2^2)\zeta_1\zeta_2\right); \quad (C.4)$$

$$\Phi_{13}(k_1,k_2,k_3)=\frac{E(k_0)}{4\pi k_0^2k^2}\left(-k_1(k_3+\beta(k)k_1)+(k_1^2+k_2^2)\zeta_1\right); \quad (C.5)$$

и

$$\Phi_{ij}(k_1,k_2,k_3)=\Phi_{ij}^*(k_1,k_2,k_3)=\frac{1}{8\pi^3}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}R_{ij}\left(\delta_1,\delta_2,\delta_3\right)e^{-ik_1\delta_1}e^{-ik_2\delta_2}e^{-ik_3\delta_3}d\delta_1d\delta_2d\delta_3; \quad (C.6)$$

где $R_{ij}(\delta_1,\delta_2,\delta_3)$ — безразмерный тензор корреляции,

$$R_{ij}(\delta_1,\delta_2,\delta_3)=\frac{1}{\delta_{iso}^2}E\left\langle u_i(x_1,x_2,x_3)u_j(x_1+\ell\delta_1,x_2+\ell\delta_2,x_3+\ell\delta_3)\right\rangle;$$

k_1, k_2, k_3 — безразмерные пространственные волновые числа для трех направлений;

$E(k)$ — безразмерный изотропный спектр энергии Кармана;

k_0 — величина k до искажения сдвигом;

$\beta(k)$ — безразмерное время искажения, обратно пропорциональное $\sqrt{k^2\int_k^\infty E(p)dp}$;

k — величина модуля вектора волнового числа;

δ_1, δ_2, δ_3 — безразмерные пространственные составляющие вектора;

σ_{iso}^2 — изотропная дисперсия;

u_1, u_2, u_3 — продольная, боковая и нормальная составляющие скорости ветра, соответственно;

ℓ — параметр масштаба при отсутствии сдвига.

Параметры формул (С.1)—(С.6) определяют по формулам:

$$k = \sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_2^3}; \tag{C.7}$$

$$k_0 = \sqrt{k^2 + 2\beta(k)k_1k_3 + (\beta(k)k_1)^2}; \tag{C.8}$$

$$\zeta_1 = C_1 - \frac{k_2}{k_1}C_2,\ \zeta_2 = \frac{k_2}{k_1}C_1 + C_2; \tag{C.9}$$

$$C_1 = \frac{\beta(k)k_1^2\left(k_1^2 + k_2^2 - k_3(k_3 + \beta(k)k_1)\right)}{k^2(k_1^2 + k_2^2)}; \tag{C.10}$$

$$C_2 = \frac{k_2k_0^2}{(k_1^2 + k_2^2)^{3/2}}\operatorname{arctg}\left(\frac{\beta(k)k_1\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}{k_0^2 - (k_3 + \beta(k)k_1)k_1\beta(k)}\right); \tag{C.11}$$

$$E(k) = \frac{1{,}453k^4}{(1 + k^2)^{17/8}}; \tag{C.12}$$

$$\beta(k) = \frac{\gamma}{k^{\frac{2}{3}}\sqrt{{}_2F_1\left(\frac{1}{3}, \frac{17}{6}, \frac{4}{3}, -k^{-2}\right)}}, \tag{C.13}$$

где ${}_2F_1$ — гипергеометрическая функция;

γ — безразмерный параметр искажения при сдвиге.

Данная модель является более сложной, чем изотропная модель Кармана, однако она содержит только один дополнительный параметр искажения при сдвиге γ. При γ, равном нулю, эта модель превращается в изотропную модель. При увеличении γ продольная и боковая дисперсии скорости возрастают, нормальная компонента дисперсии скорости уменьшается. Результирующая турбулентная вихревая структура растягивается в продольном направлении и отклоняется от плоскости 1-2.

Предполагая, что поле случайных скоростей переносится через ветроколесо при скорости ветра, определенной на оси ветроколеса, спектр компоненты скорости, наблюдаемый в точке, может быть получен интегрированием компонент спектрального тензора. В частности, одномерный спектр описывается формулой

$$\frac{fS_i(f)}{\sigma_i^2} = \frac{\sigma_{\text{iso}}^2}{\sigma_i^2}\left(\frac{4\pi\ell f}{V_{\text{hub}}}\right)\Psi_{ij}\left(\frac{2\pi\ell f}{V_{\text{hub}}}\right), \tag{C.14}$$

где $\Psi_{ij}(k_1)$ — одномерный автоспектр волнового числа для $i = j$ или взаимной спектральности для $i \neq j$;

σ_i^2 — составляющие дисперсии.

$\Psi_{ij}(k_1)$ и σ_i^2 определяют по формулам:

$$\Psi_{ij}(k_1) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\Phi_{ij}(k_1, k_2, k_3)dk_2dk_3; \tag{C.15}$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{\text{iso}}^2\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\Phi_{ij}(k_1, k_2, k_3)dk_2dk_3dk_3. \tag{C.16}$$

Для пространственных разделений, нормальных к продольному направлению, функцию когерентности определяют по формуле

$$\text{Coh}_{ij}(f, \ell\delta_2, \ell\delta_3) = \frac{\left|\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\Phi_{ij}\left(\frac{2\pi\ell f}{V_{\text{hub}}}, k_2, k_3\right)e^{-ik_2\delta_2}e^{-ik_3\delta_3}dk_2dk_3\right|}{\sqrt{\Psi_{ii}\left(\frac{2\pi\ell f}{V_{\text{hub}}}\right)\Psi_{jj}\left(\frac{2\pi\ell f}{V_{\text{hub}}}\right)}}. \tag{C.17}$$

Результирующие интегралы не выражаются в аналитическом виде и должны определяться численными методами для конкретных значений параметра γ. Такое интегрирование и сравнение результатов со спектральной моделью Каймала описано, например, в [*31*]. По наименьшим квадратам, удовлетворяющим модели Каймала, результирующие соотношения для дисперсии имеют вид

$$\left.\begin{aligned}\sigma_1^2 &= 3{,}25\ \sigma_{iso}^2\\ \sigma_2^2 &= 1{,}65\ \sigma_{iso}^2\\ \sigma_3^2 &= 0{,}85\ \sigma_{iso}^2\end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{cases}\dfrac{\sigma_2}{\sigma_1} \approx 0{,}7\\ \dfrac{\sigma_3}{\sigma_1} \approx 0{,}5\end{cases} \qquad (C.18)$$

и параметр сдвига $\gamma = 3{,}9$.

Следует отметить, что результирующая боковая дисперсия немного меньше, чем для модели Каймала в С.2.

Масштаб может быть найден по асимптотике для инерционной подобласти продольного спектра:

$$S_1(f) \to 0{,}475\ \sigma_{iso}^2 \left(\frac{2\pi\ell}{V_{hub}}\right)^{-2/3} f^{-5/3} = 0{,}05\ \sigma_1^2 \left(\frac{\Lambda_1}{V_{hub}}\right)^{-2/3} f^{-5/3} \Rightarrow \ell \approx 0{,}8\Lambda_1. \qquad (C.19)$$

Таким образом, три параметра, необходимые для использования модели Манна, составляют:

$$\gamma = 3{,}9;$$
$$\sigma_{iso} = 0{,}55\ \sigma_1;$$
$$l = 0{,}8\ \Lambda_1,$$

где σ_1 и Λ_1 определены в 6.3.

Для трехмерных моделей турбулентности составляющие скорости определяются разложением спектрального тензора и аппроксимацией в виде преобразования Фурье. Таким образом, трехмерная пространственная область распадается на равноудаленные изолированные точки, и вектор скорости в каждой точке определяется по формуле

$$\begin{bmatrix}u_1(x,y,z)\\ u_2(x,y,z)\\ u_3(x,y,z)\end{bmatrix} = \sum_{k_1,k_2,k_3} e^{i\frac{xk_1+yk_2+zk_3}{\ell}} \begin{bmatrix}C(k_1,k_2,k_3)\end{bmatrix} \begin{bmatrix}n_1(k_1,k_2,k_3)\\ n_2(k_1,k_2,k_3)\\ n_3(k_1,k_2,k_3)\end{bmatrix}, \qquad (C.20)$$

$$\begin{bmatrix}C(k_1,k_2,k_3)\end{bmatrix} \approx \sigma_{iso}\sqrt{\frac{2\pi^2\ell^3 E(k_0)}{N_1N_2N_3\ \Delta^3 k_0^4}} \begin{bmatrix} k_2\zeta_1 & k_3 - k_1\zeta_1 + \beta k_1 & -k_2\\ k_2\zeta_2 - k_3 - \beta k_1 & -k_1\zeta_2 & k_1\\ \dfrac{k_0^2 k_2}{k^2} & -\dfrac{k_0^2 k_1}{k^2} & 0\end{bmatrix}, \qquad (C.21)$$

где u_1, u_2, u_3 — компоненты комплексного вектора, действительные и мнимые части которых представляют независимые реализации поля турбулентных скоростей;

n_1, n_2, n_3 — комплексные случайные гауссовы величины, которые являются независимыми для каждого отдельного волнового числа и имеют действительную и мнимую части с дисперсией модуля;

x, y, z — координаты точек в пространственной системе координат;

N_1, N_2, N_3 — число точек в пространственной системе координат в трех направлениях;

Δ — пространственное разрешение.

Суммирование по всем безразмерным волновым числам $\sum_{k_1,k_2,k_3}$ в формуле (*C.20*) может быть выполнено методом Фурье.

В тех случаях, когда пространственная область в любом направлении меньше 8ℓ, рекомендуется выполнить корректировку для разложения спектрального тензора $[C(k_1,k_2,k_3)]$. Подробно эта процедура изложена например в [*31*].

Параметры модели Манна, приведенные здесь для представления модели однородного сдвига турбулентности Манна, соответствуют внешним условиям, указанным в разделе 6, в результате чего результирующие спектры ветра эквивалентны спектрам Каймала.

Для анализа конкретной площадки параметры γ, $\alpha\epsilon^{2/3}$ и ℓ могут быть определены на основе высокочастотных измерений спектров ветра на конкретной рассматриваемой площадке $F_u(kl)$, $F_v(kl)$, $F_w(kl)$ и $F_{uw}(kl)$ в одной фиксированной точке. Затем необходимо сгенерировать поле турбулентного ветра модели Манна на основе трех параметров модели, полученных из измеренных спектров.

С.2 Спектральная и экспоненциальная когерентные модели Каймала [*32*]

Спектральные плотности мощности составляющих определяют в безразмерном виде по формуле

$$\frac{fS_k(f)}{\sigma_k^2} = \frac{4fL_k / V_{hub}}{(1+6fL_k / V_{hub})^{5/3}}, \qquad (C.22)$$

где f — частота, Гц;

k — индекс, указывающий направление составляющей вектора скорости (1 — продольная, 2 — боковая и 3 — нормальная);

S_k — одномерный спектр составляющей вектора скорости;

σ_k — среднеквадратичное отклонение составляющей вектора скорости,

$$\sigma_k^2 = \int_0^\infty S_k(f)df, \qquad (C.23)$$

L_k — интегральный масштаб k-й составляющей вектора скорости.

Спектральные параметры турбулентности даны в таблице С.1.

Примечание — Дисперсионные отношения для составляющих турбулентности в таблице С.1 и в выражении для восходящей составляющей скорости несколько отличаются от оригинальной спектральной модели Каймала. Продольный масштаб (а также боковой и нормальный) был выбран для аппроксимации оригинального спектра Каймала, чтобы удовлетворить требованиям к спектру, установленным в 6.3, для асимптотического инерциального поддиапазона и дисперсионных отношений, данных в таблице С.1.

Таблица С.1 — Спектральные параметры турбулентности для модели Каймала

Показатель	Индекс составляющей вектора скорости, k		
	1	2	3
Среднеквадратичное отклонение оставляющей вектора скорости σ_k	σ_1	$0{,}8\sigma_1$	$0{,}5\sigma_1$
Интегральный масштаб вдоль направления k-й составляющей вектора скорости L_k	$8{,}1\Lambda_1$	$2{,}7\Lambda_1$	$0{,}66\Lambda_1$
Примечание — Здесь σ_1 и Λ_1 — среднеквадратичное отклонение и продольный масштаб турбулентности соответственно, см. 6.3.			

Для вычисления структуры пространственной корреляции продольной составляющей вектора скорости можно использовать экспоненциальную когерентную модель совместно с автоспектральной моделью Каймала:

$$\mathrm{Coh}(r, f) = \exp\,[-12\,((f\,r / V_{hub})^2 + (0{,}12\,r / L_c)^2)^{0{,}5}], \qquad (C.24)$$

где $\mathrm{Coh}(r, f)$ — функция когерентности;

r — величина проекции вектора разделения между двумя точками на плоскость, перпендикулярную к направлению средней скорости ветра;

f — частота, Гц;

L_c — масштаб когерентности, $L_c = 8{,}1\Lambda_1$.

Приложение *D*
(справочное)

Учет возможного обледенения конструкций при проектировании ветроэнергетических установок

D.1 Оценка условий климата, для которого характерно обледенение конструкций

D.1.1 Общие требования

В условиях климата, для которого характерно обледенение конструкций, метеорологическое обледенение определяется как намерзание льда или снега на конструкциях, подвергающихся воздействию атмосферы. В целом, можно различать два типа атмосферного обледенения, воздействующего на ВЭУ: облачное обледенение (изморозь или наледь) и осадочное обледенение (переохлажденный дождь или морось, влажный снег, см., например, [*33*]). Облачное обледенение встречается чаще и во многих случаях частота облачного обледенения повышается с наращиванием высоты. Это связано с повышенной вероятностью нахождения конструкции в облаках и по причине пониженной температуры.

При оценке влияния обледенения для ВЭУ, необходимо оценить суровость и продолжительность ожидаемого долгосрочного обледенения ветроколеса. В *D.1* дано описание некоторых методов, которые можно использовать для такой оценки.

Рекомендуется:

- оценивать обледенение в районе кончика лопасти или на высоте оси ветроколеса [при необходимости, экстраполировать ожидаемое обледенение на репрезентативной высоте обледенения ветроколеса, как представлено в уравнении (*D.1*)];
- использовать комплексные методы индикации обледенения наряду с повышенной готовностью и надежностью;
- использовать данные многолетних наблюдений для площадки размещения ВЭУ (предпочтительно 10-летние данные или данные за более длительный период), при любой возможности, так как наблюдаемая частота обледенения может иметь высокую межгодовую вариативность.

Дополнительную информацию можно найти в [*34*]—[*38*].

D.1.2 Периоды обледенения конструкций ВЭУ

Явление обледенения применительно к ВЭУ включает следующие периоды (см. рисунок *D.1*):

- метеорологическое обледенение — период, в течение которого существуют благоприятные метеорологические условия для намерзания льда (активное льдообразование);
- обледенение ветроколеса — период, в течение которого на ветроколесо/ротор ВЭУ воздействует лед.

Примечание — Термин «обледенение ветроколеса» используется в настоящем стандарте вместо типового литературного термина «инструментальное обледенение», потому что «обледенение ветроколеса» более точно отображает данное явление в случае воздействия льда на вращающееся ветроколесо/ротор ВЭУ. В случае вращающегося ветроколеса/ротора ВЭУ высокая скорость потока и результат вибрации, как правило, инкубационный и восстановительный период короче, чем для стационарных приборов;

- инкубационный период — задержка между началом метеорологического обледенения и началом обледенения ветроколеса (зависит от поверхности, температуры конструкции и эксплуатационного режима работы ВЭУ);
- восстановительный период — задержка между окончанием метеорологического обледенения и окончанием обледенения ветроколеса (период, в течение которого лед остается, но не имеет активного образования).

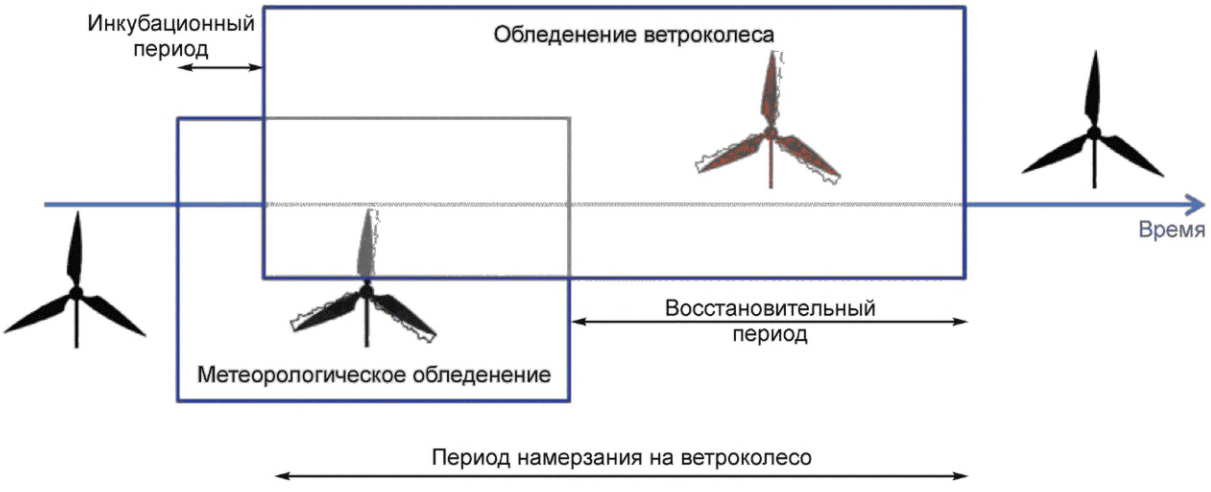


Рисунок *D.1* — Периоды обледенения ВЭУ

***D.1.3* Обледенение ветроколеса**

Обледенение ветроколеса определяется как период, в течение которого на ветроколеса ВЭУ воздействует лед. Намерзание льда на ветроколесе ВЭУ происходит непрерывно, пока не прекратятся метеоусловия для обледенения (окончание метеорологического обледенения). Лед будет оставаться на ВЭУ в течение какого-то времени — восстановительного периода — пока лед не выветрится, не испарится, не растает или не сольется с ветроколеса (период окончания обледенения ветроколеса).

В целом, частота метеоусловий облачного обледенения значительно повышается с увеличением высоты, таким образом, для репрезентативности высоты над уровнем земли для ветроколеса ВЭУ необходимо брать в расчет эти факторы. Данная репрезентативная высота, высота обледенения ветроколеса (h_{ri}), определяется при помощи следующего уравнения:

$$h_{ri} = z_{hub} + \frac{1}{3}D, \qquad (D.1)$$

где z_{hub} — высота оси ветроколеса, м;

D — диаметр ветроколеса, м.

Рисунок *D.2* иллюстрирует определение высоты обледенения ветроколеса. В отношении высот облаков ниже высоты обледенения ветроколеса можно предположить, что ветроколесо полностью находится в облаке.

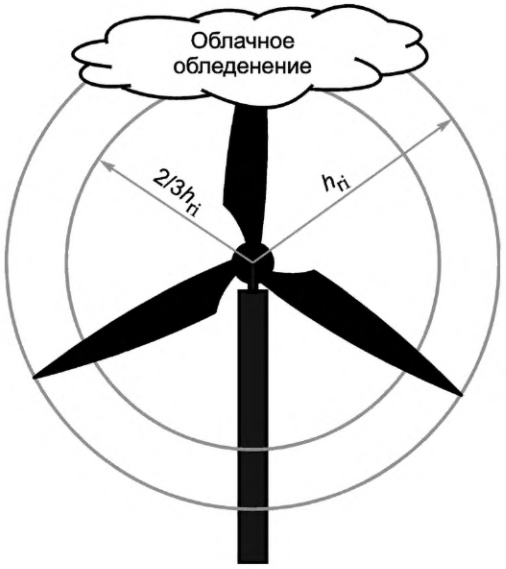


Рисунок *D.2* — Типичная зона пораженного льдом ветроколеса, определяемая высотой обледенения ветроколеса

***D.1.4* Методики измерений**

Условия климата, для которого характерно обледенение конструкций, можно оценивать следующими методиками:

- использование специальных датчиков льда, измеряющих и/или продолжительность метеорологических условий, и/или условий инструментального обледенения;
- использование пары подогреваемых/неподогреваемых ковшовых анемометров, которые можно использовать для аппроксимации продолжительности инструментального обледенения;
- синоптическая система или система камер на неподвижной, например, метеорологической мачте или вращательном элементе, как например, на лопастях;
- измерения или наблюдения за высотой нижней кромки облаков и/или видимостью и температурой;
- прочие утвержденные методы оценки метеорологического обледенения.

Измерительное оборудование и/или ВЭУ могут быть также подвержены явлению, называемому «вторичное обледенение». Вторичное обледенение образуется в результате намерзания льда, таяния и вторичного замерзания. Вторичное обледенение может влиять, например, на готовность к работе и надежность приборов.

В конечном счете, требуется оценка воздействий на ВЭУ климата, для которого характерно обледенение конструкций в части, касающейся ожидаемого долгосрочного обледенения ветроколеса. Можно использовать типовые суровые условия и продолжительность воздействий обледенения на лопасти ветроколеса, как представлено в *D.2* и *D.3*, если не имеется дополнительных данных.

D.1.5 Модификация коэффициентов профиля

В результате намерзания льда на лопастях ветроколеса ухудшаются аэродинамические характеристики профиля в сопоставлении с надежными рабочими показателями профиля. Для учета изменений в надежности работы профиля, можно использовать следующую процедуру для внесения изменений в статические характеристики аэродинамического профиля. Следует иметь в виду тот факт, что нижеуказанные пределы являются произвольными и должны выбираться и оцениваться в соответствии с конкретной полярной диаграммой. Особенно осторожно необходимо обращаться со сливанием с полярной диаграммой заднего плана.

Коэффициенты ухудшения аэродинамических характеристик профиля необходимо умножить на коэффициенты подъемной силы чистого профиля (C_L) и лобового сопротивления чистого профиля (C_D) для углов атаки от минус 2° до α, равной α_{Clmax}. Коэффициенты за этими пределами могут быть экстраполированы, например, по методу Витерны (см., например, [*34*]) или аналогичному методу. Потери подъемной силы и лобового сопротивления являются функцией аэродинамического угла атаки и выражаются следующими уравнениями:

$$C_{L,\,pen}(\alpha) = -0{,}0014\alpha^2 - 0{,}0017\alpha + 0{,}9509; \qquad (D.2)$$

$$C_{D,\,pen}(\alpha) = -0{,}0191\alpha + 3{,}115; \qquad (D.3)$$

$$C_{L,\,Iced} = C_{L,\,pen} \cdot C_{L,\,clean}; \qquad (D.4)$$

$$C_{D,\,Iced} = C_{D,\,pen} \cdot C_{D,\,clean}, \qquad (D.5)$$

где $C_{L,\,pen}$ — коэффициент ухудшения подъемной силы чистого профиля;

$C_{D,\,pen}$ — коэффициент ухудшения лобового сопротивления чистого профиля;

α — угол атаки, °.

Нет необходимости наложения модификации на коэффициент момента (C_m). Необходимо учитывать, что предел угла атаки от минус 2 ° является произвольным и должен корректироваться в соответствии с определением угла атаки. Данное значение можно было корректировать приблизительно до средней точки между α_{Clmax} и α_{Clmin}.

Рисунок *D.3* иллюстрирует штрафные коэффициенты по обледеневшим аэродинамическим профилям. В уравнениях к рисунку, *x* относится к углу атаки, α, а *y* — к штрафному коэффициенту.

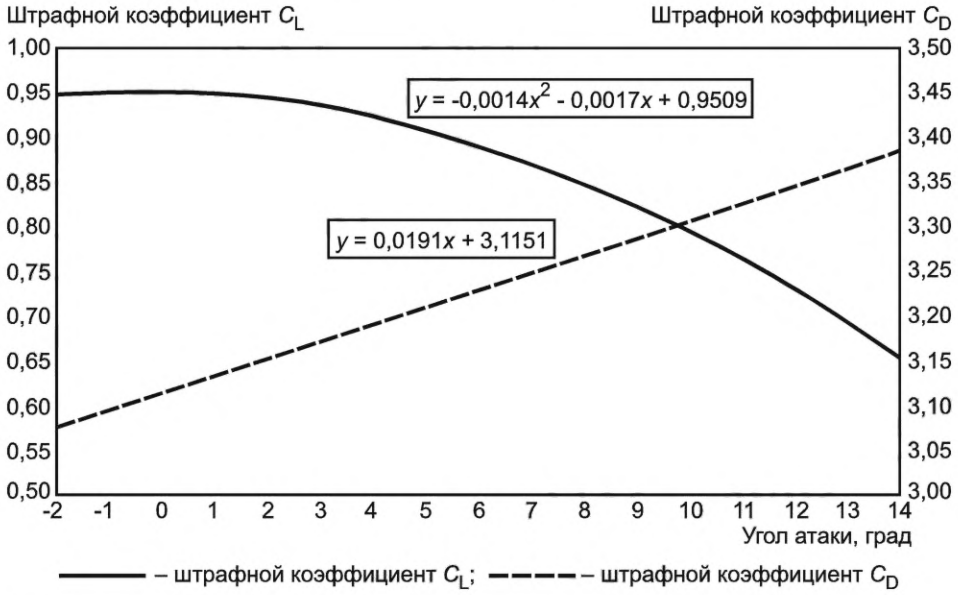


Рисунок *D.3* — Штрафные коэффициенты подъемной силы и лобового сопротивления аэродинамического профиля

D.2 Влияния массы льда на лопасти ВЭУ

Распределение массы льда (масса/единица длины) на лопасти ВЭУ оценивают вдоль передней кромки. Оно линейно увеличивается от нуля на оси ветроколеса до максимального значения на конце ветроколеса. Распределение массы льда рассчитывают по формуле

$$M(r) = A \cdot C_{85\%} \cdot r, \qquad (D.6)$$

где M — распределение массы на передней кромке лопасти ветроколеса, кг/м;
A — 0,125, кг/м^3;
$C_{85\%}$ — длина хорды на 85 % радиуса ветроколеса, м;
r — радиальное положение от оси ветроколеса, м.

D.3 Проектные ситуации и расчетные случаи нагружения в холодном климате

D.3.1 Общие требования

Продолжительность сохранения льда на ветроколесе значительно меняется с изменением географического положения и из года в год. Рекомендуется оценивать влияния климата в месте размещения на обледенение ВЭУ посредством измерений на площадке, см. *D.1*. Если не имеется иной информации, продолжительность годового ожидаемого долгосрочного обледенения ветроколеса считаю равной 750 ч.

В таблице *D.1* перечислены дополнительные расчетные случаи нагружения в соответствии с условиями холодного климата, см. *D.1*.

Таблица *D.1* — Варианты расчетного нагружения для холодного климата

Проектная ситуация	РСН	Режим ветра	Прочие условия	Вид расчета	Частные коэффициенты безопасности
1) Выработка электроэнергии	1.6	МНТ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Льдообразование	У/П	Н
6) Парковка (останов или холостой ход)	6.5	МНТ $V_{hub} < 0{,}7\ V_{ref}$	Льдообразование	У/П	Н
7) Парковка в сочетании с отказом	7.1	МЭВ1 — летний период повторяемости	Льдообразование	П	А

D.3.2 Проектная ситуация «Выработка электроэнергии» (РСН 1.1—1.6)

Если можно ожидать обледенения лопастей и его нельзя активно предотвратить, необходимо оценить безопасность работы контроллера ВЭУ и характеристики ВЭУ (см. *D.2*) из-за обледенения.

D.3.3 Проектная ситуация «Парковка (останов или холостой ход)» (РСН 6.1—6.5)

В случае РСН 6.5 холостой ход оледеневшей ВЭУ, необходимо оценить безопасность поведения регулятора ВЭУ.

D.3.4 Проектная ситуация «Парковка в сочетании с отказом» (РСН 7.1)

Если нет автономного энергопотребления для ВЭУ, допускается расхолаживание ВЭУ до $\theta_{1year,min}$ в случае отказа сети. Необходимо пронаблюдать, каким образом низкие температуры маслосборника вызывают значительные повышенные потери и разгрузку силового блока, за счет чего создаются препятствия для свободного холостого хода ветроколеса. Необходимо оценить безопасность обледеневшей ВЭУ применительно к регулятору ВЭУ.

D.4 Расчет нагрузок для холодного климата

Все специальные расчеты нагрузок в основном относятся к оценке поведения и безопасности регулятора ВЭУ. При отсутствии иной информации проводят моделирование ухудшения аэродинамических характеристик в соответствии с *D.2* и моделирование масс льда на ветроколесе в соответствии с *D.3*. При расчете предельных нагрузок оценивают образование массы льда на всех лопастях ветроколеса, за исключением одной лопасти, и ухудшение аэродинамических характеристик на всех лопастях ветроколеса. Для расчета усталости оценивают массу льда на всех лопастях ветроколеса, за исключением одной лопасти, для которой учитывается 50 % массы льда, и ухудшение аэродинамических характеристик на всех лопастях ветроколеса.

Следует использовать возросшую плотность воздуха в соответствии с 14.4. Данный подход изложен в таблице *D.2*.

Примечание — Особое внимание следует уделить исследованию различных коэффициентов боковой (перпендикулярной к основному направлению ветра) жесткости и затухания, особенно для фундаментных плит. Вариации этих свойств могут оказывать значительное влияние на эффекты небалансов массы ветроколеса.

Для расчета усталости можно использовать распределение массы льда в соответствии с формулой (*D.6*). Для расчета предельного нагружения необходимо расширить формулу (*D.6*), добавив один из двух коэффициентов.

Если можно ожидать обледенения лопастей и его нельзя заранее предотвратить, следует оценить безопасность работы контроллера ВЭУ и характеристики ВЭУ (см. *D.2*) из-за обледенения лопастей.

Таблица *D.2* — Масса льда лопасти и коэффициенты ухудшения аэродинамических характеристик для различных типов расчетов (количество лопастей ветроколеса равно *N*)

Тип расчета	Лопасть № 1	Лопасть № 2	…	Лопасть *N*–1	Лопасть *N*	Коэффициенты ухудшения аэродинамических характеристик, применяемые ко всем лопастям
Предельный	Формула (*D.6*)	Формула (*D.6*)	…	—	—	Формулы (*D.2*) и (*D.3*)
Усталостный	Формула (*D.6*)	Формула (*D.6*)	…	Формула (*D.6*)	Формула (*D.6*) – 50 %	Формулы (*D.2*) и (*D.3*)

Приложение *Е*
(справочное)

Расчет сейсмических нагрузок

Е.1 Общие положения

Оценку сейсмичности площадки и свойств грунтов выполняют в соответствии с *СП 14.13330.2018* (если это не противоречит *СП 14.13330.2018*, можно использовать [*39*]—[*45*]).

Применяют два метода расчета сейсмических нагрузок на ВЭУ: динамическое спектрально-временное моделирование и метод спектров реакций (RSM). В методе спектрально-временных моделей, ускорение грунта на поверхности оценивается из спектра отклика в технологической коренной породе, или из динамики изменений перемещения грунта, определяемой в соответствующих нормативных документах.

Особая осторожность необходима при использовании метода спектров реакций для расчетов несущих конструкций ВЭУ в силу низкой скорости затухания (см., например, [*46*]).

Пример спектрально-временного моделирования см., например, в [*47*], [*48*].

Е.2 Расчетный спектр реакций

Спектр реакций ускорения в технологической коренной породе оценивают для периода повторяемости 475 лет.

Спектр реакций ускорения может быть определен по формуле

$$S\alpha_0(T)=\begin{cases}\alpha_0\left[1+(\beta_0-1)\dfrac{T}{T_B}\right] & (0\le T<T_B)\\ \alpha_0\beta_0 & (T_B\le T<T_C)\\ \alpha_0\beta_0\left(\dfrac{T_C}{T}\right)^{K_1} & (T_C\le T<T_D)\\ \alpha_0\beta_0\left(\dfrac{T_C}{T_D}\right)^{K_1}\left(\dfrac{T_D}{T}\right)^{K_2} & (T_D\le T)\end{cases}, \qquad (E.1)$$

где α_0 — пиковое ускорение грунта в технологической коренной породе для периода повторяемости 475 лет;

β_0 — коэффициент увеличения реакций ускорения для района, где реакции ускорения становятся постоянными и могут быть взяты от двух до трех;

T — фундаментальный период собственных колебаний конструкции;

K_1 и K_2 — коэффициенты, которые могут варьироваться между 1/3 и 2.

T_B, T_C, K_1 и K_2 зависят от тектонического, геологического и почвенного состояния, T_B может браться как 1/5–1/2 от T_C, T_C может браться как 0,3—0,5 с для состояний полутвердого и твердого грунта, 0,5—0,8 с для промежуточных состояний грунта и 0,8—2 с для состояний рыхлого и мягкого грунта.

Расчетный спектр реакций можно записать следующим образом (см. [*40*]):

$$S_\alpha(T,\zeta)=\begin{cases}\alpha_0 G_s\left[1+(F_\zeta\beta_0-1)\dfrac{T}{T_B}\right] & (0\le T<T_B)\\ \alpha_0 G_s F_\zeta\beta_0 & (T_B\le T<T_C)\\ \alpha_0 G_s F_\zeta\beta_0\left(\dfrac{T_C}{T}\right)^{K_1} & (T_C\le T<T_D)\\ \alpha_0 G_s F_\zeta\beta_0\left(\dfrac{T_C}{T_D}\right)^{K_1}\left(\dfrac{T_D}{T}\right)^{K_2} & (T_D\le T)\end{cases}, \qquad (E.2)$$

где G_s — коэффициент усиления грунта;

F_ζ — коэффициент коррекции затухания структуры.

Эти параметры определены в *Е.2*.

Коэффициент усиления грунта G_s разъясняет разницу усиления сейсмической волны при прохождении грунта, где формируется структура. Типовые виды грунта и их фактор усиления определяются нормативами, указанными в соответствующих нормативных документах. Нормативные значения можно использовать для оценки сейсмических нагрузок ветроколеса.

Для анализа сейсмических реакций ветроколеса можно использовать следующий коэффициент коррекции затухания (см. [*45*]):

$$\begin{cases} F_\zeta(\zeta,T,\gamma)=\left(\dfrac{7}{2+100\zeta}\right)^{(-0{,}07T+0{,}7r+0{,}5)} & (\zeta \le 5\ \%) \\ F_\zeta(\zeta,T,\gamma)=\left(\dfrac{2}{-3+100\zeta}\right)^{\left(0{,}15\log_{10}\frac{T}{1{,}5\gamma}+0{,}3\right)} & (\zeta > 5\ \%) \end{cases}, \qquad (E.3)$$

где γ — значение для учета погрешности в сейсмической нагрузке, а также можно использовать значение между 0,5 и 0,85 с учетом местных требований.

E.3 Структурная модель

Для оценки сейсмической нагрузки на ветроколесо можно использовать упрощенную модель (рисунок *E.1*), в которой массовый и инерционный момент ветроколеса, мультипликатора и генератора в верхней части башни (узловая точка *N*), а также масса башни распределены вдоль башни. Нижнюю часть башни считают прикрепленной к земле для оценки нагрузки на башню. Для оценки нагрузки на фундамент может понадобиться более сложная модель, которая не включена в настоящее приложение.

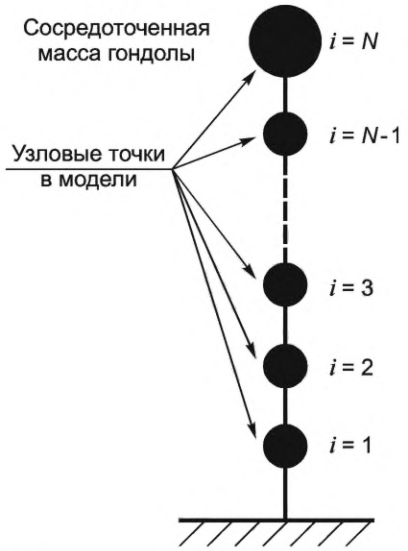


Рисунок *E.1* — Структурная модель метода спектра реакций

E.4 Оценка сейсмической нагрузки

С использованием спектра реакций, максимальное ускорение (A_{ij}), усилие (F_{ij}) и смещение (D_{ij}) соответственно режиму *j* в узловой точке *i* могут быть рассчитаны следующим образом:

$$A_{ij} = \gamma_j X_{ij} S_\alpha(T_j,\zeta_j); \qquad (E.4)$$

$$F_{ij} = \gamma_j X_{ij} S_\alpha(T_j,\zeta_j) m_1; \qquad (E.5)$$

$$D_{ij} = \gamma_j X_{ij} S_\alpha(T_j,\zeta_j)\left(\frac{T_j}{2\pi}\right)^2, \qquad (E.6)$$

где X_{ij} — форма колебаний *j*, полученная посредством анализа собственных значений;

$S_\alpha(T_j, \zeta_j)$ — амплитуда спектра реакций для периода собственных колебаний T_j и скорости затухания ζ_j режима *j* и γ_j модальный коэффициент участия для режима *j*.

$$\gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} X_{ij}}{\sum_{i=1}^{N} X_{ij}^2}, \qquad (E.7)$$

где *N* — число узловых точек в модели.

Полное ускорение $\left(A_i^{\text{total}}\right)$, смещение $\left(D_i^{\text{total}}\right)$, усилие сдвига $\left(Q_i^{\text{total}}\right)$ и момент изгиба $\left(M_i^{\text{total}}\right)$ с учетом всех соответствующих моделей в узловой точке j можно рассчитать с использованием метода полно-квадратичной комбинации, используя формулы:

$$A_i^{\text{total}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{M}\sum_{l=1}^{M}\rho_{jl}A_{ij}A_{il}}; \tag{E.8}$$

$$D_i^{\text{total}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{M}\sum_{l=1}^{M}\rho_{jl}A_{ij}A_{il}}; \tag{E.9}$$

$$Q_i^{\text{total}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{M}\sum_{l=1}^{M}\rho_{jl}\left(\sum_{k=i}^{N}F_{kj}\right)\left(\sum_{k=i}^{N}F_{kl}\right)}; \tag{E.10}$$

$$M_i^{\text{total}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{M}\sum_{l=1}^{M}\rho_{jl}\left[\sum_{k=i}^{N}F_{kj}(z_N - z_k)\right]\left[\sum_{k=i}^{N}F_{kl}(z_N - z_k)\right]}; \tag{E.11}$$

$$\rho_{jl} = \frac{8\sqrt{\zeta_j\zeta_l}(\zeta_j + X_{jl}\zeta_l)X_{jl}^{3/2}}{(1-X_{jl}^2)^2 + 4\zeta_j\zeta_l X_{jl}(1+X_{jl}^2) + 4(\zeta_j^2+\zeta_l^2)X_{jl}^2}, \tag{E.12}$$

где ζ_j и ζ_l — скорости затухания для режимов j и l, соответственно;

X — коэффициентом собственной частоты режима j по отношению к собственной частоте режима l.

E.5 Дополнительная нагрузка

Вращающий момент башни (M^{t}) можно рассчитать при помощи формулы

$$M^{\text{t}} = 1{,}1M_nA_nL_e, \tag{E.13}$$

где M_n — масса гондолы и ветроколеса;

A_n — максимальное ускорение гондолы;

L_e — расстояние между центром ветроколеса и центром тяжести гондолы и ветроколеса.

Дополнительный вращающий момент, вызванный геометрической нелинейностью, как например, эффект $p - \Delta$, может быть рассчитан, используя максимальное смещение (см., например, [*46*]).

Приложение *F*
(справочное)

Статистическая экстраполяция нагрузок для расчета предельной прочности

F.1 Основные положения

Отказ элемента конструкции возникает, когда напряжение в критическом сечении превышает несущую способность материала рассматриваемого элемента. Предполагая, что местные напряжения связаны с внешней нагрузкой таким образом, что напряжение пропорционально растет с ее увеличением, прочность элемента конструкции может быть определена через предельную нагрузку, вызывающую отказ (разрушение). Соответствие конструкции условиям прочности может быть проверено для различных случаев рабочих нагрузок на основе сравнения экстремальных величин возникающих нагрузок с предельной прочностью, используя соответствующие коэффициенты безопасности.

Для ВЭУ нагрузка зависит от турбулентности набегающего воздушного потока, которая изменяется в зависимости от параметров ветра. Таким образом, необходимо рассчитать экстремальные значения статических нагрузок для определения соответствующей расчетной номинальной нагрузки.

Для рассматриваемого состояния ветрового потока целесообразно использовать модель ответной реакции как статический случайный процесс. Учитывая это, нагрузки могут быть представлены в виде таких процессов. Методы, изложенные далее, используются для извлечения данных для экстраполяции и экстраполяции нагрузок. Также предложены критерии сходимости и приведен альтернативный метод для оценки длительно действующих нагрузок на основе обратного метода надежности первого порядка (IFORM).

Данные методы были проверены для трёх лопастных ВЭУ с горизонтальной осью вращения, расположенных по набегающему воздушному потоку перед башней. Для других конструкций ВЭУ и/или схем управления, включая обратную связь по нагрузкам, следует учитывать возможную специфику расчетов. Более полную информацию см., например, в [*49*]—[*56*].

F.2 Извлечение данных для выполнения экстраполяции

Данные, используемые при экстраполяции, извлекаются из временных рядов моделирования, соответствующих рабочему состоянию ВЭУ в установленном диапазоне параметров набегающего воздушного потока.

Данные могут быть извлечены на основе выбора отдельных глобальных экстремальных реакций из каждого моделирования или некоторого подмножества, созданного разделением данных моделирования в блоки, имеющие одинаковые временные интервалы, или обеспечением минимального временного разделения между экстремальными значениями.

Установление независимости между отдельными экстремальными реакциями является важным для некоторых методов экстраполяции. При извлечении данных проектировщик должен учесть эффект взаимонезависимости между пиками на экстраполяцию и минимизировать зависимость, когда это возможно. Если выбранный для экстраполяции метод чувствителен в отношении допущения о независимости (например, метод привлекает функции вероятности преобразования между базами времени), то проектировщик должен попытаться выполнить статистическую проверку на независимость.

Простой подход, гарантирующий независимость, состоит в предположении, что глобальный экстремум в каждом 10-минутном моделировании или локальные экстремумы, находящиеся в интервалах не короче, чем три цикла реакций, являются независимыми. Таким образом, они требуют разделения минимальными интервалами времени между отдельными экстремальными реакциями в циклах, содержащих по три реакции (определенных тремя средними пересечениями в блоке). Если желательно применение систематического статистического подхода, то проектировщик может осуществить проверку на независимость, используя стандартные методы оценки (см., например, [*53*] и [*54*]) и затем минимизировать зависимость контролируемым методом.

Методы пороговых пиков могут также использоваться, но проектировщик должен проявить внимательность, чтобы ошибки усечения и корреляции, введенные порогом, не повлияли существенным образом на форму эмпирического распределения.

F.3 Методы экстраполяции нагрузки

F.3.1 Основные положения

Нагрузка на ВЭУ, вызванная воздействием ветрового потока, с периодом повторяемости один раз в 50 лет может определяться как экстремальное нагружение, которое имеет одногодичную вероятность превышения 1/50 лет = 0,02 в год.

Рекомендуемые методы определения нагрузки, вызванной воздействием ветрового потока, возникающим один раз в 50 лет, на основе экстраполяции экстремальных случаев нагружения ВЭУ могут быть представлены в виде следующих процедур:

а) Параметрическая подгонка с последующим объединением. Деление рабочего диапазона ветроустановки на дискретные скорости ветра и выполнение во временной области моделирования при нормальном уровне турбулентности (НМТ). Расчет экстремального значения (параметрического) распределения (см. [*50*]) для каждой взятой

скорости ветра. Объединение всех распределений в функцию распределения средней скорости ветра на большом интервале времени. Прогнозирование величины скорости ветра, возникающей один раз в 50 лет, на основе объединенной функции распределения. Для глобального экстремума из 10-минутных моделирований вероятность 50-летней нагрузки составляет 3,8·10.

b) Объединение данных с последующей подгонкой. Деление рабочего диапазона ВЭУ на дискретные скорости ветра и выполнение во временной области моделирования при НМТ. Объединение всех соответствующих экстремальных значений из всех временных областей моделирования в функцию распределения средней скорости ветра на большом интервале времени для рабочего диапазона ветроустановки. Определение всех экстремумов для одной (объединенной) функции распределения. Прогнозирование величины скорости ветра, возникающей один раз в 50 лет, на основе полученной функции распределения. Для выбранного периода наблюдения T, чтобы получить эмпирическую функцию распределения для этого же большого периода времени, рассматриваются два различных способа объединения экстремумов смоделированных распределений на малых временных интервалах: экстраполяция на основе глобальных и локальных экстремумов.

***F.3.2* Глобальные экстремумы**

Глобальные экстремумы распределения для малых временных интервалов для выбранного периода наблюдения T, имеют вид

$$F_{\text{short-term}}(s \mid V;T), \tag{F.1}$$

где s — реакция, возникающая в результате воздействия нагрузки;

V — средняя скорость ветра для периода наблюдения.

Из этого, на основе применения распределения для средних скоростей ветра на большом интервале времени, получаем функцию распределения экстремальных значений на большом интервале времени:

$$F_{\text{long-term}}(s;T) = e^{\int_{V_{\text{in}}}^{V_{\text{out}}} \ln(F_{\text{long-term}}(s \mid V;T))f(V)dV}. \tag{F.2}$$

Величина экстремальной реакции s для желаемого периода повторения T может быть получена из следующего равенства

$$F_{\text{long-term}}(s;T) = \left(1 - \frac{1yr}{T_r}\right)^{\frac{T}{1yr}} \approx 1 - \frac{T}{T_r} \tag{F.3}$$

для достаточно малых значений $\frac{T}{T_r}$.

Практическое применение этих формул может быть типичным для дискретных значений скорости ветра. Следовательно,

$$F_{\text{long-term}}(s;T) \approx \prod_{k=1}^{M} (F_{\text{short-term}}(s \mid V_k;T))^{p_k},$$

$$p_k = f(V_k)\Delta V_k,\ V_{\text{in}} \le V_1 < \ldots < V_{\text{M}} \le V_{\text{out}}. \tag{F.4}$$

И для малых кратковременных превышений:

$$F_{\text{long-term}}(s;T) \approx 1 - \sum_{k=1}^{M} (1 - F_{\text{short-term}}(s \mid V_k;T))p_k = \sum_{k=1}^{M} F_{\text{short-term}}(s \mid V_k;T)p_k. \tag{F.5}$$

Полагается, что последнее тождество равняется нулю из-за вероятности превышения рабочего диапазона.

Распределение $F_{\text{short-term}}$ получено подгонкой к эмпирическому распределению

$$\hat{F}_{\text{short-term}}\left(s_{ki}\hat{F}_{\text{short-term}}(s_{ki} \mid V_k)\right) = \frac{r_i}{n_k + 1},\ i = 1,\ldots,n_k, \tag{F.6}$$

где s_{ki} — i-е экстремальное значение выборки из k-й от скорости ветра;

r_i и s_{ki} — ранг n_k экстремумов, получаемый из скорости ветра k.

Эквивалентное уравнение для описания эмпирического распределения на основе суммирования имеет вид:

$$\hat{F}_{\text{short-term}}(s_{ki} \mid V_k) = \sum_{j=1}^{n_k} \frac{1}{n_k + 1} I(s_{kj} - s_{ki}),\ i = 1,\ldots,n_k, \tag{F.7}$$

где индикаторная функция $I(x)$ имеет вид:

$$I(x)=\begin{cases}1 \text{ для } x \le 0\\ 0 \text{ для } x > 0\end{cases}. \qquad (F.8)$$

Назначение индикаторной функции состоит в том, чтобы исключить все значения, меньшие или равные s_{ki}, поскольку они могут повлиять на эмпирическое распределение, имея величину менее или равную s_{ki}. Следует отметить, что такое определение индикаторной функции обеспечивает реализацию события, идентичного экстремальному значению в соответствии с принятым методом.

***F.3.3* Локальные экстремумы**

Теперь краткосрочное распределение глобальных экстремальных значений в период наблюдения, T, получается из $n(V)$ независимых локальных экстремальных значений в указанный период (допускаем, что экстремальные значения положительные, в противном случае, можно поменять):

$$F_{\text{short-term}}(s \mid V;T)=F_{\text{lokal}}(s \mid V;T)^{n(V)}. \qquad (F.9)$$

Функцию распределения на большом интервале времени определяют в соответствии с (*F.9*), а величина экстремальной реакции s_r на рассматриваемом периоде повторения скорости ветра T, устанавливается в соответствии с *F.3.2*.

Должно быть выполнено обязательное условие, что n является случайным числом, для которого распределение зависит от V.

Однако n, в случае его применения для ВЭУ, имеет ограниченное число вариаций по сравнению с его средним значением. Следовательно, замена n его средним значением, нормализованным по V, как это сделано выше, является достаточно точным. Данное допущение может быть принято, если в приведенных ниже формулах используется s-величина, представляющая скорости ветра, которые вносят наибольший вклад в величину рассматриваемой удельной реакции. Основываясь на данных допущениях, получаем следующие выражения:

$$F_{\text{long-term}}(s;T)=e^{\int_{V_{\text{in}}}^{V_{\text{out}}} n(V)\ln(F_{\text{lokal}}(s \mid V;T))f(V)dV}, \qquad (F.10)$$

$$F_{\text{long-term}}(s_r;T)=1-\frac{1}{N}, \quad N=\frac{T_r}{T}.$$

F.3.4 Эмпирические распределения на больших интервалах времени

Существуют некоторые преимущества при объединении данных, полученных из всех скоростей ветра, и последующего подбора функции распределения для скомбинированных данных. Одним из методов, предназначенных для этого, является вычисление для каждой выборки скорости ветра ряда моделирований на основе функции распределения Вейбулла (или иной подходящей функции):

$$N_{\text{sims}}(V_k) \approx N_{\text{total}}p_k, \quad p_k=f(V_k)\Delta V_k, \; V_{\text{in}} \le V_1 < \ldots < V_{\text{M}} \le V_{\text{out}}. \qquad (F.11)$$

После моделирования и извлечения максимумов все максимальные значения, полученные из всех скоростей ветра, объединяются в отдельное распределение и ранжируются в соответствии с:

$$\hat{F}_{\text{long-term}}(s_i)=\frac{r_i}{n_i+1}, \; i=1,\ldots,n_{\text{total}} \qquad (F.12)$$

там, где s_i — экстремальная величина i-й по всем скоростям ветра;

r_i — s_i-й ранг среди n_{total} всех экстремумов, полученных из скомбинированного распределения.

Одним из потенциальных недостатков данного метода является то, что доминирующие нагрузки, обусловленные высокими скоростями ветра, могут иметь очень небольшое число моделирований, из которых необходимо извлечь большие экстремальные значения в хвостовой части эмпирического распределения. Обращаясь к этому вопросу, дополнительное распределение на большом временном интервале может быть вычислено с помощью дополнительных моделирований для выборок скоростей ветра, имеющих низкую вероятность. Полное время моделирования для каждой выборки должно следовать естественному распределению скорости ветра. Но некоторое количество новых эмпирических распределений для больших интервалов времени может быть сформировано с помощью загруженных случайным образом данных из всех выборок, в которых имеется большое количество моделирований. После того, как будет сформировано некоторое количество распределений для больших интервалов времени, они могут быть усреднены с целью получения единственной объединенной функции распределения, которая может быть экстраполирована для получения более низкого уровня вероятности.

F.4 Критерии сходимости

F.4.1 Основные положения

В ситуации, когда ВЭУ испытывает воздействие экстремальных нагрузок, важность различных скоростей ветра изменяется в зависимости от нагрузки, которая была получена экстраполяцией. Некоторые нагрузки, обусловленные скоростями ветра, близкими к номинальной скорости ветра, преобладают, другие — преобладают в зоне отключения или для иных скоростей ветра.

Важным условием обеспечения стабильности данного метода является тщательное исследование проектировщиком преобладающих скоростей ветра с целью обеспечения выполнения достаточного количества моделирований.

Для каждой скорости ветра в интервале от (V_r – 2 м/с) до скорости отключения необходимо иметь не менее пятнадцати моделирований, а для каждой скорости ветра ниже (V_r – 2 м/с) необходимо получить шесть моделирований.

В качестве дополнения к требуемому минимальному числу моделирований для скоростей ветра в интервале от (V_r – 2 м/с) до скорости отключения должен быть также применен критерий сходимости в соответствии с 7.6.2. Рекомендуемое число моделирований определяется вычислением доверительного интервала для суммарной функции эмпирического распределения. Число моделирований считается достаточным, если для каждого доверительного интервала с шириной 90 % на 84 %-ном фрактиле эмпирического распределения нагрузки глобального максимума менее, чем 15 % оценки 84 %-ного фрактиля. Этот интервал может быть оценен с помощью методов загрузки [*51*]), методом биномиальной оценки [*52*], или он может быть внутренне оценен как часть используемого метода экстраполяции.

Если экстремальные значения были получены иным методом (например, методом множественных максимумов), который, в среднем, приводит к получению m экстремумов для каждого моделирования на 10-минутном интервале времени, тогда 84 %-ный фрактиль необходимо заменить на p^*, где:

$$p^* = (0{,}84)^{1/m}. \qquad (F.13)$$

Критерий сходимости должен быть применен индивидуально к каждому распределению нагрузки на коротком интервале времени, тогда как распределение на большом интервале времени должно быть получено, используя объединение данных по скоростям ветра до подгонки, или выполнением подгонки параметрического распределения к данным, полученным из каждой скорости ветра, до объединения.

Примечание — Критерий сходимости следует оценивать только там, где 84 %-ный фрактиль значительно превышает 0.

В процессе, который включает обобщение, предшествующее подгонке, эмпирические распределения для нагрузок на большом интервале времени с последующим объединением всех выборок скорости ветра могут быть установлены с использованием аналогичного критерия сходимости, который был предложен выше для распределений на коротких интервалах времени. Для проверки сходимости на хвостовом участке эмпирического распределения, величина фрактиля, при котором налагается критерий сходимости, должна быть выше величины фрактиля, соответствующего любому конкретному «колену» (часто наблюдаемому явлению) в эмпирическом распределении на большом интервале времени.

F.4.2 Оценка фрактиля нагрузки

Желаемый фрактиль нагрузки $\hat{L}_p$, соответствующий условию непревышения вероятности p, оценивается следующим образом.

Упорядочиваем все значения нагрузок по возрастанию так, что $S_1 \le S_2 \le \ldots \le S_m$, для m имеющихся значений результатов моделирования. Следует заметить, что m должно быть равно количеству моделирований, в случае применения глобального максимума.

Для любого установленного p необходимо убедиться, что можно найти такое целое число i (где $2 \le i \le m$), что

$$\frac{i-1}{m+1} \le p \le \frac{i}{m+1}. \qquad (F.14)$$

Должно быть обеспечено наличие достаточного количества экстремумов m. Для этого следует выполнить достаточное количество моделирований так, чтобы вышеприведенное неравенство имело место и число i было найдено. Затем следует выполнить оценку фрактиля нагрузки вычислением линейным интерполированием следующим образом:

$$\hat{S}_p = S_{i-1} + [p(m+1) - (i-1)](S_i - S_{i-1}), \text{ где } 2 \le i \le m. \qquad (F.15)$$

F.4.3 Доверительные границы

Доверительные границы оцениваются так, чтобы 90 %-ный доверительный интервал 84 %-ного фрактиля $\hat{S}_{0,84}$ соответствовал условию:

$$\frac{\hat{S}_{0,84;0,05} - \hat{S}_{0,84;0,95}}{\hat{S}_{0,84}} < 0{,}15. \qquad (F.16)$$

Интервал $\left\langle \hat{S}_{0,84;0,05}, \hat{S}_{0,84;0,95} \right\rangle$ представляет желаемый 90 %-ный доверительный интервал.

***F.4.4* Определение доверительных интервалов методом загрузки**

При использовании для формирования доверительных интервалов процедуры загрузки, изложенной в [*51*] и [*55*], вначале берется первичный набор данных на p глобальных максимумов (m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, …, m_p) и повторно случайным образом выполняется перевыборка с заменой для формирования нового набора (m_1^*, m_2^*, m_3^*, m_4^*, m_5^* … m_p^*) или загрузка перевыборки такого же размера, что и первоначальный образец. Следует учитывать, что загрузка перевыборки должна быть составлена из повторяющихся величин из первоначального образца, для каждой перевыборки данные выбираются случайным образом с замещением. Процедура повторяется до тех пор, пока не сформировано большое количество N_b загруженных перевыборок. Из каждого из этих наборов данных p отдельно может быть получен 84 %-ный фрактиль. Из этих N_b оценок составляется набор (l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, …, l_{Nb}) доверительные интервалы могут быть определены обычным методом упорядочением данных. Эти интервалы затем могут быть подставлены в числитель формулы (*F.16*). Оценка 84 %-ного фрактиля, полученного из первоначальных данных, представляет знаменатель формулы (*F.16*).

Для выполнения надежной оценки доверительных границ может быть достаточным выполнить не менее 25 загрузок перевыборок. Однако большее количество, близкое к 5000, приводит к более надежным оценкам.

F.4.5 Доверительные интервалы, основанные на биномиальном распределении

Определение доверительных интервалов методом биномиального распределения (см., например, [*55*]) в вычислительном отношении менее трудоемкое, чем вычисляемые методом загрузки. Эта экономия получается за счет табулирования параметров для вычисления биноминальных доверительных интервалов, что дает результат для большинства обычных случаев.

В таблице *F.1* даны значения параметров, необходимых для определения доверительных интервалов методом биномиального распределения для случая 90 %-ного доверительного интервала на 84-м процентиле нагрузки. Количество моделирований имеет порядок от 15 до 35 для каждой выборки скорости ветра.

Таблица *F.1* — Параметры, необходимые для определения доверительных интервалов методом биномиального распределения

Для 90 %-ного доверительного интервала на 84-м процентиле нагрузки				
Число моделирований	k^*	l^*	A	B
15	9	14	0,50	0,32
16	10	15	0,27	0,19
17	11	16	0,10	0,03
18	11	16	0,87	0,96
19	12	17	0,58	0,90
20	13	18	0,35	0,83
21	14	19	0,16	0,76
22	14	20	1,00	0,69
23	15	21	0,69	0,60
24	16	22	0,45	0,50
25	17	23	0,25	0,39
26	18	24	0,08	0,26
27	18	25	0,85	0,12
28	19	25	0,58	0,98
29	20	26	0,36	0,91
30	21	27	0,18	0,83
31	22	28	0,02	0,75
32	22	29	0,75	0,66
33	23	30	0,51	0,56
34	24	31	0,31	0,44
35	25	32	0,13	0,32

Параметры таблицы *F.1* используются в проектных расчетах, которые составлены с учетом обеспечения 90 %-ного доверительного интервала для 84-го процентиля 10-минутного максимума. Расчетное уравнение имеет вид:

$$(x_i - x_k) = (x_{i^*} - x_{k^*}) + B\left(x_{(l+1)^*} - x_{l^*}\right) - A\left(x_{(k+1)^*} - x_{k^*}\right), \quad (F.17)$$

где l^*, k^*, A и B имеют значения, приведенные в таблице *F.1* в зависимости от числа выполненных моделирований, а x_{l^*}, $x_{(l+1)^*}$, x_{k^*} и $x_{(k+1)^*}$ получены из упорядоченных смоделированных экстремумов. Результаты данного расчета должны быть введены в формулу (*F.16*) для проверки условия сходимости, где

$$\hat{S}_{0,84;0,05} - \hat{S}_{0,84;0,95} \approx x_l - x_k. \quad (F.18)$$

F.5 Обратный метод по первому приближению

Альтернативой традиционным методам экстраполяции длительно действующих нагрузок является использование обратного метода надежности первого порядка (Inverse first-order reliability method (IFORM)). В данном методе моделирование турбулентности и реакций нагрузок выполняют для условий НМТ. Для скоростей ветра в интервале (V_r – 2 м/с) до скорости отключения должно быть выполнено не менее 15 моделирований. Затем должны быть установлены скорости (скорость) ветра, которые вызывают самые высокие нагрузки (нагрузку).

Экстраполяция функций распределения на малых интервалах времени к уровню вероятности, согласованным с 50-летним периодом повторяемости нагрузки, дает нагрузку, возникающую один раз в 50 лет и, в дальнейшем, используется в расчетном случае РСН 1.1.

Критерий сходимости для IFORM аналогичен применяемым в других методах экстраполяции, отличием является необходимость оценки доверительных интервалов для функций распределения нагрузки, возникающей от установленных важных скоростей ветра (часто только для единственной скорости).

Теория применения обратного метода по первому приближению (IFORM), который основан на преобразовании случайных физических переменных к стандартному нормальному распределению случайных переменных [*56*], хорошо описан в примере [*57*] и может применяться для оценки распределений нагрузок ВЭУ на больших интервалах времени для условий НМТ.

Применение метода IFORM для экстремальных нагрузок ВЭУ состоит в выполнении следующих шагов:

a) выполняют 15 моделирований для выборок скорости ветра в интервале (V_r – 2 м/с) до скорости отключения;

b) выделяют выборки, дающие наиболее высокие значения максимумов;

c) улучшают результаты исследования выполнением других 15 моделирований для выборок, полученных в шаге b).

Повторно выделяют доминирующие расчетные значения скоростей (скорости) ветра v^*, которые вызывают самое большое нагружение.

Убеждаются в достаточности количества выполненных моделирований для актуальных скоростей (скорости) ветра по соблюдению условия непревышения 15 % оценки 84 %-ного фрактиля доверительным интервалом шириной 90 % на 84 %-ном фрактиле эмпирического распределения нагрузки глобальных максимумов;

d) выполняют анализ для коротких интервалов времени только для выборок (выборки), установленного в шаге c). Требуемый фрактиль распределения нагрузки для этой выборки выводится и зависит от значения уровня вероятности.

Используя функцию распределения Рэлея, вычисляют

$$U_1 = \Phi - 1\left[P_R(v^*)\right]. \quad (F.19)$$

Вероятность превышения в течение 10 мин один раз за 50 лет $p_T = 3{,}8 \cdot 10^{-7}$, что соответствует $\beta = 4{,}95$.

Решают уравнение

$$U_2 = \left[\beta_2 - U_{12}\right]1/2. \quad (F.20)$$

Вычисляют фрактиль нагрузки $P_S = \Phi(U_2)$, см. таблицу *F.2*.

Длительно действующая нагрузка является фрактилем P_S распределения скорости ветра в выборке v^* на малом интервале времени. Для достижения подходящего фрактиля может потребоваться выполнение экстраполяции.

Таблица F.2 — Вероятности кратковременного превышения нагрузки как функция скорости ветра на высоте оси ветроколеса для различных классов ВЭУ при использовании обратного метода надежности первого порядка (IFORM)

v^*, м/с	1-P_S, класс I	1-P_S, класс II	1-P_S, класс III
5	5,91E-07	4,95E-07	4,42E-07
6	4,86E-07	4,24E-07	3,94E-07
7	4,26E-07	3,90E-07	3,80E-07
8	3,94E-07	3,80E-07	3,91E-07
9	3,81E-07	3,90E-07	4,24E-07
10	3,83E-07	4,17E-07	4,84E-07
11	3,97E-07	4,64E-07	5,78E-07
12	4,24E-07	5,35E-07	7,20E-07
13	4,66E-07	6,38E-07	9,33E-07
14	5,26E-07	7,85E-07	1,26E-06
15	6,08E-07	9,97E-07	1,75E-06
16	7,20E-07	1,30E-06	2,54E-06
17	8,71E-07	1,75E-06	3,82E-06
18	1,08E-06	2,43E-06	5,93E-06
19	1,36E-06	3,46E-06	9,54E-06
20	1,75E-06	5,06E-06	1,59E-05
21	2,31E-06	7,60E-06	2,74E-05
22	3,10E-06	1,17E-05	4,89E-05
23	4,25E-06	1,86E-05	9,02E-05
24	5,93E-06	3,03E-05	1,73E-04
25	8,45E-06	5,06E-05	3,42E-04

Приложение *G*
(справочное)

Одновременно действующие нагрузки

G.1 Основные положения

Для подробного структурного анализа конструктивных элементов ВЭУ обычно используют метод конечных элементов или иную подходящую расчетную модель для определения действующих местных напряжений и деформаций, возникающих в результате внешних нагрузок, приложенных к элементам конструкции. Как правило, такой метод устанавливает подходящее внутреннее сечение, в котором действуют приложенные нагрузки, например, сечение опорного подшипника механизма поворота гондолы при определении нагружения башни в верхней части.

В данном случае граничные условия нагружения определяют шесть силовых факторов: три усилия F_x, F_y и F_z и три момента M_x, M_y и M_z.

Для удобства принято, что оси *X* и *Y* находятся в плоскости действия нагрузок, а ось *Z* перпендикулярна к данной плоскости. Для описания случаев экстремального нагружения используют матрицу нагрузок, которую, как правило, представляют в виде, приведенном в таблице *G.1*.

Таблица *G.1* — Матрица экстремального нагружения

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z	F_R	θ_F	M_R	θ_M
Макс.	■									
Мин.	■									
Макс.		■								
Мин.		■								
Макс.			■							
Мин.			■							
Макс.				■						
Мин.				■						
Макс.					■					
Мин.					■					
Макс.						■				
Мин.						■				
Макс.							■			
Макс.									■	

В данной таблице каждый столбец представляет величину фактора нагрузки, которая возрастает вверх.

Каждый ряд представляет величины одновременно действующих нагрузок (т. е. все величины, возникающие в одно и то же время), а заштрихованные клеточки показывают те компоненты нагрузки, которые имеют максимальное и минимальное значение, как показано слева.

Данные максимальные и минимальные нагрузки закрывают весь диапазон значений для конкретного силового фактора.

Далее определяют результирующее местное напряжение или деформацию с помощью выбранной структурной модели, используя каждый из рядов. После чего полученное результирующее местное напряжение или деформацию сравнивают с подходящими критериями разрушения.

Если конструкционная жесткость и прочность под воздействием нагрузок, лежащих в плоскости сечения, схожи для разнонаправленных нагрузок, наиболее тяжелый случай нагружения могут дать компоненты нагрузки, действующие вдоль осей *x* и *y* и имеющие большие, но не самые большие значения. Таким образом, величина суммарного вектора нагрузки, лежащего в плоскости сечения, представлена в добавочных столбцах в правой части и в нижних рядах таблицы.

Действующие в плоскости нагружения результирующие силовые факторы определяют по формуле

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad \text{и} \quad M_R = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}. \qquad (G.1)$$

Угловые параметры этих результирующих значений также определяют по формуле

$$\theta_F = \arctan(F_x / F_y) \quad \text{и} \quad \theta_M = \arctan(M_x / M_y). \qquad (G.2)$$

Значения составляющих нагрузки, представленные в таблице, должны быть определены на основе последующего анализа временных серий для шести компонентов нагрузки, определенных как результат реализации в полном объеме динамического моделирования ВЭУ.

В этом анализе временные серии исследуются на максимальные и минимальные значения каждого силового фактора, а также выявляются максимальные значения результирующих нагрузок.

Величины нагрузок, действующие одновременно и связанные с каждой соответствующей точкой времени, затем вносятся в соответствующие ряды таблицы.

Каждый из случаев нагружения, приведенный в разделе 7, анализируют рассмотренным образом. Затем самые значительные экстремальные нагрузки в каждом ряду для различных случаев нагружения используются при определении полного спектра нагрузки соответствующего элемента ВЭУ.

Ниже приведены два используемых подхода. Следует заметить, что необходимо обеспечить аккуратность для получения консервативных одновременно действующих нагрузок.

G.2 Масштабирование

Данный подход включает следующие шаги:

- для каждого поперечного сечения и силового фактора одна выборка рассматриваемого случая нагружения должна содержать максимальную удельную нагрузку;
- временные серии, извлеченные из данной выборки, должны иметь отклонение не более ±5 % максимума выбранной удельной нагрузки;
- максимальные значения этих временных серий приводятся к удельным значениям нагрузки. Полученный масштабный фактор затем применяется для выбранных максимумов временных серий ко всем одновременно действующим факторам нагрузки;
- для каждого силового фактора должна быть получена одна серия данных для каждого случая нагружения, чтобы выполнить расчет по условиям экстремального нагружения;
- для получения минимальных значений процедура выполняется аналогично.

G.3 Усреднение

Данный подход включает следующие шаги:

- для случаев нагружения, имеющих более одной реализации, полную положительную нагрузку рассчитывают как среднее значение максимумов каждой реализации;
- одновременно действующие нагрузки рассчитывают как средние значения полных, одновременно действующих величин каждой реализации. Знак одновременно действующих нагрузок определяют в соответствии со знаками одновременно действующих нагрузок в рассматриваемой реализации с наибольшей нагрузкой;
- предельную отрицательную нагрузку рассчитывают как среднее значение минимумов каждой реализации. Одновременно действующие отрицательные нагрузки рассчитывают аналогично положительным нагрузкам;
- в качестве предельной полной нагрузки берут максимальную из полных величин средних значений максимальных и средних значений минимальных нагрузок, описанных выше, с соответствующими одновременными величинами.

Приложение *Н*
(справочное)

Определение частных коэффициентов безопасности материалов и расчет прочности на основе результатов испытаний

Н.1 Общие положения

Настоящее приложение включает руководство выбором частных коэффициентов безопасности для материалов в *Н.2—Н.6* и статистическим анализом испытаний по параметрам и сопротивлениям материалов в *Н.7—Н.12*.

Разделы *Н.8—Н.11* основаны на *ГОСТ Р ИСО 2394* (см. также [*58*]).

Н.2 Заданный уровень надежности

Для калибровки частных коэффициентов безопасности надежность оценивают через вероятность безотказной работы $P_S = (1 - P_F)$, где P_F — это вероятность отказа для учтенного режима отказа в пределах установленного отчетного периода. Если рассчитанная вероятность отказа больше, чем установленное заданное значение P_0, конструкцию следует рассматривать как ненадежную.

Также надежность можно оценить через индекс надежности β, который связан с P_F формулой

$$P_F = \Phi(-\beta). \qquad (Н.1)$$

Расчетное значение вероятности отказа для проектирования конструкций под экстремальный режим и режим усталостного разрушения на базовый период в один год составляет:

$$P_F^t = 5 \cdot 10^{-4}. \qquad (Н.2)$$

Соответствующее расчетное значение индекса надежности β^t составляет 3,3.

Предполагается, что при использовании расчетных значений риск для человеческих жизней в случае отказа элемента конструкции ничтожный и заданный уровень надежности соответствует классу надежности элементов 2.

Н.3 Параметры безопасности

Модель сопротивления получают, используя общую модель

$$R = b\delta R(X, a), \qquad (Н.3)$$

где $R(X, a)$ — представляет собой модель сопротивления согласно определению в соответствующем стандарте на конструкции и материалы;

X — параметр(ы) прочности (и жесткости) материала. Каждый из параметров прочности моделируется как логарифмически нормально распределенная стохастическая переменная с коэффициентом вариации V_X;

a — геометрический(е) параметр(ы);

δ — погрешность модели, связанная с моделью сопротивления (может определяться с использованием метода, описанного в *Н.12*), моделируется как логарифмически нормально распределенная стохастическая переменная со средним значением 1 и коэффициентом вариации V_δ;

b — уклон в модели сопротивления, может определяться с использованием метода, описанного в *Н.12*.

На основе (*Н.3*) расчетное значение сопротивления R_d можно определить с помощью трех моделей.

а) модель 1, в которой определяют расчетные значения сопротивления, используя расчетные параметры прочности материала:

$$R_d = \frac{R(X_d, a_d)}{\gamma_\Delta}, \qquad (Н.4)$$

где a_d — расчетные значения геометрических параметров;

X_d — расчетные значения параметров прочности;

γ_Δ — частный коэффициент безопасности, относящийся к погрешности модели сопротивления, включая уклон в модели сопротивления.

Если в этой модели сопротивления используется более одного параметра прочности, то расчетные значения применяются для каждого параметра прочности, указанного в уравнении (*Н.4*).

Расчетные значения параметров прочности X_d определяют по формуле

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m}, \qquad (Н.5)$$

где η — переводной коэффициент, учитывающий воздействия длительности нагружения, воздействия влаги, температуры, масштабные эффекты;

X_k — нормативное значение параметра прочности, обычно определяемое 5 %-ным квантилем;

γ_m — нормативное значение запаса прочности, зависящего от коэффициента вариации V_X.

Если модель сопротивления линейная в параметрах прочности, то $R_d = R(X_d, a_d)$ и X_d для каждого из параметров прочности получается за счет использования частного коэффициента $\gamma_M = \gamma_m\gamma_\Delta$.

Частный коэффициент безопасности γ_Δ зависит от погрешности модели сопротивления, включая уклон:

$$\gamma_\Delta = \frac{\gamma_\delta}{b}, \qquad (H.6)$$

где γ_δ — частный коэффициент безопасности, зависящий от погрешности модели с коэффициентом вариации V_δ без учета уклона в модели сопротивления;

b) модель 2, в которой определяют нормативное сопротивление с использованием нормативных значений параметров прочности материала, после чего расчетное значение сопротивления определяют по формуле

$$R_d = \frac{R(\eta X_k, a_k)}{\gamma_M}, \qquad (H.7)$$

где γ_M — частный коэффициент безопасности для сопротивления, относящегося к погрешности сопротивления, погрешность в параметрах материалов, погрешность в модели сопротивления и уклоне.

Общая погрешность сопротивления зависит от погрешности модели δ, уклона модели сопротивления и погрешности, связанной с параметрами прочности X, несмотря на функцию сопротивления $R(X, a)$. Коэффициенты безопасности материала рассчитывают по формуле

$$\gamma_M = \frac{\gamma_\delta\gamma_{Rm}}{b}, \qquad (H.8)$$

где γ_{Rm} — частный коэффициент безопасности, зависящий от погрешности сопротивления с коэффициентом вариации V_{Rm} от параметров прочности, несмотря на функцию сопротивления $R(X, a)$;

γ — частный коэффициент безопасности, зависящий от погрешности модели с коэффициентом вариации V_δ;

c) модель 3, в которой определяют нормативное значение на основе испытаний, после чего расчетное значение сопротивления определяют по формуле

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M}, \qquad (H.9)$$

где R_k — нормативное значение, оцениваемое на основании испытаний, см. *H.12*. R_k обычно определяется 5 %-ным квантилем;

γ_M — частный коэффициент безопасности для сопротивления, связанного с погрешностью сопротивления, полученного на основе испытаний, V_R.

Частные коэффициенты безопасности материалов должны быть откалиброваны таким образом, чтобы вероятности отказов для соответствующих режимов отказа были близки к уровню надежности, заданному в формуле (*H.2*). В случае необходимости, следует включить статистическую неопределенность и неопределенность, связанную с преобразованием лабораторной структуры в реальную.

Примечание — Приведенные три модели соответствуют базовым моделям сопротивления в Еврокодах.

H.4 Калибровка по надежности

Частные коэффициенты безопасности для нагрузок и сопротивлений определяют таким образом, что вероятность отказа, получаемая с использованием функции предельного состояния

$$g = R - S \qquad (H.10)$$

меньше, чем вероятность заданного отказа P_F^t. В уравнении (*H.10*), сопротивление моделируется посредством уравнения (*H.3*) и S представляет собой воздействие нагрузки. Соответствующее расчетное уравнение:

$$R_d - \gamma_f S_k \geq 0, \qquad (H.11)$$

где R_d — расчетное значение сопротивления;

S_k — нормативное значение воздействия нагрузки, определяется обычно как 98 %-ный квантиль в функции распределения для годового максимального воздействия нагрузки, соответствующего 50-летнему периоду повторяемости. В некоторых случаях могут быть также использованы другие базовые периоды;

γ_f — частный коэффициент безопасности для нагрузки.

Если используются частные коэффициенты безопасности для предельных состояний первой группы (по несущей способности) в 7.6, то указанные частные коэффициенты безопасности калибруются для режима отказа таким образом, что уровень надежности становится равным заданному уровню P_F^t, определяемому уравнением (*H.2*). Рекомендуемые частные коэффициенты безопасности для моделей 1 и 2 – γ_m = 1,0, γ_{Rm} = 1,0 и γ_δ, как показано в таблице *H.1*.

Для модели 3 рекомендуемый частный коэффициент безопасности — γ_M = 1,2, соответствующий значению γ_δ для $V_\delta \le 5$ % в таблице *H.1*.

Таблица *H.1* — Частный коэффициент безопасности для погрешности модели, γ_δ

Коэффициент вариации погрешности модели для модели сопротивления в модели 1, V_δ	≤ 5 %	10 %	15 %	20 %
Примечание — Частные коэффициенты безопасности рассчитаны без учета отклонения *b* и с наличием нормативного значения для погрешности модели, равной 1.				

Примечания

1 Причиной выбора γ_m = 1,0 и γ_{Rm} = 1,0 является тот факт, что частный коэффициент безопасности сопротивления становится независимым от погрешности запаса прочности, потому что 5 %-ный квантиль, используемый для определения нормативных значений, охватывает влияние этой погрешности. Нормативное значение погрешности модели определяется как среднее значение и, следовательно, γ_δ зависит от V_δ. V_δ следует определять из испытаний, см. *H.12*, или используя справочную литературу.

2 Частный коэффициент безопасности для стального элемента с критериями отказа по остаточной деформации становится γ_M = 1,1, где используются коэффициенты вариации для предела текучести, равного 5 % и для модели сопротивления, равной 5 %, и с отклонением, равным 1,1 (предел текучести менее 90 % предела прочности на растяжение или сжатие).

3 Параметрические формулы, основанные на мембранной теории в [*59*] по поверхностной деформации, применяемые для башен из трубчатой стали с $D/t < 300$, включают уклон (расчетная кривая устойчивости составляет 85 % среднего значения экспериментальных значений) и погрешность модели с коэффициентом вариации 13 %, подразумевая, что γ_M при потере устойчивости становится 1,1.

H.5 Калибровка с использованием формата расчетного значения

В качестве альтернативы методу калибровки по надежности, описанному в *H.4*, для калибровки частных коэффициентов безопасности может применяться формат расчетного значения по *ГОСТ Р ИСО 2394*.

H.6 Частные коэффициенты безопасности для расчета на усталость сварных деталей в металлоконструкциях

Для оценки накопления линейной усталости используют *S*–*N*-кривые совместно с правилом Майнера.

Примечание — Усталостное разрушение стальных деталей рассматривается в *H.6*. Такие же принципы можно было бы использовать для других критических деталей с усталостным разрушением, сделанных из других материалов, как например, композитных материалов и литой стали, где может играть важную роль среднее значение усталостной нагрузки.

Для линейных *S*–*N*-кривых количество циклов *N* до отказа с диапазоном постоянных нагрузок, $\Delta\sigma$, записывается как:

$$N(\Delta\sigma) = \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_C}\right)^{-m} 2\cdot 10^6 = K\Delta\sigma^{-m}, \qquad (H.12)$$

где $\Delta\sigma_C$ — нормативная усталостная прочность, определяемая как 5 %-ный квантиль;

m — уклон *S*–*N*-кривой (показатель степени кривой Веллера);

K — параметр *S*–*N*-кривой.

Применительно к усталостным нагрузкам переменной амплитуды, расчетное значение суммарного количества Майнера должно отвечать формуле

$$\sum_i \frac{n_1}{2\cdot 10^6}\left(\frac{\gamma_n\gamma_{Ff}\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}}\right)^m \le 1, \qquad (H.13)$$

где γ_n — последствие коэффициента отказа, см. 7.6.1.3;

γ_{Ff} — частный коэффициент усталостной нагрузки, зависящий от погрешностей, связанных с усталостными напряжениями;

γ_{Mf} — частный коэффициент усталостной прочности, зависящий от погрешностей, связанных с *S–N*-кривой и правилом Майнера;

n_i — число циклов с диапазоном усталостного напряжения $\Delta\sigma_i$.

Применительно к нелинейным *S–N*-кривым, расчетное значение суммарного количества Майнера должно отвечать формуле

$$\sum_i \frac{n_i}{N(\gamma_n \gamma_{Mf} \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i)} \le 1. \qquad (H.14)$$

Частные коэффициенты безопасности γ_{Mf} и γ_{Ff} в таблицах *H.2* и *H.3* необходимо калибровать таким образом, чтобы вероятности отказов для соответствующих режимов отказа были близки к заданному уровню надежности в *H.2* для сварных деталей конструкций класса надежности элементов 2. Частный коэффициент безопасности γ_{Ff} зависит от коэффициента вариации, V_{Ff}, для усталостных напряжений.

Таблица *H.2* — Рекомендуемые значения частного коэффициента безопасности для усталостной прочности, γ_{Mf}

Метод оценки	γ_{Mf}
Устойчивости к повреждению	1,10
Безопасности для ресурса	1,25

Таблица *H.3* — Рекомендуемые значения частного коэффициента безопасности для усталостных напряжений, γ_{Ff}

Коэффициент вариации V_{Ff}, для диапазонов усталостного напряжения	15 %—20 %	20 %—25 %	25 %—30 %
γ_{Ff}	1,00	1,10	1,20

Параметр усталостной прочности, логарифм *K*, можно рассматривать как нормально распределенный, с коэффициентом, который зависит от фактической *S–N*-кривой, но, как правило, равен 0,2 для сварных деталей. Суммарное количество Майнера можно рассматривать как нормально распределенное, с коэффициентом вариации, равным 0,3. Погрешность для диапазонов усталостного напряжения может предполагаться как имеющая логарифмически нормальное распределение с коэффициентом вариации, представляющим погрешность оценки усталостной нагрузки и погрешность диапазонов напряжения, данных для усталостного нагружения. Нормально коэффициент вариации V_{Ff} может браться как 0,15—0,20.

Требуемая надежность может достигаться следующими способами:

a) метод устойчивости к повреждению:
- выбор деталей, материалов и уровней напряжений такие, что в случае трещинообразования в результате получается низкая скорость распространения и длинные трещины критического размера;
- обеспечение многовариантного пути нагружения;
- обеспечение наличия деталей, останавливающих трещинообразование;
- обеспечение наличия деталей, готовых к инспектированию во время регулярных осмотров;

b) метод планирования безопасных для ресурса условий:
- выбор деталей и уровней напряжений, приводящих в результате к усталостному ресурсу, достаточному для получения заданного значения β_t в конце расчетного ресурса. Проведение осмотров не требуется.

H.7 Типы испытаний материалов

Необходимы следующие типы испытаний:

a) испытания для прямого определения предельной прочности или свойств работоспособности конструкций или элементов конструкций для данных режимов нагружения;

b) испытания для определения специальных свойств материалов с использованием специальных процедур, например, испытания образцов материалов для лопастей;

c) испытания в целях снижения погрешностей в параметрах, используемых в моделях сопротивления, например, посредством испытаний субкомпонентов или натурные испытания.

H.8 Планирование испытаний

H.8.1 Общие требования

Перед выполнением испытаний необходимо согласовать план испытаний с испытательной организацией. Указанный план должен содержать в себе цели испытания и все технические спецификации, необходимые для выбора или изготовления испытуемых образцов, выполнение и оценку испытаний. План испытаний должен охватывать следующее:

- цель и объем испытаний;

- прогнозирование результатов испытаний;
- спецификацию испытуемых образцов и отбор проб;
- спецификации нагрузок;
- технологическую подготовку испытаний;
- измерения;
- оценку результатов и протоколирование испытаний.

Н.8.2 **Цель и объем испытаний**

Цель испытаний должна быть четко сформулирована. Должны быть указаны ограничения испытания и требуемые коэффициенты (например, воздействия масштабирования).

Н.8.3 **Прогнозирование результатов испытаний**

Все свойства и обстоятельства, которые могут повлиять на результаты испытаний, должны быть учтены, включая:

- геометрические параметры и их отклонения;
- дефекты геометрического характера;
- свойства материалов;
- параметры, на которые оказывают влияние процедуры изготовления и выполнения, а также учитываемые масштабные эффекты условий окружающей среды и, при необходимости, любые циклические изменения условий окружающей среды.

Должны быть описаны ожидаемые режимы отказа и/или расчетные модели вместе с соответствующими вариациями. Если имеются серьезные сомнения в том, какие режимы отказов могут оказаться критическими, то план испытаний следует разрабатывать на базисе сопутствующих контрольных испытаний.

Примечание — Следует учитывать, что элемент конструкции может иметь ряд принципиально различных режимов отказа.

Н.8.4 **Спецификация испытуемых образцов и отбор проб**

Испытуемые образцы и пробы должны представлять параметры и свойства реальной конструкции.

Следует учитывать следующее:

- размеры и допуски;
- материал и технология изготовления образцов;
- количество образцов;
- процедуры отбора образцов;
- ограничения процедур испытаний и условий эксплуатации.

Целью процедуры отбора образцов должно быть получение статистически представительного образца. Следует уделять внимание любому различию между испытуемыми образцами и группами образцов, которые могли бы повлиять на результаты испытаний.

Н.8.5 Спецификации нагрузок

Условия нагрузки окружающей среды, определяемые для испытаний, должны включать в себя:

- точки нагрузки;
- историю нагружения;
- ограничения;
- температуры;
- относительную влажность;
- управление нагружением или усилием и т. п.

Последовательность нагрузок следует выбирать таким образом, чтобы она наиболее полно отражала ожидаемое применение элемента конструкции как в нормальных, так суровых условиях эксплуатации. Если необходимо, также учитывают реакцию на взаимодействие конструкции и аппаратуры, используемой для применения нагрузки.

Там, где поведение конструкции зависит от влияния одного или более воздействий, которые не изменяются систематически, эти эффекты должны определяться репрезентативными значениями.

Н.8.6 **Технологическая подготовка испытаний**

Испытательное оборудование должно соответствовать типу испытаний и ожидаемым пределам измерений. Особое внимание следует уделять измерениям для достижения достаточной прочности и жесткости нагружаемых и опорных стендов, а также зазору под прогиб и т. п.

Н.8.7 **Измерения**

Перед испытаниями должны быть перечислены все соответствующие свойства/характеристики, оцениваемые у каждого испытуемого образца. Дополнительно должен быть составлен перечень:

a) мест измерения;
b) измеренных характеристик и параметров и их значений, в том числе, если необходимо,
   - временные диаграммы смещений,
   - скорости,
   - ускорения,
   - напряжения,

- нагрузки и давления,
- требуемая частота,
- точность измерений,

а также перечень испытательного оборудования.

***H.8.8* Оценка и протоколирование испытаний**

Конкретные инструкции см. в *H.9*. Должны быть указаны все стандарты, по которым/на основании которых проводят испытания.

***H.9* Общие принципы статистических оценок**

При выполнении оценки результатов испытаний необходимо сравнивать поведение испытуемых образцов и режимы отказов с теоретическими прогнозами. При возникновении значительных отклонений от прогноза, необходимо найти объяснение: для устранения значительных отклонений может быть необходимо проведение дополнительных испытаний, возможно, при различных условиях, или внесение изменений в теоретическую модель.

Оценка результатов испытаний должна базироваться на статистических методах, с использованием имеющейся (статистической) информации о типе используемого распределения и связанных с ним параметрах. Методики, приведенные в настоящем приложении, можно использовать только, когда выполнены следующие условия:

- статистические данные в достаточной степени однородны;
- имеется в наличии достаточное количество наблюдений.

На уровне интерпретации результатов испытаний, можно выделить три основные категории:

- проведение только одного испытания (или крайне малого числа испытаний), классическая статистическая интерпретация невозможна. Только использование расширенной предыдущей информации, связанной с постулатами об относительных степенях важности этой информации и о результатах испытаний, делает возможным представлять интерпретацию как статистическую (байессовские процедуры, см. *ГОСТ Р ИСО 12491*);
- проведение более крупной серии испытаний для оценки параметра, классическая статистическая интерпретация может быть возможна. Для такой интерпретации также необходимо использовать предшествующую информацию о параметре, однако ее необходимо значительно меньше, чем для предыдущей категории;
- проведение серии испытаний для калибровки модели (в качестве функции) и одного или более параметров, классическая статистическая интерпретация возможна.

Результаты испытания действительны только для спецификаций и характеристик нагрузок, при которых проводили испытания. Если результаты необходимо экстраполировать для охвата других расчетных параметров и нагрузок, необходимо использовать дополнительную информацию из предшествующих испытаний или из теоретических баз.

***H.10* Определение нормативных значений**

При определении нормативного значения должны учитываться:

a) рассеяние данных испытаний;
b) статистическая погрешность, связанная с числом испытаний;
c) предшествующие статистические сведения.

Если реакция конструкции или элемента конструкции, сопротивление материала зависит от влияний, в недостаточной степени охватываемых испытаниями, как например, временные и длительные воздействия, масштабные и размерные эффекты, различные экологические нагрузочные и граничные условия и влияния сопротивления, то в расчетной модели такие воздействия должны быть учтены.

***H.11* Статистическое определение нормативного значения для одного свойства**

В настоящем разделе приведены формулы для определения нормативных значений по (a) типам испытаний и (b) свойствам (например, прочности).

Примечания

1 Принятие логарифмического нормального распределения для некоторых переменных имеет преимущество в том, что не возникают негативные значения, как например, для геометрических и переменных сопротивлений.

2 Формулы, в которых используются байессовские процедуры с «неопределенными» априорными распределениями, приводят к почти таким же результатам, что и классическая статистика с уровнями достоверности, равными 75 %.

Таблица и формулы ниже основаны на следующих допущениях:

- все переменные вытекают из нормального или логарифмического нормального распределения;
- нет априорных сведений о среднем значении;
- для случая «V_X неизвестно», нет априорных сведений о коэффициенте вариации;
- для случая «V_X известно», есть полные сведения о коэффициенте вариации.

На практике предпочтение часто отдается использованию случая «V_X известно» вместе с консервативной высшей оценкой V_X, а не применению правил, представленных для случая «V_X неизвестно». Кроме того, должно допускаться, что для случая V_X, когда неизвестно, не меньше, чем 0,10.

Нормативное значение свойства X должно быть найдено с использованием формулы

$$X_k = m_X\left(1 - k_n V_X\right), \tag{H.15}$$

где m_X — выборочное среднее значение k_n можно найти в таблице *H.4*. При использовании таблицы *H.4* должен рассматриваться один из двух случаев:

- строка «V_X известно» должна использоваться, если коэффициент вариации V_X или его реалистичный верхний предел известны из априорных данных.

Примечание — Априорные данные могут исходить из оценки предшествующих испытаний в сопоставимых ситуациях. Что является «сопоставимым» нуждается в определении посредством обоснованного технического решения;

- строка «V_X неизвестно» должна использоваться, если коэффициент вариации V_X не известен из априорных данных и, таким образом, подлежит оценке на основании испытаний образцов

$$m_X = \frac{1}{n}\sum x_i; \tag{H.16}$$

$$s_X^2 = \frac{1}{n-1}\sum (x_i - m_X)^2; \tag{H.17}$$

$$V_X = \frac{s_X}{m_X}. \tag{H.18}$$

Таблица *H.4* — Значения k_n для 5 %-ного нормативного значения

N	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_X известно	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
V_X неизвестно	—	—	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Таблица *H.4* основана на нормальном распределении. С учетом нормального распределения, уравнение (*H.15*) приобретает вид:

$$X_k = \exp\left(m_y - k_n s_y\right), \tag{H.19}$$

$$m_y = \frac{1}{n}\sum \ln(x_i). \tag{H.20}$$

Если V_X известно из априорных данных, $s_y = \sqrt{\ln\left(V_X^2 + 1\right)} \cong V_X$. (*H.21*)

Если V_X известно из априорных данных,

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum (\ln x_i - m_y)^2}. \tag{H.22}$$

H.12 Статистическое определение нормативного значения для моделей сопротивления

H.12.1 Основные положения

Раздел *H.12* предназначен главным образом для определения процедур (методов) калибровки моделей сопротивления и получения расчетных значений по результатам испытаний типа с), см. *H.7*.

На основании теоретических расчетов и результатов испытаний разрабатывают «расчетную модель» для получения функции сопротивления. Затем проверяют адекватность полученной модели посредством статистической интерпретации всех имеющихся данных испытаний. При необходимости расчетная модель корректируется до достижения достаточной корреляции между теоретическими значениями и данными испытаний.

По результатам испытаний также определяют отклонение в прогнозах за счет использования расчетной модели. Полученное отклонение следует объединить с отклонениями других переменных в функции сопротивления для получения суммарного отклонения. Должны быть учтены:

- отклонение значений прочности и жесткости материалов;
- отклонение значений геометрических свойств.

Нормативное сопротивление следует определять с учетом отклонений всех переменных.

Для стандартной процедуры оценки, делаются следующие допущения:

- функция сопротивления представляет собой функцию ряда независимых переменных X;

- имеется достаточное количество результатов испытаний;
- измерены все соответствующие геометрические свойства и свойства материалов;
- в функции сопротивления нет корреляции (статистической зависимости) между переменными;
- все переменные вытекают либо из нормального, либо логарифмически нормального распределения.

Примечание — Выбор логарифмически нормального распределения для переменной имеет преимущество в том, что не могут возникнуть негативные переменные.

Указанная стандартная процедура содержит в себе семь шагов, см. *Н.12.2—Н.12.8*.

Н.12.2 **Разработка расчетной модели**

Разрабатывают расчетную модель теоретического сопротивления r_t рассматриваемого элемента или детали конструкции, представленных функцией сопротивления:

$$r_t = g_{r_t}(\underline{X}). \qquad (Н.23)$$

Функция сопротивления должна охватывать все основные переменные $\underline{X}$, воздействующие на сопротивление в соответствующем предельном состоянии.

Все базовые параметры должны быть измерены по каждому испытываемому образцу и использованы в оценке.

Н.12.3 **Сравнение экспериментальных и теоретических значений**

Определяют теоретические значения r_{ti} для сравнения с экспериментальными значениями r_{ei}, вставив фактические измеренные характеристики в функцию сопротивления.

Строят диаграмму, как показано на рисунке *Н.1*. Точки на диаграмме представляют собой пары соответствующих значений (r_{ti}, r_{ei}).

Если функция сопротивления точная и полная, то все точки будут находиться на линии $b = 1$. На практике наблюдается некоторое рассеяние точек, и необходимо изучить причины любого систематического отклонения для проверки, означает ли это ошибки в процедурах испытаний или в функции сопротивления.

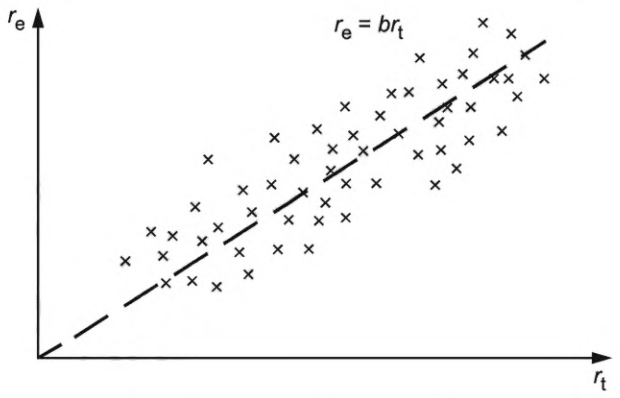


Рисунок *Н.1* — r_e–r_t диаграмма

Н.12.4 **Определение коэффициента коррекции среднего значения (уклон) *b***

Вероятностная модель сопротивления r имеет вид:

$$r = br_t\delta, \qquad (Н.24)$$

где b — наименьшие квадраты, наиболее соответствующие наклону, которые определяют по формуле

$$b = \frac{\sum r_{ei}r_{ti}}{\sum r_{ti}^2}. \qquad (Н.25)$$

Среднее значение функции теоретического сопротивления, рассчитанное с использованием средних значений $\underline{X}_m$ основных переменных, определяют по формуле

$$r_m = br_t(X_m)\delta = bg_{r_t}(X_m)\delta. \qquad (Н.26)$$

Н.12.5 Определение коэффициента вариации ошибок

Вектор ошибки δ_i для каждого экспериментального значения r_{ei} определяют по формуле

$$\delta_i = \frac{r_{ei}}{br_{ti}}. \qquad (Н.27)$$

Из значений δ_i определяют расчетное значение для V_δ посредством определения

$$\Delta_i = \ln(\delta_i). \qquad (H.28)$$

Расчетное значение Δ для $E(\Delta)$ получают, используя формулу

$$\overline{\Delta} = \frac{1}{n}\sum \Delta_i. \qquad (H.29)$$

Расчетное значение s_Δ^2 для σ_Δ^2 определяют по формуле

$$s_\Delta^2 = \frac{1}{n-1}\sum (\Delta_i - \overline{\Delta})^2. \qquad (H.30)$$

Коэффициента вариации V_δ векторов ошибки δ_i определяют по формуле

$$V_\delta = \sqrt{\exp(s_\Delta^2) - 1}. \qquad (H.31)$$

***H.12.6* Совместимость расчета**

Рассчитывают совместимость состава испытаний с допущениями, сделанными в функции сопротивления.

Если рассеяние значений (r_{ti}, r_{ei}) слишком большое для выдачи практических функций расчетного сопротивления, данное рассеяние можно уменьшить одним из следующих способов:

a) корректируя расчетную модель с учетом параметров, которые ранее не были учтены;

b) модифицируя b и V_δ, разделяя весь состав испытаний на соответствующие подгруппы, для которых воздействие таких дополнительных параметров можно рассматривать как постоянное.

Чтобы определить, какие параметры больше всего влияют на разброс, результаты испытаний можно разделить на подмножества по этим параметрам.

Примечание — Целью такого разделения является улучшить функцию сопротивления, разделяя на подгруппы и анализируя каждую подгруппу, используя стандартную процедуру. Недостатком расщепления результатов испытаний на подгруппы является тот факт, что число результатов испытаний в каждой подгруппе может оказаться чрезвычайно малым.

При определении квантильных коэффициентов k_n (см. *H.12.8*), значение k_n для подгрупп может быть определено на базисе общего количества испытаний в первой серии.

***H.12.7* Определение нормативного значения r_k сопротивления**

Если функция сопротивления имеет вид:

$$R = br_t\delta = bg_{r_t}(X_1, \ldots\ldots, X_j)\delta, \qquad (H.32)$$

среднее значение может быть получено из формулы

$$E(r) = bg_{r_t}(E(X_1),\ldots,E(X_j))\delta = bg_{r_t}(X_m)\delta \qquad (H.33)$$

и коэффициент вариации V_r может быть аппроксимирован формулой

$$V_r^2 \cong V_\delta^2 + V_{r_t}^2. \qquad (H.34)$$

Далее из уравнения (*H.34*) получают V_δ и коэффициент вариации определяют по формуле

$$V_{r_t}^2 = \frac{1}{g_{r_t}(\underline{X}_m)^2}\sum_{i=1}^{j}\left(\frac{\partial g_{r_t}(\underline{X})}{\partial X_i}\sigma_i\right)^2, \qquad (H.35)$$

,

где σ_i – среднеквадратическое отклонение X_i.

Если количество испытаний ограничено (скажем, n меньше 100), необходимо сделать допущение в распределении Δ для статистических погрешностей. Данное распределение следует рассматривать как центральное t-распределение с параметрами Δ, V_Δ и n.

Нормативное (5 %-ный квантиль) сопротивление r_k определяют по формуле

$$r_k = bg_{r_t}(\underline{X}_m)\exp(-k_\infty\alpha_{\ln r_t}\sigma_{\ln r_t} - k_n\alpha_{\ln\delta}\sigma_{\ln\delta} - 0{,}5\sigma_{\ln r}^2). \qquad (H.36)$$

Сомножители уравнения (H.36) определяют по формулам:

$$\sigma_{\ln r} = \sqrt{\ln(V_r^2 + 1)}\,; \qquad (H.37)$$

$$\sigma_{\ln r_t} = \sqrt{\ln(V_{r_t}^2 + 1)}\,; \tag{Н.38}$$

$$\sigma_{\ln \delta} = \sqrt{\ln(V_{\delta}^2 + 1)}\,; \tag{Н.39}$$

$$\alpha_{\ln r_t} = \frac{\sigma_{\ln r_t}}{\sigma_{\ln r}}\,; \tag{Н.40}$$

$$\alpha_{\ln r_\delta} = \frac{\sigma_{\ln \delta}}{\sigma_{\ln r}}, \tag{Н.41}$$

где k_n — нормативный фактор квантиля из таблицы 4 с V_X неизвестным;

k_∞ — значение k_n для $n \to \infty$ [k_∞ = 1,64];

$\sigma_{\ln r_t}$ — коэффициент взвешивания для $\sigma_{\ln r_t}$;

$\alpha_{\ln\delta}$ — коэффициент взвешивания для $\sigma_{\ln\delta}$.

Приложение *I*
(справочное)

Расчет на усталость по правилу Майнера с экстраполяцией нагрузки

I.1 Расчет на усталость

Усталостное разрушение наступает в результате накопленного повреждения, вызванного воздействием переменных нагрузок. С этой точки зрения процесс усталости развивается в результате приращения повреждения, которое следует из каждого гистерезисного цикла нагружения, представленного на диаграмме напряжение—деформация для рассматриваемого сечения. Таким образом, на временной диаграмме нагружения каждого сечения каждому локальному максимуму соответствует локальный минимум, что составляет полный цикл (расчет цикла см., например, в [*60*] или [*61*]). Каждый из этих циклов характеризуется парными экстремальными величинами (или, эквивалентно, амплитудой и средним значением, то есть разностью между двумя парными экстремальными значениями цикла и средним значением цикла). Если принять допущение, что процесс накопления повреждения подчиняется линейной зависимости и для каждого цикла носит независимый характер [*62*]—[*64*], полное повреждение, D, можно определить по формуле

$$D = \sum_i \frac{1}{N(S_i)}, \tag{I.1}$$

где S_i — диапазон нагрузки для i-го цикла;

$N(S_i)$ — число циклов до разрушения при постоянной величине амплитуды нагружения с диапазоном, заданным аргументом (т. е. кривая S–N).

Предполагается, что локальное напряжение в месте разрушения линейно связано с величиной нагрузки. Как правило, для расчета на усталость кривая S–N, отобранная для проектного расчета, имеет заданную вероятность безотказной работы (часто 95 %) и уровень достоверности (часто 95 %), которые учитываются при построении кривой на основе экспериментальных данных для конкретного материала. Таким образом, искомый минимальный уровень надежности может ожидаться, когда суммарное повреждение достигнет единицы.

Примечание — Для облегчения восприятия, изменением уровня нагрузки, соответствующего средней точке каждого цикла, пренебрегают. Данное ограничение устраняют позднее, когда результат колебания уровня нагрузки в средней точке цикла будет учтен заменой на эквивалентный цикл нагружения.

В процессе эксплуатации ВЭУ испытывает большое количество переменных циклов нагружения, являющихся результатом изменений параметров ветра в широком диапазоне. Поэтому при проектировании следует рассчитать спектр нагружения. Наибольшие циклы для этого спектра должны быть получены на основе достоверного соответствия данным, полученным в процессе моделирования или испытаний, продолжительность которых значительно короче, чем срок службы ВЭУ. Для каждого режима ветра можно принять, что процесс нагружения моделируется стационарным вероятностным процессом. Таким образом, ожидаемое повреждение при заданной скорости ветра V для определенного периода времени T определяют по формуле

$$E\langle D \mid V,T\rangle = \int_0^\infty \frac{n_{ST}(S \mid V,T)}{N(S)} dS, \tag{I.2}$$

где $n_{ST}(S \mid V, T)$ — спектр кратковременного нагружения, определенный как функция плотности для определенного числа циклов.

В этом случае ожидаемое число циклов в любом интервале диапазона нагружения (S_A, S_B) в течение периода времени T определяется как:

$$\int_{S_A}^{S_B} n_{ST}\left(S \middle| V,T\right) dS. \tag{I.3}$$

Определение ожидаемого повреждения, накопленного в результате воздействия нормальных эксплуатационных нагрузок в течение всего срока эксплуатации, получается расширением временного интервала на полный срок эксплуатации и интегрированием по диапазону скоростей ветра, соответствующих режиму производства энергии. В результате получаем выражение:

$$E\langle D\rangle = \frac{\text{Lifetime}}{T}\int_{V_{in}}^{V_{out}} E\langle D \mid V,T\rangle p(V) dV = \frac{\text{Lifetime}}{T}\int_{V_{in}}^{V_{out}}\int_0^\infty \frac{n_{ST}(S \mid V,T)}{N(S)} p(V)\, dS dV, \tag{I.4}$$

где $p(V)$ — функция плотности вероятности для скорости ветра на высоте оси ветроколеса для стандартных классов ВЭУ, описанных в 6.3.2.1.

Спектр нагружения для длительно действующих нагрузок имеет вид:

$$n_{LT}(S) = \frac{\text{Lifetime}}{T} \int_{V_{in}}^{V_{out}} n_{ST}(S \mid V,T)p(V)dV, \tag{I.5}$$

тогда

$$E\langle D\rangle = \int_0^{\infty} \frac{n_{LT}(S)}{N(S)} dS. \tag{I.6}$$

На практике во многих случаях удобно разделить диапазоны величин нагрузок и скоростей ветра на отдельные подгруппы — выборки. В этом случае ожидаемое повреждение может быть аппроксимировано:

$$E\langle D\rangle \approx \sum_{j,k} \frac{n_{jk}}{N(S_k)}, \tag{I.7}$$

где n_{jk} — ожидаемое число циклов нагружения в течение срока эксплуатации в j-й выборке скорости ветра k-й выборке величины нагрузки;

S_k — величина, соответствующая центру k-й выборки величины нагрузки.

Отсюда:

$$n_{jk} = \frac{\text{Lifetime}}{T} \int_{V_j-\Delta V_j/2}^{V_j+\Delta V_j/2} \int_{S_k-\Delta S_k/2}^{S_k+\Delta S_k/2} n_{ST}(S\mid V,T)p(V)dSdV, \tag{I.8}$$

где ΔV_j — ширина j-й выборки скорости ветра и ΔS_k ширина k-й выборки нагрузки.

Учет данных результатов и требований 7.6.3 в отношении использования коэффициентов безопасности для нагрузок, дает выражение для расчета по предельной усталостной прочности:

$$\int_0^{\infty} \frac{n_{LT}(S)}{N(\gamma S)} dS \le 1, \tag{I.9}$$

где $\gamma = \gamma_f\gamma_m\gamma_n$ — произведение всех трех главных частных коэффициентов безопасности для нагрузок, материалов и последствий отказа соответственно.

В дискретной форме формула (*I.9*) приобретает вид:

$$\sum_{j,k} \frac{n_{jk}}{N(\gamma S_k)} \le 1. \tag{I.10}$$

Для всех случаев, когда существенное повреждение происходит более чем в одном случае нагружения из таблицы 2, доли повреждения вычисляются для всех случаев нагружения, используя левую часть неравенства (*I.10*). Сумма вычисленных долей должна быть меньше или равна единице.

Излагаемый метод до этого момента пренебрегал изменением величины среднего значения каждого цикла нагружения. Один из простых способов, позволяющих учесть это изменение, состоит в том, чтобы рассчитать эквивалентный цикл нагружения, имеющий фиксированную величину среднего значения цикла нагружения и вызывающий точно такое же повреждение. В этом случае повреждение в результате восприятия эквивалентного цикла является точно таким же, как и в результате циклов с переменными средними значениями. Таким образом, разрушение произойдет (в среднем) для того же самого числа циклов с постоянной амплитудой эквивалентного циклического диапазона S_{eq}, как и для циклов в любом данном циклическом диапазоне и с любой соответствующей величиной среднего значения. Если обозначить семейство кривых S–N для переменных средних значений $N(S, M)$, то уравнение эквивалентного повреждения

$$N(S_{eq}, M_0) = N(S,M) \tag{I.11}$$

решается для S_{eq} при заданных величинах S, M и выбранной постоянной величине среднего уровня цикла M_0. В математических терминах это может быть представлено как:

$$S_{eq} = N^{-1}(N(S,M), M_0), \tag{I.12}$$

где обратная функция относится к первой переменной функции, N, данной во второй переменной. Как правило, M_0 выбирается так, чтобы дать величину R (отношение максимальной нагрузки к минимальной нагрузке) для эквива-

лентных циклов нагружения, которые находятся в середине диапазона величин, взятых непосредственно из данных нагружения. Часто приемлемой величиной является величина средней нагрузки, учитывающей все скорости ветра из рабочего диапазона. Для большинства случаев, когда кривые *S–N* определены аналитически (например, степенные или экспоненциальные зависимости), диапазон эквивалентного циклического нагружения легко вычисляется. Если диапазон становится большим, то необходимо проявить внимательность. В зависимости от величины среднего значения цикла максимальная или минимальная величина нагрузки для данного цикла может приблизиться к величине статической прочности. В этом случае простая высокочастотная кривая *S–N* может стать неприемлемой. Кроме того, для величин с большими диапазонами местные напряжения или деформация могут перейти от доминирующего состояния сжатие-сжатие или растяжение-растяжение к состоянию растяжение-сжатие, которое может иметь иное аналитическое представление кривой *S–N*. Важно использовать правильную зависимость *S–N* для определения диапазона эквивалентного цикла. Вначале для данной временной диаграммы определяются циклы по методу дождевого потока. Затем вычисляется ряд эквивалентных циклов с постоянным средним значением цикла (на основе правильно выбранных зависимостей *S–N* для каждого вида циклов нагружения). Дальнейшая оценка распределений этих эквивалентных циклов дает новый эквивалентный спектр кратковременного нагружения. Полученный новый спектр используется для подсчета числа циклов, используемых для определения долей повреждения для каждой выборки нагружения и скорости ветра. Главное преимущество данного метода состоит в том, что оценка эквивалентного спектра является статистически более ясной, чем прослеживание уровней средних значений как независимой переменной. Получаемое преимущество обусловлено тем, что середины выборок в этом методе отдельно не отслеживаются, и большинство циклов нагружения рассчитывается на основе типичных временных рядов измеренных нагрузок для каждой выборки нагрузки и скорости ветра.

Дополнительным практическим результатом, возникающим при определении кратковременного спектра нагружения, является получение большого количества маленьких циклов, определенных методом дождевого потока. Эти маленькие циклы могут часто встречаться в соседних по времени точках, поэтому между ними может быть установлена связь. Маленькие циклы могут также искажать форму аналитической аппроксимации хвоста распределения. Поэтому при аппроксимации хвоста краткосрочного распределения рекомендуется рассматривать только циклы выше пороговой величины. Пороговая величина с наименьшим 95 %-ным процентилем обычно дает хорошие практические результаты. Понижение пороговой величины может быть оправдано, если маленькие циклы были исключены или, если увеличенное число данных, используемых для отображения процесса, как ожидают, приведет к существенной дополнительной статистической надежности.

Для практического применения при проектировании ВЭУ необходимо определить эквивалентный спектр кратковременного нагружения от смоделированных динамических данных, а затем вычислить накопленное в период эксплуатации повреждение. Один из методов выполнения этой задачи должен соответствовать следующему порядку:

- выбрать базовый средний уровень как среднюю величину уровня нагружения, учитывающую все скорости ветра;

- из полученных моделированием данных для определенной скорости ветра извлечь последовательность локальных максимумов и минимумов. Последовательности локальных максимумов и минимумов из повторяющихся временных рядов для тех же самых режимов ветра рекомендуется объединить в один ряд;

- определить величину диапазона и среднее значение цикла для каждого смоделированного цикла нагружения методом дождевого потока;

- определить эквивалентный диапазон для каждого цикла нагружения относительно выбранного базового уровня среднего значения цикла;

- определить аналитическое выражение, соответствующее вероятностному распределению эквивалентных циклов для случая краткосрочного нагружения $F_{ST}(S|V, T)$ для данных выше назначенного порога. Описание одного из методов подбора аналитического выражения для распределения может быть найдено в [*63*]. Для выбранного типа распределения должна быть проверена степень точности соответствия данным и достаточность набора данных для выполнения надежной оценки поведения хвоста распределения по сравнению с имеющимися данными;

- определить ожидаемое число циклов в каждой выборке в течение срока службы, используя данные, когда выборка нагружения ниже порогового значения, и подобранное аналитическое распределение для нагружения, когда выборка нагружения выше порогового значения, в соответствии с формулой

$$n_{jk} \approx \left(\frac{\text{Lifetime}}{T}\right) P_j \begin{cases} m_{jk}, & \text{если } S_k \text{ ниже } j\text{-го порога} \\ M_j\left(F\left(S_k + \frac{\Delta S_k}{2} \mid V_j, T\right) - F\left(S_k - \frac{\Delta S_k}{2} \mid V_j, T\right)\right), & \text{если } S_k \text{ выше } j\text{-го порога} \end{cases}, \qquad (I.13)$$

где m_{jk} — число смоделированных циклов усталости, насчитываемых в данных для j-й выборки скорости ветра и k-й выборки нагружения ниже назначенного порога;

M_j — число усталостных циклов, подсчитанных при моделировании, выше порога;

$P_j = e^{-\pi\left(\frac{V_j - \frac{\Delta V_j}{2}}{2V_{ave}}\right)} - e^{-\pi\left(\frac{V_j + \frac{\Delta V_j}{2}}{2V_{ave}}\right)}$ — показывает часть времени, которую скорость ветра находится в выборке j в случае принятия распределения скорости ветра по Рэлею;

- просуммировать долевые повреждения, используя левую часть формулы (*F.9*);
- просуммировать полное повреждение за весь срок службы для всех случаев усталостного нагружения.

При использовании данного метода следует проверить:

- достаточна ли величина выбранного разрешения для выборок скорости ветра и диапазона нагружения для обеспечения желаемой численной точности, и
- достаточно ли большие величины диапазона нагружения используются, чтобы достоверно представить хвост распределения нагрузки на длинном интервале времени.

Первая проблема может быть исследована аппроксимированием ошибки как половины разности между результатами, вычисленными с двумя различными разрешениями выборки, пропускающими данные от каждой другой скорости ветра или диапазона нагружения. В качестве альтернативы должно быть вычислено суммарное повреждение, используя оконечные точки величин выборок, вместо средних величин для получения граничного результата. Вторая проблема может быть исследована, если прогрессивно увеличивать величину наибольшего диапазона выборки нагружения до обнаружения незначительного прироста, накопленного в течение срока службы повреждения.

Следует отметить, что поскольку отношение $\frac{\text{Lifetime}}{T}$ является большим числом, то наибольшая необходимая выборка нагружения может быть значительно больше, чем наибольший цикл, полученный при моделировании данных. Такой результат получается потому, что полная смоделированная временная диаграмма нагружения намного меньше, чем срок службы ВЭУ, и необходимо выполнить статистическую экстраполяцию для того, чтобы достоверно определить повреждение, соответствующее хвостовой части распределения для длительного нагружения.

Приложение J
(справочное)

Прогнозирование экстремальной скорости ветра с помощью метода Монте-Карло

J.1 Общие требования

В зонах, где сильный ветер подчиняется экстремальным внетропическим циклонам, экстремальную скорость ветра можно оценивать с помощью метода Гумбеля для расширенных данных, получаемых с ближайшей аттестованной метеорологической станции по методу «измерение–сопоставление–прогноз», как описано в приложении *L*. С другой стороны, области тропиков и субтропиков, где доминируют тропические и внетропические циклоны, известны как области со смешанным климатом, и необходимо исследование каждого значительного метеорологического явления, создающего ветер. Было замечено, что при использовании метода «измерение–сопоставление–прогноз» для областей со смешанным климатом без учета штормов различного типа экстремальная скорость ветра недооценивается.

В настоящем приложении описано прогнозирование экстремальных скоростей ветра, вызванных тропическим циклоном, в зонах со смешанным климатом с помощью метода Монте-Карло для [*65*]—[*70*].

J.2 Прогнозирование экстремальных скоростей ветра, вызванных тропическим циклоном

J.2.1 Оценка параметров тропического циклона

Количество тропических циклонов в год на конкретной площадке λ может быть определено как количество тропических циклонов за год, прохождение которых включено в цикл моделирования (обычно радиус которого составляет 500 км) и получается со средств моделирования предыдущих тропических циклонов.

Тропические циклоны характеризуются четырьмя параметрами: давление в центре p_c, скорость перемещения C, угол перемещения q, измеренное против часовой стрелки положительное с востока и минимальное расстояние d_{min} при достижении циклоном конкретной интересующей площадки, из архивных средств моделирования тропических циклонов.

Еще одним параметром тропических циклонов является радиус максимальной скорости ветра R_m, который можно определить по модели поля давления, предлагаемой в [*66*]:

$$\frac{p(r)-p_c}{p_\infty - p_c} = \exp\left(-\frac{R_m}{r}\right)^B, \tag{J.1}$$

где $p(r)$ — давление поверхности моря на расстоянии r от центра тропического циклона.

R_m можно идентифицировать по методу наименьших квадратов с использованием измеренного давления поверхности моря на метеорологических станциях, а также можно предположить, что периферийное давление p_∞ составляет 1013 ГПа или определяется аналогичным образом. Разница давления в центре определяется как Δ или $i_\infty - p_c$. В случае B = 1,0, данное отношение становится формулами, предлагаемыми в [*67*].

Указанные шесть параметров аппроксимируются аналитическими функциями: Δh, R_m и C, могут аппроксимироваться смешанными функциями на основании логарифмически нормального распределения и распределения Вейбулла (см., например, [*68*]), q нормальным или бинормальным распределением, d_{min} полиномиальной функцией и λ распределением Пуассона. Также необходимо рассчитать корреляции между данными параметрами, за исключением λ.

J.2.2 Создание синтетических тропических циклонов

Синтетические тропические циклоны создаются на длительный период для удовлетворения функций смоделированного распределения вероятности и корреляций. Изменением поля давления тропических циклонов можно пренебречь, поскольку скорость и направление ветра оцениваются только, когда тропический циклон находится внутри цикла моделирования с радиусом 500 км.

Используют метод измененного ортогонального разложения для удовлетворения функций статистического распределения параметров тропического циклона и одновременно корреляции между ними, как предлагает [*68*].

Пять параметров описания тропического циклона унифицированы и записаны в форме вектора следующим образом:

$$\mathbf{x}^T = \{\ln(\Delta p), \ln(R_m), \ln(C), \theta, d_{min}\}. \tag{J.2}$$

Ковариационная матрица **x** определяется как **S**. Собственные значения $\lambda^{(k)}$ и собственные векторы $\Phi^{(k)}$ рассчитываются посредством решения следующего уравнения:

$$\left[\mathbf{S} - \lambda^{(k)}\mathbf{E}\right]\mathbf{\Phi}^{(k)} = 0. \tag{J.3}$$

Затем создаются независимые параметры $\mathbf{z}_i$ с пятью составляющими вслед за аппроксимированными распределениями по отношению к намеченным по конкретным годам сгенерированных векторов и количеством сге-

нерированных векторов вслед за оцененной годовой частотой возникновения. Соотнесенные параметры $\mathbf{x}_i$ можно получить при помощи следующего уравнения:

$$\mathbf{x}_i = \left[\mathbf{\Phi}^{(1)}\ \mathbf{\Phi}^{(2)} \ldots \mathbf{\Phi}^{(5)}\right]^{-1} \mathbf{z}_i. \tag{J.4}$$

Данные векторы $\mathbf{x}_i$ необходимо учитывать, как набор параметров для тропических циклонов. Следует иметь в виду, что, хотя корреляции между каждой составляющей x_i удовлетворяют заданные корреляции, распределения их вероятности не вытекают из заданных.

В конечном итоге, $\mathbf{x}_i$ необходимо переупорядочить в порядке возрастания и изменить так, чтобы распределения их вероятности вытекали из заданных распределений вероятности. Эта операция практически не влияет на корреляции, поскольку она не меняет набор параметров.

J.2.3 **Прогнозирование скоростей ветра в пределах тропического циклона**

На тропический циклон $\vec{x}$, вызванный ветром на интересующей площадке, оказывает влияние местная топография. Скорость ветра $u_T(\vec{x})$ и направление $\theta_T(\vec{x})$ на высоте оси ветроколеса можно записать как:

$$u_T(\vec{x}) = S_t E_p u_g(\vec{x}); \tag{J.5}$$

$$\theta_T(\vec{x}) = \theta_g(\vec{x}) - \gamma_p + D_t, \tag{J.6}$$

где $u_g(\vec{x})$ и $\theta_g(\vec{x})$ — градиентная скорость и направление ветра (по часовой стрелке с юга);

E_p и γ_p — коэффициент профиля ветра и угол притекания, измеренные против часовой стрелки, положительные от вектора градиентной скорости ветра;

S_t и D_t — коэффициент ускорения и разница в направлении ветра в силу местной топографии как функции направления ветра $(\theta_g(\vec{x}) - \gamma_p)$ над плоским рельефом.

Градиентная скорость ветра и направление на площадке $\vec{x}$ (r, φ) можно рассчитать из давления поля тропического циклона, допуская баланс между силой, обусловленной градиентом давления, центробежной силой и силой Кориолиса.

$$u_g(\vec{x}) = \frac{-C\sin(\varphi-\theta) - fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{-C\sin(\varphi-\theta) - fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho}\frac{\partial p(r)}{\partial r}}; \tag{J.7}$$

$$\theta_g(\vec{x}) = \pi - \varphi, \tag{J.8}$$

где r — расстояние от центра тропического циклона;

φ — угол, измеренный против часовой стрелки, положительный с востока;

f — параметр Кориолиса;

u_g и θ_g — функции времени из-за перемещения циклонов.

Коэффициент профиля ветра E_p и угол притекания γ_p используются для расчета скорости ветра на высоте оси ветроколеса, которые можно оценить при помощи полуэмпирических формул (см., например, [*68*]) или CFD-методом. Коэффициент ускорения S_t и разница в направлении ветра D_t показывают влияние местной топографии на скорость и направление ветра. Данные факторы определяются как функции направления ветра над плоским рельефом посредством CFD-метода (см., например, [*69*]).

Десятиминутную среднюю скорость ветра можно спрогнозировать путем добавления случайных величин к скорости ветра, оцененной моделями поля ветра. Предполагается, что данные случайные величины должны вытекать из логарифмически нормального распределения со средним значением ноль и среднеквадратическим значением σ_a, которое может быть смоделировано как:

$$\sigma_a = \gamma \cdot u_T(\vec{x}). \tag{J.9}$$

Здесь 0,1 было использовано для γ, как предложено в [*70*].

J.3 Прогнозирование экстремальной скорости ветра в зонах со смешанным климатом

J.3.1 Общие положения

Связь между периодом повторяемости R и распределением вероятности годовой максимальной скорости ветра $F(u)$ может быть записана следующим образом:

$$F(u) = 1 - 1/R. \tag{J.10}$$

В зонах со смешанным климатом распределения вероятности необходимо оценивать отдельно для внетропических и тропических циклонов, а затем необходимо прогнозировать комбинированное распределение вероятности.

J.3.2 **Прогнозирование экстремальной скорости ветра внетропических циклонов методом «измерение–сопоставление–прогноз»**

Распределения экстремального ветра (то есть распределение вероятности годовой максимальной скорости ветра) внетропических циклонов можно оценивать методом «измерение–сопоставление–прогноз» по данным измерений скорости ветра за N лет на ближайшей аттестованной метеорологической станции следующим образом:

a) по данным измерений скорости ветра получают временной ряд скорости ветра на площадке за N лет, используя метод «измерение–сопоставление–прогноз» или CFD-метод;

b) определяют максимальную скорость ветра на площадке $u_{E,i}$, вызванную внетропическими циклонами в каждом календарном году, и упорядочивают значения по порядку возрастания от $u_{E,1}$ до $u_{E,N}$. Определяют распределение вероятности годовой максимальной скорости ветра, вызванной внетропическими циклонами, по формуле

$$F_E(u_{E,i}) = \frac{i}{N+1}; \tag{J.11}$$

c) строят зависимость $u_{E,i}$ от приведенной переменной $y_{E,i}$:

$$y_{E,i} = -\ln\left(-\ln\left(F_E\left(u_{E,i}\right)\right)\right). \tag{J.12}$$

Наилучшая зависимость может быть получена путем аппроксимации функции по методу наименьших квадратов. По результирующей зависимости можно прогнозировать экстремальную скорость ветра с заданным периодом повторяемости.

J.3.3 **Прогнозирование экстремальной скорости ветра тропических циклонов методами типа «измерение–сопоставление–прогноз»**

Распределение экстремального ветра тропических циклонов за N лет можно оценить моделированием по методу Монте-Карло (см. в J.2) следующим образом:

a) извлекают максимальную годовую скорость ветра за N лет моделированием по методу Монте-Карло в отношении тропических циклонов и упорядочивают по возрастанию значений от $u_{T,1}$ до $u_{T,M}$. Определяют распределение вероятности годовой максимальной скорости ветра $F_T(u_T)$ и приведенную переменную $y_{T,i}$ аналогично J.3.2;

b) строят зависимость $u_{T,i}$ от приведенной переменной $y_{T,i}$. В случае метода Монте-Карло, экстраполяция $F_T(u_T)$ не требуется, т. к. получены достаточные данные.

J.3.4 Определение экстремальной скорости ветра в зоне со смешанным климатом

Комбинированное распределение вероятности годовой максимальной скорости ветра может быть получено с учетом как внетропических, так и тропических циклонов. При допущении, что скорости ветра, вызванные внетропическими циклонами и тропическими циклонами, являются независимыми событиями, комбинированное распределение вероятности можно оценить по формуле

$$F_C\left(u_C\right) = F_E\left(u_E\right)F_T\left(u_T\right), \tag{J.13}$$

где $F_C(u_C)$ — комбинированное распределение вероятности.

Необходимо убедиться, что спрогнозированные скорости экстремального ветра имеют значения, сопоставимые с измерением.

Приложение *K*
(справочное)

Оценка влияния аэродинамического затенения и турбулентности на площадках ветроэнергетических станций

K.1 Влияние аэродинамических следов

При вычислении усталостных нагрузок, возникающих в процессе нормальной эксплуатации ВЭУ, следует принять во внимание воздействие аэродинамических следов от соседних ВЭУ. Данное воздействие может быть учтено с помощью эффективной интенсивности турбулентности I_{eff} (см., например, [*71*]). Эффективную интенсивность турбулентности в зависимости от средней скорости ветра V_{hub} на высоте оси ветроколеса, определяют по формуле

$$I_{\text{eff}}(V_{\text{hub}}) = \left\{ \int_0^{2\pi} p(\theta \mid V_{\text{hub}}) I^m(\theta \mid V_{\text{hub}}) d\theta \right\}^{\frac{1}{m}}, \qquad (K.1)$$

где p — функция плотности вероятности направления ветра;

I — интенсивность турбулентности, в результате движение воздушных потоков окружающей среды и аэродинамического следа в направлении ветра θ;

m — показатель степени кривой усталости Веллера для материала рассматриваемого конструктивного элемента (*S*–*N*-кривая).

Данный метод применим для стандартной, а также нестандартной компоновок ВЭС.

Далее принимается, что распределение $p(\theta|V_{\text{hub}})$ — однородное и компоновка ВЭС — стандартная прямоугольная. Приведенные формулы можно также откорректировать для прочих компоновок и неоднородных распределений. В случае неоднородного закона распределения направления скорости, функция p_{w} может быть откорректирована коэффициентом, равным отношению существующей вероятности направления ветра (в направлении соседних ВЭУ) к вероятности, соответствующей однородному распределению направления ветра.

В расчете не следует принимать какое-либо уменьшение средней скорости ветра внутри площадки с установленными ВЭУ:

если $\min\{d_i\} \geq 10D$:

$$I_{\text{eff}} = \frac{\hat{\sigma}_{\text{c}}}{V_{\text{hub}}}; \qquad (K.2)$$

если $\min\{d_i\} < 10D$:

$$I_{\text{eff}} = \frac{\hat{\sigma}_{\text{eff}}}{V_{\text{hub}}} = \frac{1}{V_{\text{hub}}} \left[(1 - N\ p_{\text{w}}) \hat{\sigma}_{\text{c}}^m + p_{\text{w}} \sum_{i=1}^{N} \hat{\sigma}_{\text{T}}^m(d_i) \right]^{\frac{1}{m}}; \ p_{\text{w}} = 0{,}06, \qquad (K.3)$$

где D — диаметр ветроколеса;

$\hat{\sigma}_{\text{c}} = \hat{\sigma} + 1{,}28\hat{\sigma}_{\sigma}$ — характеристическое значение стандартного отклонения турбулентности воздушного потока окружающей среды;

$\hat{\sigma}_{\sigma}$ — среднеквадратичное отклонение расчетного среднеквадратического отклонения скорости набегающего воздушного потока;

$\hat{\sigma}$ — предполагаемая дисперсия воздушного потока окружающей среды;

$\hat{\sigma}_{\text{T}} = \sqrt{\dfrac{V_{\text{hub}}^2}{\left(1{,}5 + \dfrac{0{,}8d_i}{\sqrt{C_{\text{T}}}}\right)^2} + \hat{\sigma}_{\text{c}}^2}$ — максимальная дисперсия турбулентности в центре аэродинамического следа на оси ветроколеса ($\hat{\sigma}_{\text{c}}$ не следует рассматривать в качестве характеристики, связанной с собственной турбулентностью воздушного пространства внутри ВЭС);

C_{T} — удельное значение коэффициента использования энергии ветра ВЭУ для соответствующей скорости ветра на высоте оси ветроколеса. Если коэффициент использования энергии ветра для соседних ВЭУ не известен, то рекомендуется использовать общее для всех значение коэффициента $C_{\text{T}} = 7c/V_{\text{hub}}$;

d_i — отношение расстояния от рассматриваемой ВЭУ до соседней ВЭУ с номером i к диаметру ветроколеса;

c — константа, равная 1 м/с;

I_{eff} — эффективная интенсивность турбулентности;

N — число соседних ВЭУ, см. таблицу *K.1*.

Влиянием аэродинамических следов от ВЭУ, расположенных за другими установками, пренебрегают. Например, для ВЭУ, расположенных в ряд, должно быть учтено влияние только двух установок, самых близких к рассматриваемой. Число ближайших ВЭУ, которые должны быть включены в расчет I_{eff} в зависимости от конфигурации размещения ВЭУ, приведено в таблице *К.1*.

Таблица *К.1* — Количество (*N*) соседних ВЭУ, которые должны быть включены в расчет I_{eff}

Конфигурация размещения ВЭУ	*N*
Две ВЭУ	1
Один ряд	2
Два ряда	5
Внутри площадки, имеющей более двух рядов	8

Стандартная конфигурация размещения ВЭУ на площадке, с числом рядов более двух показана на рисунке *К.1*.

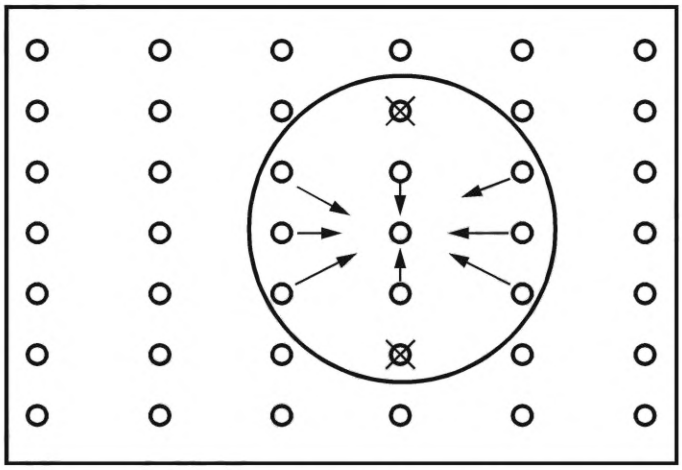


Рисунок *К.1* — Конфигурация размещения ВЭУ на площадке с числом рядов более двух

На площадках с большим количеством ВЭУ наблюдается тенденция к созданию ими собственной турбулентности воздушного пространства внутри ВЭС. Таким образом, когда число ВЭУ от рассматриваемой установки до «края» площадки — больше пяти, или расстояние в рядах, перпендикулярных к преобладающему направлению ветра, менее 3D, тогда, для определения $\hat{\sigma}_T$, вместо $\hat{\sigma}_c$ следует использовать дисперсии собственной турбулентности ВЭС $\hat{\sigma}'_c$, которую определяют по формуле

$$\hat{\sigma}'_c = \frac{1}{2}\left(\sqrt{\hat{\sigma}_w^2 + \hat{\sigma}^2} + \hat{\sigma}\right) + 1{,}28\hat{\sigma}_\sigma, \qquad (K.4)$$

где

$$\hat{\sigma}_w = \frac{0{,}36\, V_{hub}}{1 + 0{,}2\sqrt{\frac{d_r d_f}{S_T}}}, \qquad (K.5)$$

где d_r и d_f — расстояния в ряду между ВЭУ и между рядами, соответственно, выраженные в диаметрах ветроколеса.

К.2 Динамическая модель изгибающегося аэродинамического следа

К.2.1 Основные положения

Влияние аэродинамического следа от соседних ВЭУ может учитываться при оценке усталости и расчетах предельных состояний первой группы (по несущей способности) путем применения динамической модели изгибающегося аэродинамического следа (см., например, [*72*]—[*74*]). Модель дает описание изменений усредненного поля потока поверх ВЭС, а также изменений интенсивности турбулентности по сравнению с условиями окружающей среды.

Модель состоит из трех частей, см. рисунок К.2:

- модели недостаточности аэродинамического следа, описанной в криволинейной системе координат;
- стохастической модели процесса изгибания нисходящего уходящего аэродинамического следа;

- модели дополнительной турбулентности, вызванной аэродинамическим следом, описанной в криволинейной системе координат.

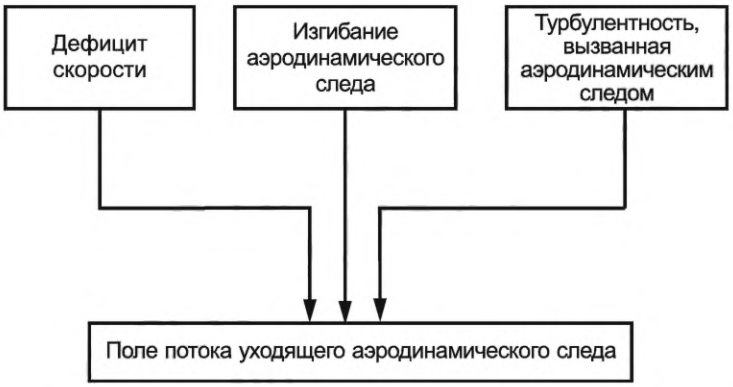


Рисунок *К.2* — Три части динамической модели изгибающегося аэродинамического следа

Описание рекомендуемых субмоделей, их синтеза и их расширения до случая множественного аэродинамического следа приведено в *К.2.3*—*К.2.6*.

К.2.2 Недостаточность аэродинамического следа

Средняя недостаточность аэродинамического следа расширяется и затухает в зависимости от нисходящего расстояния от генерирующего его ветроколеса. Рекомендуемое моделирование недостаточности аэродинамического следа основано на аппроксимации тонкого слоя сдвига по уравнениям Навье-Стокса во вращательно-симметричной форме без учета члена, содержащего давление. В результате применения метода турбулентной вязкости к напряжениям Рейнольдса система уравнений имеет вид:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rV(r,x))+\frac{\partial U(r,x)}{\partial x}=0; \qquad (K.6)$$

$$U\frac{\partial U(r,x)}{\partial x}+V(r,x)\frac{\partial U(r,x)}{\partial r}=\frac{v_T}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial U(r,x)}{\partial r}\right), \qquad (K.7)$$

где U и V — средние скорости аэродинамического следа в осевом и радиальном направлениях соответственно. Турбулентная вязкость v_T включает турбулентность окружающего воздуха и турбулентность самогенерируемого аэродинамического следа:

$$\frac{2v_T}{DV_{hub}}=0{,}023\,F_1(\tilde{x})\left(\frac{\sigma}{V_{hub}}\right)^{0,3}+0{,}016\,F_2(\tilde{x})\frac{R_w(\tilde{x})}{D}\left(1-\frac{U_{min}(\tilde{x})}{V_{hub}}\right); \qquad (K.8)$$

$$\tilde{r}=\frac{2r}{D};\ \tilde{x}=\frac{2x}{D}, \qquad (K.9)$$

где $F_1(\tilde{x})$ и $F_2(\tilde{x})$ — фильтры-функции, зависящие от продольной координаты;

R_w — радиус аэродинамического следа;

U_{min} — минимальная скорость аэродинамического следа.

Функции $F_1(\tilde{x})$ и $F_2(\tilde{x})$ определяют, используя следующие системы уравнений:

$$F_1(\tilde{x})=\begin{cases}\left(\dfrac{\tilde{x}}{8}\right)^{3/2}-\dfrac{\sin\left(2\pi\,\tilde{x}^{3/2}/8^{3/2}\right)}{2\pi}; & 0\le\tilde{x}<8;\\ 1; & \tilde{x}\ge 8\end{cases} \qquad (K.10)$$

$$F_2(\tilde{x})=\begin{cases}0{,}0625 & 0\le\tilde{x}<4\\ 0{,}025\tilde{x}-0{,}0375 & 4\le\tilde{x}<12\\ 0{,}00105(\tilde{x}-12)^3+0{,}025\tilde{x}-0{,}0375 & 12\le\tilde{x}<20\\ 1 & 20\le\tilde{x}\end{cases}. \qquad (K.11)$$

Эмпирические фильтры-функции, учитывающие влияние давления в ближней зоне (т. е. F_2) и отсутствие сбалансированности между усредненным полем потока сдвига и полем турбулентности в ближнем и среднем режиме аэродинамического следа (т. е. F_1), представлены в уравнении:

$$R_w(0) = D\left(1-0,45a_m^2\right)\sqrt{\frac{1+m}{8}}, \qquad (K.12)$$

где a_m — средняя индукция над ветроколесом;

$$m = \frac{1}{\sqrt{1-C_T}}, \qquad (K.13)$$

где C_T — коэффициент тяги ветроколеса.

Исходная недостаточность аэродинамического следа, нарастающая в нисходящем направлении, с использованием формул (*K.6*) и (*K.7*) получается за счет удаленного расчета индукции движущей силы элемента лопасти в сочетании с радиальным определением масштаба, приведенным в формуле (*K.12*).

***K.2.3* Изгибание аэродинамического следа**

Раздел по изгибанию аэродинамического следа базируется на фундаментальном предположении, что перемещение аэродинамических следов в пограничном слое атмосферы можно смоделировать с учетом того, что они действуют в качестве пассивных индикаторов, ведомых крупномасштабными структурами турбулентности. Моделирование процесса изгибания, таким образом, включает аспекты подходящего описания «несущей» стохастической транспортной среды (т. е. поля макротурбулентности), а также подходящего описания предельной частоты, определяющей структуры макротурбулентности в данном контексте.

Стохастическое моделирование изгибания аэродинамического следа проводят с учетом каскада выпусков недостаточных аэродинамических следов, «выбрасываемых» в последовательные моменты времени в соответствии с аналогией пассивного индикатора. Распространение недостаточности каждого «выбрасываемого» аэродинамического следа впоследствии моделируется и их совокупное описание составляет модель изгибания аэродинамического следа в пространстве и времени.

Если принять гипотезу Тейлора, нисходящая адвекция каждого «выпуска» недостаточности каждого аэродинамического следа диктуется подходящей скоростью адвекции, которая часто берется как средняя скорость окружающего ветра. Что касается динамики бокового и нормального направлений, то каждый каскадный элемент рассматриваемого аэродинамического следа последовательно перемещается в соответствии со скоростями боковой и нормальной макротурбулентности при текущем положении недостаточности аэродинамического следа. Динамику недостаточности аэродинамического следа в боковом направлении y, и в нормальном направлении z, описывают следующие дифференциальные уравнения:

$$\frac{dy}{dt} = v_c(y,z,t); \qquad (K.14)$$

$$\frac{dz}{dt} = w_c(y,z,t), \qquad (K.15)$$

где v_c и w_c — пространственно-зависимые крупномасштабные скорости при времени t.

Рекомендуемое пространственное усреднение, определяющее крупномасштабный участок турбулентности, может быть выражено в понятиях частоты среза с использованием гипотезы Тейлора:

$$f_c = \frac{U_u}{4R}. \qquad (K.16)$$

Следует учитывать, что при такой формулировке подразумевается, что на крупномасштабный участок турбулентности не оказывает влияние наличие ВЭС.

***K.2.4* Турбулентность, вызванная аэродинамическим следом**

Турбулентность, вызванная аэродинамическим следом, включает доли от традиционной механически сгенерированной турбулентности, вызванные сдвигом аэродинамического следа, а также вызванные лопастями и тянущиеся следом вихри в основном в виде концевых и комлевых вихрей, постепенно снижающиеся за ветроколесом, генерирующим уходящий аэродинамический след. Таким образом, данная доля турбулентности рассматривается как независимая турбулентность окружающей среды.

При масштабе длин, сравнимом с характеристическим размером недостаточности аэродинамического следа, базовое движение динамической модели изгибающегося аэродинамического следа, расщепленное по масштабам, означает, что турбулентность, вызванная аэродинамическим следом, изгибается при недостаточности аэродинамического следа. Вызванная маломасштабная турбулентность впоследствии выражается в криволинейной системе координат. Несмотря на нарушение статистики второго порядка (т. е. кросс-корреляции), неоднородность вызванной турбулентности приравнивается посредством простого масштабирования поля однородной и изотропной турбулентности с масштабом длины, равным диаметру одного ветроколеса и среднеквадратическому откло-

нению турбулентности, равному 1 м/с. Предполагается вращательная симметрия интенсивности турбулентности, вызванной аэродинамическим следом, что приводит к коэффициенту масштабирования, который для данного нисходящего расстояния зависит только от радиальной координаты. Эмпирический масштабный коэффициент, k_{wt}, зависит от глубины недостаточности, ($V_{hub} - U_{min}$), в рассматриваемом нисходящем расстоянии, а также от радиального градиента недостаточного воздушного потока $\partial U / \partial r$:

$$k_{wt}(\tilde{x},\tilde{r}) = 0,6\left|1-\frac{U(\tilde{x},\tilde{r})}{V_{hub}}\right| + \frac{0,35}{V_{hub}}\left|\frac{\partial U(\tilde{x},\tilde{r})}{\partial \tilde{r}}\right|. \qquad (K.17)$$

K.2.5 Наложение аэродинамического следа

Наложение аэродинамического следа важно при работе с полями воздушных потоков ВЭС. Это сложный процесс, требующий упрощения. Отдельно анализируют аэродинамический след от каждой из рассматриваемых ВЭУ (включая связанную с ними турбулентность, вызванную мелкомасштабным следом), а затем проводят корреляцию и моделируют связанное с ними изгибание.

В отношении режимов ветра применяют два метода в соответствии с результатом воздействия: понижение мощности ниже номинальной и превышение номинальной мощности.

При понижении скорости ветра ниже номинальной (понижении мощности ниже номинальной) для ВЭУ с центром ветроколеса, расположенным в пространственном положении x внутри ВЭС, изменяющееся во времени поле воздушного потока в полярных координатах ветроколеса (r, θ) определяется доминирующим уходящим аэродинамическим следом среди вкладов от всех расположенных выше по потоку ВЭУ в любое время; а именно

$$U_t\left(r,t\middle|x\right) = \underset{i}{\mathrm{MIN}}\left(U_{t,i}\left(r,t\middle|x\right)\right), \qquad (K.18)$$

где $(r, t \mid x)$ — временные координаты, координата t скомбинирована с пространственной координатой в полярной системе координат с центром в пространственном положении x;

$U_{t,i}$ — поле потока каждого уходящего аэродинамического следа, определяется уравнением

$$U_{t,i} = (U_i + u_i)\, e_1 + v_i e_2 + w_i e_3, \qquad (K.19)$$

в котором e_j — вектор единичной нормали в продольном, боковом и нормальном направлениях потока, j = 1, 2, 3.

Индекс i относится к ВЭУ, расположенным выше относительно пространственного положения x для данного среднего направления ветра.

Следует учитывать, что с параметрами уравнения (*K.18*), вызванная уходящим аэродинамическим следом, входящими в U_t, маломасштабная турбулентность, агрегируется в несогласующейся манере. Однако, поскольку доли маломасштабной турбулентности являются незначительными, это не отражается негативным образом на текущей работе.

При превышении номинальной скорости ветра (превышение номинальной мощности) уравнение (*K.18*) заменяется суммированием недостающих долей всех расположенных выше ВЭУ, используя введенные выше обозначения:

$$U_t(r,\theta,t \mid x) = \sum_i (U_{t,i}(r,\theta,t \mid x)). \qquad (K.20)$$

K.2.6 Синтез модели

Для каждого ветроколеса ВЭУ поле поступающего ветра состоит из окружающего невозмущенного поля ветра с соответствующими недостаточностью аэродинамического следа и вызванной им маломасштабной турбулентности с линейным наложением [см. формулу (*K.18*)]. Невозмущенное поле ветра представляет собой среднюю скорость ветра для конкретной площадки, состоящую из детерминированной части (т. е. среднего сдвига ветра) и традиционной турбулентной части с характеристиками турбулентности окружающей среды.

Результирующие влияния аэродинамического следа, подлежащие наложению, состоят из стохастически движущихся недостаточностях аэродинамических следов, ($V_{hub} - U$), и соответственно связанных долей турбулентности, вызванных аэродинамическим следом, и добавленных в соответствии с набором параметров, сформулированным в формуле (*K.18*). Необходимо учитывать, что изгибание недостаточности аэродинамического следа представляет собой влияние доминирующего аэродинамического следа.

Приложение *L*
(справочное)

Прогнозирование распределения ветра для площадок размещения ветроэнергетических установок на основе методов типа «измерение–сопоставление–прогноз»

L.1 Общие положения

Оценка возможности размещения ВЭУ на конкретной площадке требует определения критических для проекта параметров скорости ветра на данной площадке. Для выполнения оценки часто бывает недостаточно данных, даже измеренных в одной точке на площадке. Однако можно создать расширенный ряд данных с помощью экстраполяции, основанной на рядах данных многолетних наблюдений, полученных для другого местоположения. Методы типа «измерение–сопоставление–прогноз» (measure–correlate–predict (MCP) methods) являются средством, позволяющим создать расширенный ряд данных (см., например, [*75*]—[*78*]).

Методы типа «измерение–сопоставление–прогноз» отличаются друг от друга периодом усреднения данных и характером их направленности. Рекомендуемый метод основан на почасовых данных, полученных параллельно на площадке ВЭУ и соседней метеостанции. Эти данные взаимозависимые и используются для получения уравнений линейной регрессии для всех секторов. Угол сектора, составляющий 30°, является совместимым с используемым метеорологической станцией. Наборы данных, используемые для получения уравнений регрессии, должны быть максимально длинными и, по крайней мере, обеспечивать минимальное покрытие консервативной части любых сезонных изменений.

L.2 Применение для вычисления среднегодовой скорости ветра и распределения

Вышеупомянутые уравнения регрессии применяются к данным многолетних наблюдений метеостанции сектор за сектором. Чтобы исключить кратковременные вариации, необходимо иметь данные метеорологической станции за период не менее 7 лет. В результате получаются средние почасовые данные для площадки размещения ВЭУ. Полученные средние данные могут быть преобразованы в вероятностное распределение для оценки площадки.

L.3 Вычисление экстремальной скорости ветра

Классическим методом для прогнозирования экстремальной скорости ветра является модифицированный для повышения точности метод Гумбеля (например, метод «Best Leiblein Unbiased Estimators (BLUE)», описанный в [*79*]). В этом методе рекомендуется рассматривать ряд данных, представляющих период не менее десяти лет.

Также рекомендуется использовать метод независимых штормов («Method of independent storms (MIS)»), который является производным от метода Гумбеля. Данный метод, также описанный в [*79*], основан на использовании более, чем одной точки в наборе годовых данных. Названный метод может использоваться для рядов данных, продолжительность которых составляет семь лет. В соответствии с методом независимых штормов выбираются отдельные штормовые пиковые скорости ветра путем сравнения с пороговыми значениями и фильтрацией по времени, чтобы гарантировать принадлежность значений величин независимым событиям.

Коэффициенты регрессии, учитывающие специфические особенности секторов, используются в таблице почасовых максимальных скоростей ветра на метеостанции для годовых данных (базовый анализ Гумбеля и метод независимых штормов) и секторов. Аналогичная таблица также создается для площадки ВЭУ. Для каждого года извлекается наибольшая наблюдающаяся на предполагаемой площадке величина скорости, которая используется в анализе Гумбеля.

Использование в данном случае этих коэффициентов является обоснованным, так как они были получены из почасовых средних данных и применяются к почасовым средним данным. Этот метод не предполагает, что секторы на предполагаемой площадке и базовой, в которых возникают максимальные величины скорости, должны совпадать. Максимальные величины скоростей на предполагаемых площадках могут быть более точно определены при использовании коэффициентов регрессии, учитывающих специфические особенности секторов, принимая во внимание зависимости, существующие на площадке.

Выбор подходящего периода повторяемости в расчете экстремальных величин должен принимать во внимание число событий в год.

Параметры порыва ветра должны быть определены из данных, полученных на площадке, или теоретическими методами.

При использовании указанных методов для оценки скорости экстремального ветра следует учитывать, что результирующая точность в значительной мере зависит от качества данных и реальных местных условий, сравниваемых с базовыми. В результате, корреляции регрессионного анализа могут быть плохими. В случаях, когда параметры, характеризующие конкретные местные условия, установлены в нормативно-технических документах, в качестве минимальных значений для проектирования ВЭУ следует использовать значения экстремальной скорости ветра, полученные с использованием этих нормативных параметров, а не с помощью методов типа «измерение–сопоставление–прогноз».

Приложение М
(справочное)

Ветроэнергетические установки средней мощности

М.1 Общий обзор

Существует значимый рынок размещения ВЭУ по категории размеров меньше, чем размер типовых установок, и больше, чем категория, определенная в *ГОСТ Р 54418.2*. Данную категорию называют «ВЭУ средней мощности» (см. определение *3.29*). В зависимости от применения может оказаться удобным использовать требования к проектированию, отличающиеся от требований, изложенных в данном тексте.

Приложение М предоставляет информацию по возможной корректировке технических требований, которая будет удобна для ВЭУ средней мощности.

М.2 Факторы внешней среды

М.2.1 Общие требования

ВЭУ средней мощности можно устанавливать в условиях более сложного ландшафта и/или вблизи от промышленных зон. Следовательно, в этих условиях может оказаться более удобным использовать ВЭУ средней мощности подклассов безопасности А+ или А.

М.2.2 Сдвиг ветра

На некоторых площадках ВЭУ средней мощности могут возникать более высокие коэффициенты сдвига ветра в сочетании с высокими уровнями турбулентности на таких площадках. Следовательно, для ВЭУ средней мощности может оказаться удобным использовать коэффициент сдвига, α, больше 0,2. Коэффициент сдвига α, равный 0,3, обеспечивает более устойчивое значение коэффициента профиля ветра на таких площадках.

Класс безопасности ВЭУ может также быть обозначен как подкласс с литерой «М». Если необходимо использовать значения α больше 0,2, это значение должно быть указано в проектной документации и должен быть проведен расчет нагрузок с этим значением.

М.3 Сборка, монтаж и строительные работы

Сборка, монтаж и возведение ВЭУ средней мощности должен отвечать требованиям, изложенным в разделе 12, и требованиям настоящего подраздела.

Информация по способу установки, сборки и возведения ВЭУ должна быть изложена в документации, предоставленной монтажной организацией и как минимум включать следующее:

- детали по правильной последовательности и сборке при монтаже ВЭУ;
- любые стандарты по общему и специализированному обучению, рекомендуемые или предписанные для того, чтобы подрядчики могли выполнить монтаж безопасно и в соответствии с местными нормами;
- информацию по безопасности и охране труда в отношении монтажа фундамента, в случае если изготовитель ВЭУ несет ответственность за фундамент — а если нет, то за нагрузки ВЭУ и детали интерфейса ВЭУ — фундамент, а также за любое другое требование по ВЭУ, учитываемое для правильного проектирования и сооружения фундамента;
- информацию по безопасности и охране труда в отношении монтажа башни, лопастей и гондолы;
- информацию по безопасности и охране труда в отношении любой другой устанавливаемой конструкции или системы (например, мультипликатора);
- информацию по безопасности и охране труда в отношении монтажа распорных систем или любых эквивалентных систем;
- рекомендации по управлению площадкой, доступу к площадке и приемки транспортировки и хранения ветроколеса/ротора и сопутствующего оборудования в целях обеспечения защиты рабочих и прочих вопросов, включая ветроколесо/ротор и его компоненты во время монтажа ветроколеса/ротора;
- любые специальные нагрузки и условия окружающей среды (например, скорости ветра), в том числе специальные пределы, которые надлежит соблюдать или не превышать особенно в отношении монтажа башни и лопастей;
- информацию по безопасности и охране труда, необходимую для возможности безопасного использования любого оборудования специального назначения (например, кранов и грузоподъемного оборудования) в рамках монтажа ВЭУ;
- любые дополнительные или альтернативные требования к безопасному выводу из эксплуатации ВЭУ; а также
- всю необходимую информацию для записи и передачи окончательной передаточной информации заказчикам и конечным потребителям.

Если изготовителем не поставляется монтажное оборудование специального назначения, окончательный выбор любого используемого оборудования или применяемых рабочих систем должен лежать в зоне ответственности монтажной организации.

Любые специальные нормативные требования или обязательства, имеющие отношение к ВЭУ, а также любые обязанности, подмандатные для соблюдения национальных нормативов в ведении предоставленной юрисдикции, могут быть уточнены в предоставленной документации.

Любые специфические стандарты или своды правил, имеющие отношение к ВЭУ, и любые обязанности, предусмотренные для соблюдения национальных стандартов и сводов правил в ведении предоставленной юрисдикции, могут быть уточнены в предоставленной документации.

М.4 Ввод в эксплуатацию, работа и техническое обслуживание

Ввод в эксплуатацию, эксплуатация и техническое обслуживание ВЭУ средней мощности должны отвечать требованиям, изложенным в разделе 13 со следующей дополнительной информацией.

М.4.1 Общие требования

Информация и инструкции по способу эксплуатации технического обслуживания ВЭУ должна быть оговорена в предоставленной оператору документации. Данная информация может включать (но не ограничиваться этим):

- чертежи, схемы, описания и пояснения, необходимые для эксплуатации, технического обслуживания, ремонта и испытаний ВЭУ;
- инструкции по обучению операторов и обслуживающего персонала с указанием важных аспектов, в которые входят — как минимум, описания доступа и выхода из ВЭУ, инструкции по восхождению, использованию лифта, инструкции по безопасному доступу к электрическим установкам и процедуры аварийного выхода, техобслуживанию при максимальной скорости ветра и максимальному допускаемому количеству персонала внутри гондолы или при работах на ней;
- информацию по максимальному допускаемому количеству персонала в различных частях ВЭУ в одно и то же время;
- информацию по защитным мерам, предпринимаемым оператором, включая, при необходимости, предоставление средств индивидуальной защиты (СИЗ);
- требования к техническому обслуживанию, инспектированию и испытаниям важных для безопасности элементов и систем;
- детали режимов управления эксплуатации системы управления ВЭУ;
- спецификацию спасательного оборудования;
- перечень потенциально опасных зон и спецификацию опасных рисков, связанных с каждой потенциально опасной зоной;
- требование к огнетушителям и их местоположению;
- описание существенно важной спецоснастки, используемой в период технического обслуживания и ремонта; а также рекомендуемые интервалы технического обслуживания для ВЭУ и ключевых элементов и систем;
- пределы устойчивости между эксплуатацией, техническим обслуживанием, ремонтом и выходом из строя. Это включает в себя описание предельных условий окружающей среды для проведения работ по техническому обслуживанию ВЭУ.

М.4.2 Общие требования для осуществления безопасности эксплуатации, проведения осмотров и технического обслуживания

Защитные меры, введенные для ВЭУ, должны быть задокументированы. Данная информация может включать (но не ограничиваться этим):

- описание значительных потенциально существующих опасных факторов;
- спецификацию пределов ВЭУ, включая намеченное использование ВЭУ, включая различные рабочие режимы и процедуры вмешательства операторов, пространственные пределы, определяющие рабочие зоны и доступ к ним, интерфейсы «оператор-машина» и интерфейсы «машина-источник питания», любые временные пределы с учетом расчетного ресурса важных для безопасности элементов;
- детали требований к технической безопасности и защитным мерам, включая системы управления, учитываемые в конструкции ВЭУ, а также детали любых остаточных рисков, на которые необходимо обращать внимание покупателя или оператора ВЭУ.

М.5 Документация

Необходимо предоставить все необходимые руководства, схемы, спецификации, инструкции, чертежи или инструкции по безопасности, достаточные для обеспечения безопасной и правильной поставки, сборки, монтажа и технического обслуживания конструкции и оборудования ВЭУ, по мере необходимости. Должен быть учтен окончательный объем и содержание всей предоставленной информации:

a) оценки рисков, выполненные изготовителем;
b) размер и конфигурация ВЭУ;
c) соответствующий класс и нагрузочные характеристики поставленной ВЭУ;
d) условия площадки и окружающей среды, подходящие для ВЭУ.

Документация, предоставленная покупателю, должна быть составлена на английском языке и на одном или более официальных языков страны, в которой монтируется ВЭУ, если английский язык не является одним из них. Документация должна включать в себя:

- наименование изготовителя и его местного представителя, в случае отдельной организации;
- обозначение ВЭУ, включая наименование, модель и класс;
- любые установленные декларации соответствия;
- четкое заявление в отношении ограничений операций, которые могут выполняться покупателем/потребителем и тех операций, которые должны быть доверены специализированной/уполномоченной организации/техническим специалистам, причем указанные организации/технические специалисты должны предоставить свидетельство о разрешении выполнения этих операций.

Вся документация должна быть построена в логическом порядке и должна обновляться при поступлении распоряжений и новой информации. Содержание документации в разумных пределах должно охватывать предполагаемое неправильное использование.

Приложение ДА
(справочное)

Выбор ветроэнергетических установок по условиям соответствия площадке размещения

ДА.1 Общие требования

На ВЭУ воздействуют факторы окружающей среды, факторы, определяемые электрической сетью подключения, а также соседние ВЭУ, которые могут оказывать влияние на характер нагружения, срок службы и процессы эксплуатации ВЭУ. В дополнение к этим факторам для площадки размещения должны быть учтены: топография местности, сейсмическая опасность зоны, химические и механические свойства слагающих грунтов. При проектировании должно быть показано, что определенные для участка перечисленные выше факторы и условия не могут нанести ущерб структурной целостности выбранной ВЭУ. При проектировании должна быть оценена топографическая сложность участка согласно ДА.2 и выполнена оценка ветрового режима площадки размещения согласно ДА.3. Для оценки структурной целостности допускается использовать два подхода, заключающиеся в следующем:

- подтверждение того, что значения всех факторов, описывающих специфические условия площадки размещения, не превышают принятых при проектировании ВЭС (см. ДА.9);
- подтверждение структурной целостности ВЭУ в ситуациях, когда каждое из упомянутых выше условий является таким же или превосходит те, которые определены для площадки (см. ДА.10).

Если какие-либо условия для площадки являются более суровыми, чем принятые при проектировании, то структурная целостность и электрическая совместимость должны быть подтверждены на основе второго подхода.

Определение частных коэффициентов безопасности для нагрузок в 7.6.2.1 выполнено в предположении, что оценка нормальных и экстремальных факторов ветрового режима на площадке была проведена в соответствии с минимальными требованиями, изложенными в настоящем приложении.

ДА.2 Оценка сложности рельефа площадки и ее влияния на турбулентность

ДА.2.1 Оценка сложности рельефа

Площадку необходимо оценивать с точки зрения формы рельефа, его внешних признаков, сложности и т. п., поскольку влияние формы рельефа на перемещения воздушных масс может привести к отклонению структуры турбулентности от расчетных условий.

Сложность рельефа оценивается по величине уклона рельефа от плоской поверхности следующим образом.

Для вычисления уклона рельефа определяются плоскости, соответствующие рельефу в пределах соответствующих расстояний, и амплитуды секторов для всех секторов направления ветра вокруг ВЭУ (см. рисунки ДА.1 и ДА.2). Аппроксимирующие плоскости не должны проходить через основание башни. Уклон обозначает угол между горизонтальной линией и различными средними линиями секторов, спроектированных вертикально на аппроксимирующих плоскостях. Соответственно изменение рельефа местности от аппроксимирующих плоскостей обозначает расстояние, вдоль вертикальной линии, между аппроксимирующими плоскостями и рельефом на точках поверхности.

Разрешение поверхностной координатной сетки, используемой для оценки сложности рельефа, не должно превышать 50 м.

Секторы круга должны составлять 30°. Для секторов круга с радиусом $5z_{hub}$ зона, используемая для аппроксимации плоскости, может быть расширена до $2z_{hub}$ по ветру от позиции ВЭУ (см. рисунок ДА.1).

Индексы уклона рельефа (TSI) и индексы изменения рельефа местности (TVI) для зоны каждого круга определяют, используя значения уклона и изменение рельефа, по формулам:

$$\mathrm{TSI}_{30} = \sum_{i=1}^{12} f_{\mathrm{Energy}}(i) \cdot \left| \theta(i) \right|;$$

$$\mathrm{TVI}_{30} = \sum_{i=1}^{12} f_{\mathrm{Energy}}(i) \cdot \frac{D_{\mathrm{TV}}(i)}{R}; \qquad \text{(ДА.1)}$$

$$\mathrm{TSI}_{360} = k_1 \cdot \theta_{360};$$

$$\mathrm{TVI}_{360} = \frac{D_{\mathrm{TV360}}}{k_2 \cdot R},$$

где TSI_{30}, TSI_{360} — индексы уклона рельефа, рассчитанные от зоны секторов 30 ° и круга 360 ° соответственно;

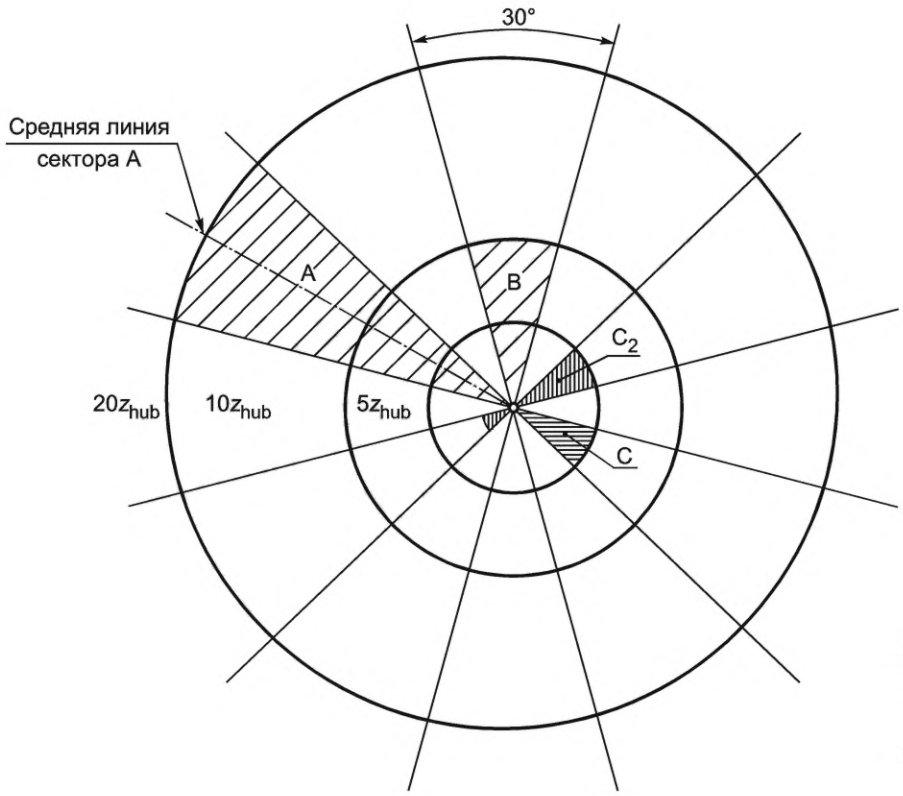
TVI_{30}, TVI_{360} — индексы изменения рельефа местности, рассчитанные от зоны секторов 30° и круга 360° соответственно;

i — индекс сектора ветра (1, 2,……, 12);

$f_{\mathrm{Energy}}(i)$ — процентное содержание энергии ветра, проходящего через i-й сектор, $\sum f_{\mathrm{Energy}}(i) = 1$;

$\theta(i)$ — угол уклона аппроксимирующей плоскости для i-го сектора 30 °;

θ_{360} — угол уклона аппроксимирующей плоскости круга 360 °;



A — радиус $20z_{hub}$;
B — радиус $10z_{hub}$;
C — радиус $5z_{hub}$; C_2 — радиус $5z_{hub}$ расширен до $2z_{hub}$ за позицией ВЭУ

Рисунок ДА.1 — Примеры секторов 30° для аппроксимации данных по рельефу

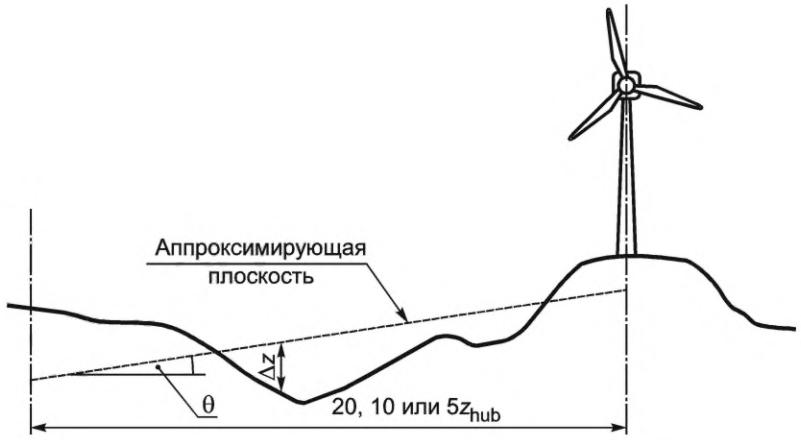


Рисунок ДА.2 — Изменение рельефа (Δz) и уклон рельефа (θ)

$D_{TV}(i)$ — среднеквадратичное отклонение изменения рельефа местности в *i*-м секторе 30 °;
D_{TV360} — среднеквадратичное отклонение изменения рельефа местности в кругу 360 °;
R — радиус круга;
k_1 — коэффициент эмпирической корректировки для TSI_{360}, k_1 = 5/3;
k_2 — коэффициент эмпирической корректировки для TVI_{360}, k_2 = 3;
TSI_{30} — среднее абсолютное значение углов уклона двенадцати секционированных аппроксимирующих плоскостей, взвешенных по притоку энергии;
TVI_{30} — среднее абсолютное значение углов уклона двенадцати секционированных среднеквадратичных отклонений изменения рельефа местности по радиусу круга, взвешенных по притоку энергии;
TSI_{360} — угол уклона аппроксимирующей плоскости круга 360 ° с поправкой на эмпирический коэффициент k_1;
TVI_{360} — среднеквадратичное отклонение изменения рельефа местности в кругу 360 °, нормализованное радиусом круга с поправкой на эмпирический коэффициент k_2.

Рельеф местности оценивается сложностью ландшафта посредством двух индексов TSI и TVI для каждого из трех кругов ($5z_{hub}$, $10z_{hub}$ и $20z_{hub}$). Для обоих индексов определено три категории сложности — низкая (L), средняя (M) и высокая (H), см. таблицу ДА.1. Если значения TSI_{30} и TVI_{30}, а также значения TSI_{360} и TVI_{360} для всех трех кругов ниже порогового значения для категории L, площадка оценивается как площадка с несложным ландшафтом. Если нет, площадка оценивается как площадка со сложным ландшафтом и ей присваивается одна из категорий сложности L, M или H, в зависимости от наивысшей категории TSI или TVI для любого из кругов.

Таблица ДА.1 — Пороговые значения категорий сложности ландшафта L, M и H

Радиус круга	Амплитуда сектора аппроксимирующей плоскости	Пороговые значения (нижний предел)					
		Индекс уклона рельефа (TSI)			Индекс изменения рельефа местности (TVI)		
		L	M	H	L	M	H
$5z_{hub}$	360°	10°	15°	20°	2 %	4 %	6 %
$5z_{hub}$	30°						
$10z_{hub}$							
$20z_{hub}$							

ДА.2.2 Оценка структуры турбулентности на площадке

Структура турбулентности (например, соотношения трех элементов турбулентности) на площадке должна определяться, в основном, измерениями на площадке. При отсутствии данных по площадке оценку можно проводить по соответствующей модели потока. Также оценку можно проводить по сложности площадки. Значения, показанные в таблице ДА.2, присваивают в зависимости от категории сложности, определенной, как указано в ДА.2.1.

Таблица ДА.2 — Значения среднеквадратичных отклонений боковой и нормальной турбулентности по отношению к продольному элементу в зависимости от категории сложности рельефа местности L, M и H

Показатель	Категория		
	L	M	H
σ_2/σ_1	0,85	0,93	1,00
σ_3/σ_1	0,60	0,65	0,70

Параметр корректировки структуры турбулентности C_{CT}, который можно использовать в определении структурной целостности на основании данных ветра в ДА.9, может определяться следующим уравнением:

$$C_{CT} = \sqrt{1 + (\hat{\sigma}_2/\hat{\sigma}_1)^2 + (\hat{\sigma}_3/\hat{\sigma}_1)^2} \Big/ \sqrt{1 + (\sigma_2/\sigma_1)^2 + (\sigma_3/\sigma_1)^2}. \quad \text{(ДА.2)}$$

Примечание — Если C_{CT} меньше 1, необходимо использовать $C_{CT} = 1{,}0$.

В данном уравнении σ_1, σ_2 и σ_3 представляют значения трех элементов турбулентности, на высоте оси ветроколеса и месте расположения ВЭУ, усредненные по диапазону скорости ветра между $0{,}6V_r$ и $1{,}6V_r$. Расчетные значения для моделей Каймала и Манна можно получить из приложения С.

При отсутствии измеренных данных о площадке для C_{CT} можно использовать значения из таблицы ДА.3 в зависимости от категории сложности площадки.

Допускается интерполяция между значениями в таблицах ДА.2 и ДА.3.

Таблица ДА.3 — Значения параметра корректировки структуры турбулентности в зависимости от категории сложности ландшафта L, M и H

Показатель	Категория		
	L	M	H
C_{CT}	1,05	1,10	1,15

ДА.3 Параметры ветра, определяемые в проекте

ДА.3.1 Общие требования

Параметры ветра площадки должны либо измеряться и рассчитываться с использованием надлежащих методов (например, контрольные измерения, сделанные на площадке, долгосрочные записи с локальных метеорологических станций, имитационные модели или локальные нормы и стандарты). Результаты имитационного моделирования должны быть проверены путем сравнения с данными измерений.

ДА.3.2 Параметры ветра

Значения перечисленных ниже параметров ветра на площадке размещения ВЭУ должны быть определены на высоте оси ветроколеса:

- экстремальная средняя скорость ветра на 10-минутном интервале, V_{50}, на высоте оси ветроколеса с периодом повторяемости 50 лет (см. примечание в 7.4.7);
- функция плотности вероятности распределения скорости ветра, $p(V_{hub})$;
- среднеквадратичное отклонение турбулентности набегающего воздушного потока $\hat{\sigma}$ (определенное как средняя величина среднеквадратичного отклонения продольной составляющей скорости ветра) и среднеквадратичное отклонение $\hat{\sigma}_\sigma$ от $\hat{\sigma}$ на уровне оси ветроколеса для всех скоростей ветра, указанных в ДА.9 или ДА.10;
- среднеквадратичное отклонение экстремальной турбулентности набегающего воздушного потока $\hat{\sigma}_{1,ETM}$ с периодом повторяемости 50 лет;
- угол отклонения набегающего потока;
- сдвиг ветра;
- плотность воздуха.

Примечания

1 Частные коэффициенты безопасности для РСН 6.1 и РСН 6.2 получены при допущении, что коэффициент вариации годовой максимальной скорости ветра меньше 15 %. Для случаев, когда он больше 15 % см. примечание в 7.4.7.

2 Среднеквадратичное отклонение экстремальной скорости окружающего ветра $\hat{\sigma}_{1,ETM}$ можно получить, используя надлежащий метод экстраполяции, например метод IFORM, или оценить посредством:

$$\hat{\sigma}_{1,\,ETM} = \hat{\sigma} + k_p\hat{\sigma}_\sigma;\ \ k_p = 0{,}01\left(\frac{V_{ave}}{(\text{м/с})} - 21\right)\left(\frac{V_{hub}}{(\text{м/с})} - 5\right) + 5. \qquad \text{(ДА.3)}$$

3 В случае данных о значениях сдвигов ветра с высокой вариабельностью в связи с высоким стратифицированным потоком, сложным ландшафтом или сильными изменениями неровностей использование среднего сдвига ветра может быть недостаточно.

В случае если в сведениях о площадке отсутствуют данные о плотности воздуха, принимают, что плотность воздуха соответствует *[28],* сделав поправку на годовую среднюю температуру.

Ширина выборки любой скорости ветра, используемой выше, должна быть 2 м/с или менее, а секторы направления ветра должны составлять 30 ° или менее. Все параметры, за исключением плотности воздуха, должны иметься в качестве функции направления ветра с интервалом осреднения 10 минут.

Необходимо уделить особое внимание эффектам «затенения» от конструкций большого размера или орографических препятствий, расположенных от ВЭУ на расстоянии менее 20-кратной характеристической длины конструкции. Таким влиянием можно пренебречь, если нижняя кромка ветроколеса находится как минимум на высоте в четыре раза выше, чем высота конструкции или орографического препятствия.

В регионах, склонных к ураганам, циклонам и тайфунам, экстремальная скорость ветра должна оцениваться надлежащими методами, например указанными в приложении J.

Для холодного климата необходимо определять дополнительные параметры при выборе места размещения ВЭУ. Условие обледенения необходимо оценивать согласно приложению *D*.

ДА.3.3 Измерительная установка

Требования к использованию измерений для оценки пригодности площадки размещения ВЭУ и для оценок ветровых ресурсов во многих отношениях различны, и, следовательно, необходимо найти баланс между количеством и качеством измерений. Кроме того, при организации измерений для оценки пригодности площадки ВЭУ необходимо дополнительно учитывать следующее:

- измерительная система должна быть установлена в местах, характерных для большинства площадок (например, лес, линии горных хребтов, степи, долины, склоны и заграждения);
- точное количество и местонахождение измерительных систем, которое можно рекомендовать, индивидуально для каждой площадки и зависят от рельефа, протяжения и наземного покрова и т. п., а также от ожидаемой сложности режимов ветра и потоков воздушных масс внутри площадки и модели потока, используемых для анализа;
- высоты измерения ветровых режимов, а также количество датчиков должны выбираться для обеспечения представительности результатов измерений: измерения должны проводиться в диапазоне высот внутри предлага-

емой ометаемой площади ветроколеса ВЭУ, при этом необходимо учитывать окружающий ландшафт и растительный покров;

- расстояние по вертикали между датчиками должно обеспечивать возможность детального анализа вертикального сдвига ветра, например быть не менее одной трети диаметра ветроколеса;
- необходимо установить датчики температуры окружающей среды и давления;
- необходимо использовать 10-минутный интервал осреднения на базисе как минимум 1 Гц (среднее, среднеквадратическое отклонение и максимальная скорость ветра, среднее значение направления ветра и средняя температура);
- если измерения проводят в холодной климатической зоне, то необходимо использовать дополнительные подогреваемые датчики по отношению к учитываемым ненагретым датчикам;
- при сложном ландшафте следует замерять все ветровые составляющие, например при помощи ультразвукового 3D-анемометра.

Примечание — Руководство по монтажу и установке измерительного оборудования — см. *ГОСТ Р 54418.12.1*.

ДА.3.4 Оценка данных

Рекомендации в отношении охвата данных и периода следующие:

- период измерения может отклоняться в зависимости от качества данных и надежности корреляции по долговременному нормативному источнику. В случае, если сезонные изменения в значительной мере влияют на ветровые режимы, период мониторинга должен быть достаточно долгим для включения этих воздействий (не менее 12 месяцев для охвата сезонных воздействий);
- ежемесячный охват данных измерений должен быть достаточно полным, чтобы оценить изменения ветровых режимов за месяц.

Во время оценки данных необходимо проводить и документировать проверку качества и фильтрацию. Для расширения данных можно использовать метод «измерение–сопоставление–прогноз».

Среднее значение среднеквадратического отклонения $\hat{\sigma}$, т. е. среднеквадратическое значение скорости ветра продольной составляющей турбулентности и ее среднеквадратическое значение $\hat{\sigma}_{\sigma}$ должно определяться с использованием статистических методик, применяемых к измеренным данным и, предпочтительно, для данных с линейно исключенным трендом.

Долговременная оценка необходима для расчета экстремальной скорости ветра, долговременной средней скорости ветра, а также плотности воздуха, но только если имеющийся долговременный источник является подходящим и достаточно надежным.

Можно использовать альтернативные методики. Данные методики должны предназначаться для усовершенствования представительности измерений для площадки.

Вышеуказанные методы и процедуры должны быть задокументированы.

ДА.4 Оценка эффекта «затенения» ВЭУ

В процессе проектирования должны быть обязательно рассмотрены эффекты взаимного воздействия расположенных рядом ВЭУ («затенение», которое влияет на процесс выработки электроэнергии и силовое нагружение ВЭУ). При проведении проектных расчетов ВЭС и выборе ВЭУ по условиям конкретной площадки следует принять во внимание осредненные и турбулентные характеристики воздушного потока, вызванные «затенением» одной или многими ВЭУ, которые расположены выше по течению воздушного потока. Расчеты должны учитывать расстояния между ВЭУ, все скорости ветра и его направления, существенные для выработки электроэнергии.

Увеличение нагружения ВЭУ, в основном учитывающее результат влияния аэродинамического следа, рекомендуется определять при помощи эффективной интенсивности турбулентности или используя более подробные модели аэродинамического следа. В любом случае модель аэродинамического следа должна включать в себя адекватное представление результирующего воздействия на ВЭУ, складывающегося из нагружения фоновой турбулентностью, а также прерывистых и турбулентных влияний аэродинамического следа.

Для выполнения расчетов на усталостную прочность эффективную интенсивность турбулентности I_{eff} рекомендуется определять в соответствии с приложением *К*.

При определении предельных нагрузок I_{eff} рекомендуется принять равной максимальной величине интенсивности турбулентности, обусловленной аэродинамическими следами всех соседних ВЭУ, как определено в приложении *К*.

Можно предположить, что добавленная турбулентность для усталостной прочности и предельных нагрузок является одинаковой.

Как для усталостной прочности, так и для случаев экстремальных нагрузок обычно применяют динамическую модель изгибающегося аэродинамического следа (см. приложение *К*).

ДА.5 Оценка прочих параметров окружающей среды

Следующие параметры окружающей среды должны быть оценены для сравнения с принятыми при проектировании ВЭУ:

- нормальные и экстремальные температурные диапазоны;

- гололед, град и снег;
- влажность;
- грозовая обстановка;
- солнечное излучение;
- химически активные вещества;
- солевой туман.

ДА.6 Оценка сейсмических условий

Для ВЭУ стандартного класса требования по сейсмической устойчивости не формулируются, потому что такие события характерны для незначительного количества районов в мире. Анализ оценки сейсмики не требуется для площадок, уже исключенных применяемыми нормами по сейсмической устойчивости в связи с их слабой сейсмической активностью. Для районов, где сейсмические нагрузки, описанные ниже, являются критическими, должны быть выполнены расчеты, подтверждающие структурную целостность ВЭУ при условиях, соответствующих площадке размещения. Оценка может быть основана на методике, изложенной в приложении *Е*. При расчетах нагрузки сейсмическое нагружение должно быть скомбинировано с другими существенными часто встречающимися эксплуатационными нагрузками.

Сейсмические нагрузки зависят от требований к ускорениям грунта и спектрам реакций, определенных в местных нормах. Если местные нормы отсутствуют или не отражают ускорение грунта или спектр реакций, выполняется надлежащая оценка этих параметров.

Ускорение грунта должно быть определено для 475-летнего периода повторяемости.

Сейсмическое нагружение должно быть сопоставлено с нагружением в процессе эксплуатации, которое должно быть самой большой из:

- средних нагрузок при выработке электроэнергии, определяемых при V_r,
- нагрузок при аварийном выключении при V_r,
- нагрузках при холостом ходе или запаркованном состоянии при отсутствии ветра и V_{out}.

Частный коэффициент безопасности по нагрузкам для всех нагруженных элементов должен быть равен 1,0. Частный коэффициент безопасности по материалам для стали может быть установлен на 1,0.

Оценка сейсмических нагрузок может проводиться методами спектров реакций, в случае которых добавляется эксплуатационная нагрузка с использованием суммы квадратов квадратных корней или эквивалентной комбинации нагрузок, возникающей в результате сейсмического нагружения.

Расчет сейсмических нагрузок может быть выполнен методом спектрально-временных моделей. В этом случае должно быть рассмотрено достаточное количество вариантов для обеспечения репрезентативности рабочей нагрузки, полученной как среднее значение для рассматриваемых интервалов времени.

Число тонов собственных колебаний башни, используемое в любом из вышеназванных расчетов, должно выбираться в соответствии с общепризнанными нормами сейсмической устойчивости. При отсутствии таких норм должен быть рассмотрен последовательный ряд тонов с полной модальной массой 85 % от всей массы.

Оценка сейсмической устойчивости конструкции может допускать только упругую реакцию или вязкое рассеяние энергии. Важно, чтобы последний параметр был оценен правильно для примененного типа конструкции, в особенности для конструкций в виде решетки и выполненных с помощью болтовых соединений.

Спектр реакций ускорения в технологической коренной породе и метод оценки реакций при сейсмических воздействиях описан в приложении Е. Метод спектров реакций не должен использоваться, если существует возможность, что сейсмическая активность приведет к значительному нагружению конструкций помимо башни.

ДА.7 Оценка параметров электрической сети

Условия подключения, определяемые в точке присоединения к сети, анализируют при выполнении работы «Схема выдачи мощности солнечной/ветровой электростанции», результаты которой согласовывают с сетевой организацией и субъектом оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике.

ДА.8 Оценка свойств грунтов

Свойства грунтов на предполагаемой площадке следует определять специализированной организацией, имеющей соответствующую квалификацию, *в соответствии с действующими нормативными документами Российской Федерации*.

ДА.9 Оценка структурной целостности на основе данных измерения параметров ветра

ДА.9.1 Общие требования

Оценка структурной целостности может быть выполнена сравнением величин параметров ветра для площадки размещения с параметрами, использованными при проектировании. Оценку можно выполнять отдельно в отношении соответствия усталостной нагрузки и соответствия предельной нагрузки.

ДА.9.2 Оценка соответствия усталостной нагрузке на основе данных измерения параметров ветра

ВЭУ подходит для площадки в отношении усталостных нагрузок при удовлетворении всех следующих условий.

а) Значение плотности вероятности скорости ветра на высоте оси ветроколеса $p(V_{hub})$ на площадке должно быть менее или равно расчетному значению плотности вероятности для всех значений V_{hub} между скоростями ве-

тра V_{ave} и $2V_{ave}$. Если ВЭУ спроектирована в соответствии с 6.3.2.1 и параметр формы k распределения скорости ветра по Вейбуллу, специфичный для каждой площадки, принят большим или равным 1,4, для k должно выполняться условие:

$$6,5\frac{V_{ave.sait}}{V_{ave.design}} - 4,5 \leq k \leq -6,0\frac{V_{ave.sait}}{V_{ave.design}} + 8,0. \quad \text{(ДА. 4)}$$

Условие (ДА.6) зависит от средней скорости ветра на высоте оси ветроколеса на площадке, скорректированной средней скоростью ветра (см. рисунок ДА.3).

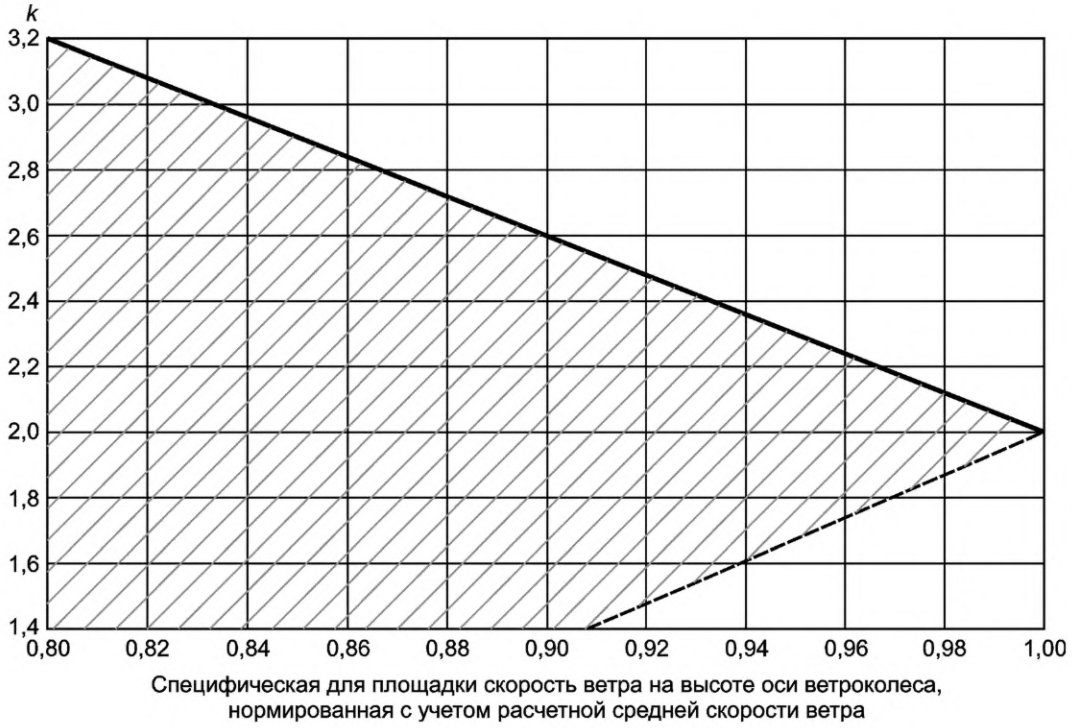


Рисунок ДА.3 — Возможные комбинации скорректированной средней скорости ветра и параметра формы k (затенение)

b) Достаточная оценка интенсивности фоновой турбулентности и влияний аэродинамического следа может быть выполнена посредством проверки того, что среднеквадратическое отклонение скорости ветра σ_1 от нормальной модели турбулентности, используемой в проекте, выше или равно эффективному среднеквадратическому отклонению скорости ветра, т. е. σ_{eff} (см. приложение K) между скоростями ветра V_{ave} и $2V_{ave}$, т. е.

$$\sigma_1 > \hat{\sigma}_{eff} (= I_{eff} V_{hub}). \quad \text{(ДА.5)}$$

Руководство по расчету I_{eff} можно найти в приложении K. В случае сложного ландшафта расчетные 90 % квантиля среднеквадратического отклонения скорости ветра, т. е. $\hat{\sigma}_c$, должны быть увеличены для учета искажения турбулентного потока. Это может быть сделано посредством дополнительного умножения на параметр корректировки структуры турбулентности C_{CT} согласно определению в ДА.2.

c) Угол отклонения потока на площадке, взятый в качестве взвешенной средней величины энергии ветра от всех направлений, должен быть между –8° и +8°. В случае, если сведения о площадке или расчет угла отклонения потока отсутствуют, следует предположить, что угол отклонения потока равен уклону, θ, для 30° сектора в пределах расстояния $5z_{hub}$ или участка $5z_{hub}$, расширенного на $2z_{hub}$ по ветру места ВЭУ от ВЭУ (см. ДА.2).

d) Средневзвешенная величина энергии по всем направлениям ветра и скоростям ветра во время выработки энергии и экспонента вертикального сдвига ветра α должна быть в диапазоне от 0,05 до 0,25. В случае, если имеются сведения на площадке по сдвигу ветра, ее следует рассчитывать с учетом топографии и неровностей окружающего ландшафта.

e) Средняя плотность воздуха на площадке должна быть менее указанной в 6.4.2 для скоростей ветра, больших или равных V_r. В качестве альтернативы, для плотности воздуха большей, чем указанная в 6.4, следует показать, что выполняется следующее условие:

$$p_{design} \cdot V^2_{ave,design} \geq p_{site} \cdot V^2_{ave,site}. \quad (ДА.6)$$

ДА.9.3 Оценка соответствия предельной нагрузки на основе данных измерения параметров ветра

ВЭУ подходит для площадки в отношении предельных нагрузок при удовлетворении следующих условий.

a) Расчетное значение среднеквадратического отклонения скорости ветра, σ_1 [см. формулу (10)] должно быть больше или равно значению около 90 % квантиля на площадке среднеквадратического отклонения скорости ветра при всех значения V_{hub} между скоростями ветра 0,6 V_r и 1,6 V_r, т. е.

$$\sigma_1 \geq \hat{\sigma} + 1{,}28\,\hat{\sigma}_\sigma. \quad (ДА.7)$$

Примечание — Правая сторона уравнения (ДА.7) представляет приближенное выражение 90 %-ного квантиля.

В случае сложного ландшафта ориентировочные 90 % квантиля среднеквадратического отклонения скорости ветра необходимо увеличить для учета искажения турбулентного потока. Это можно выполнить посредством дополнительного умножения на параметр корректировки структуры турбулентности C_{CT} согласно определению в ДА.2.

b) Ориентировочное значение экстремальной средней скорости ветра при 10-минутном интервале V_{50} на высоте оси ветроколеса с периодом повторяемости 50 лет должно быть меньше или равно V_{ref}. И наоборот, центральное ориентировочное значение экстремальной средней скорости ветра при 3-секундном интервале на площадке ВЭУ на высоте оси ветроколеса с периодом повторяемости 50 лет должно быть меньше или равно V_{e50}. Для ВЭУ класса S должна определяться как экстремальная средняя скорость ветра при 3-секундном интервале, так и экстремальная средняя скорость ветра при 10-минутном интервале. Когда коэффициент вариации годовой максимальной скорости ветра больше 15 %, V_{50} должно быть изменено согласно *ГОСТ Р МЭК 61508-6* или *ГОСТ Р МЭК 62061*, используя установленные там методы оценки вероятности отказов, включая нормативные значения для компонентов. Если средняя плотность воздуха на площадке отличается от указанной в 6.4.2, необходимо показать, что применяется следующее условие:

$$p_{design} \cdot V^2_{ref} \geq p_{site} \cdot V^2_{50,hub}. \quad (ДА.8)$$

c) Среднеквадратическое отклонение экстремальной скорости окружающего ветра не превышает модель ЭМТ в 6.3.3.4.

d) В случае влияния аэродинамического следа максимальное среднеквадратическое отклонение скорости ветра в центре аэродинамического следа в самом жестком направлении не превышает модели ЭМТ в 6.3.3.4. В качестве альтернативы можно продемонстрировать, что специфическая для площадки экстремальная турбулентность не превышает модели ЭМТ, используемой для РСН 1.6 в приложении В, и что специфическое для площадки минимальное расстояние внутри ВЭУ не опускается ниже S_{min} из РСН 1.6. Необходимо учитывать определение специфической для площадки турбулентности, специфических для площадки условий, частоты случаев с влиянием аэродинамического следа и планировки ВЭС.

ДА.10 Оценка структурной целостности при воздействии нагрузок, вызванных специфическими особенностями площадки размещения

Демонстрация должна включать сравнение нагрузок и деформаций, рассчитанных для специфических условий площадки ВЭУ с рассчитанными во время проектирования, с учетом резервного запаса и влияния экологии на структурную целостность. Вычисления должны учитывать вариации ветровых условий со средним направлением и скоростью ветра, а также и влияния аэродинамического следа, вертикального сдвига ветра, среднего угла потока ветра и т. п.

В отношении усталостного нагружения для верификации компонентов достаточно сравнения моментов, эквивалентных повреждению, и нагрузки, эквивалентной повреждению при длительном распределении нагрузки крутящего момента. Для предельного нагружения сравнение одновременных нагрузок не требуется.

Структура турбулентности должна базироваться на специфических для площадки значениях. В случае, если сведения о площадке по составляющим турбулентности отсутствуют, а ландшафт является сложным, можно использовать значения соотношений составляющих, присвоенные для каждой категории сложности в ДА.2. В качестве альтернативы, интенсивность продольной турбулентности может быть увеличена за счет коэффициента C_{CT}.

В случае влияний аэродинамического следа необходимо удостовериться, что структурная целостность не нарушена. Это можно выполнить, используя модель аэродинамического следа, пример см. в приложении *K*, с моделью турбулентности, скорректированной под специфические параметры площадки.

Поскольку расчет усталостной нагрузки и l_{eff} (см. приложение *K*) зависят от показателя степени кривой Веллера *m* материала рассматриваемого компонента, нагрузки на структурные элементы с другими свойствами материалов должны быть либо пересчитаны, либо определены с надлежащим значением *m*.

Расчет усталостной нагрузки следует проводить, если не выполняется хотя бы одно из условий, указанных в ДА.9.2.

Расчет предельной прочности следует проводить, если не выполняется хотя бы одно из условий, указанных в ДА.9.3. Как минимум, должны быть определены следующие расчетные случаи предельного нагружения: РСН 1.1, РСН 1.3, РСН 6.1 и РСН 6.2.

Если случаи предельного нагружения адекватны для стандартных классов, проведение дальнейших оценок не требуется.

Приложение В обеспечивает определения для вышеназванных случаев предельного и усталостного нагружения под специфические условия площадки. Если требуется, необходимо учесть другие случаи нагрузок в расчетных случаях 1), 6) и 7) в таблице В.1. Расчетные случаи 2), 3), 4), 5) и 8) в таблице В.1 необходимо учитывать только, когда поведение системы управления и сборка, узел, процедуры техобслуживания и ремонта зависят от площадки.

Приложение ДБ
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте

Таблица ДБ.1

Обозначение ссылочного национального, межгосударственного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование ссылочного международного стандарта
ГОСТ 14254—2015 (IEC 60529:2013)	MOD	IEC 60529:2013 «Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP)»
ГОСТ 18854—2013 (ISO 76:2006)	MOD	ISO 76:2006 «Подшипники качения. Статическая грузоподъемность»
ГОСТ 18855—2013 (ISO 281:2007)	MOD	ISO 281:2007 «Подшипники качения. Динамическая грузоподъемность и номинальный ресурс»
ГОСТ 29322—2014 (IEC 60038:2009)	MOD	IEC 60038:2009 «Напряжения стандартные по МЭК»
ГОСТ 30804.6.2—2013 (IEC 61000-6-2:2005)	MOD	IEC 61000-6-2:2005 «Электромагнитная совместимость. Часть 6-2. Общие стандарты. Помехоустойчивость оборудования, используемого в районах с промышленными предприятиями»
ГОСТ IEC 60034-1—2014	IDT	IEC 60034-1:2010 «Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики»
ГОСТ IEC 60664-3—2015	IDT	IEC 60664-3:2010 «Координация изоляции для оборудования в низковольтных системах. Часть 3. Использование покрытия, герметизации или заливки для защиты от загрязнения»
ГОСТ IEC 61439-1—2013	IDT	IEC 61439-1:2011 «Аппаратура коммутационная и механизмы управления низковольтные комплектные. Часть 1. Общие правила»
ГОСТ IEC 61439-6—2017	IDT	IEC 61439-6:2012 «Устройства комплектные низковольтные распределения и управления. Часть 6. Системы магистральных шинопроводов (шинопроводы)»
ГОСТ Р 50571.5.52—2011/ МЭК 60364-5-52:2009	IDT	IEC 60364-5-52:2009 «Электрические установки зданий. Часть 5-52. Выбор и установка электрооборудования. Системы проводки»
ГОСТ Р 50571.5.54—2013/ МЭК 60364-5-54:2011	IDT	IEC 60364-5-54:2011 «Электроустановки низковольтные. Часть 5-54. Выбор и монтаж электрооборудования. Заземляющие устройства и защитные проводники»
ГОСТ Р 54418.24—2013 (МЭК 61400-24:2010)	MOD	IEC 61400-24:2010 «Установки ветроэнергетические. Часть 24. Защита от молнии»
ГОСТ Р ИСО 2394—2016	IDT	ISO 2394:2015 «Общие принципы обеспечения надежности конструкций»
ГОСТ Р ИСО 12491—2011	IDT	ISO 12491:1997 «Статистические методы контроля качества строительных материалов и изделий»
ГОСТ Р ИСО 12494—2016	IDT	ISO 12494:2001 «Обледенение строительных конструкций в результате атмосферного воздействия»

Окончание таблицы ДБ.1

Обозначение ссылочного национального, межгосударственного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование ссылочного международного стандарта
ГОСТ Р МЭК 60204-1—2007	IDT	IEC 60204-1:2005 «Безопасность машин и механизмов. Электрооборудование промышленных машин. Часть 1. Общие требования»
ГОСТ Р МЭК 60664.1—2012	IDT	IEC 60664-1:2007 «Координация изоляции для оборудования в низковольтных системах. Часть 1. Принципы, требования и испытания»
ГОСТ Р МЭК 61800-4—2012	IDT	IEC 61800-4:2002 «Системы силовых электрических приводов с регулируемой скоростью. Часть 4. Общие требования. Номинальные технические характеристики систем силовых приводов переменного тока свыше 1000 В и не более 35 кВ»
ГОСТ Р МЭК 62305-4—2016	IDT	IEC 62305-4:2010 «Защита от молнии. Часть 4. Электрические и электронные системы внутри конструкций»

Примечание — В настоящей таблице использованы следующие условные обозначения степени соответствия стандартов:

- IDT — идентичные стандарты;
- MOD — модифицированные стандарты.

Приложение ДВ
(справочное)

Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного стандарта

Таблица ДВ.1

Структура настоящего стандарта	Структура международного стандарта МЭК 61400-1:2019
1 Область применения	1 Область применения
2 Нормативные ссылки	2 Нормативные ссылки
3 Термины и определения	3 Термины и определения
4 Обозначения и сокращения	4 Обозначения и сокращения
4.1 Обозначения	4.1 Обозначения и единицы измерения
4.2 Сокращения	4.2 Сокращения
5 Основные положения	5 Основные положения
5.1 Методы проектирования (5.1, 5.2)	5.1 Общие требования
5.2 Безопасность ветроэнергетических установок (5.3)	5.2 Методы проектирования
5.3 Обеспечение качества (5.4)	5.3 Классы безопасности
5.4 Маркировка (5.5)	5.4 Гарантия качества
6 Факторы внешней среды	5.5 Маркировка ВЭУ
6.1 Общие требования	6 Факторы внешней окружающей среды
6.2 Классы безопасности ветроэнергетических установок	6.1 Общие требования
6.3 Режимы ветра	6.2 Классы ВЭУ
6.4 Прочие факторы окружающей среды	6.3 Режимы ветра
6.5 Влияние сети подключения	6.4 Прочие факторы окружающей среды
7 Проектирование конструкции	6.5 Влияние сети подключения
7.1 Общие требования	7 Проектирование конструкции
7.2 Методология проектирования	7.1 Общие требования
7.3 Нагрузки, учитываемые в расчетах	7.2 Методология проектирования
7.4 Проектные ситуации и расчетные случаи нагружения	7.3 Нагрузки
7.5 Расчет нагрузок	7.4 Проектные ситуации и расчетные случаи нагружения
7.6 Расчет предельной прочности	7.5 Расчет нагрузок
8 Система управления	7.6 Расчет предельной прочности
8.1 Общие положения	8 Система управления
8.2 Функции управления	8.1 Общие требования
8.3 Функции защиты	8.2 Функции управления
8.4 Анализ отказов системы управления	8.3 Функции защиты

Продолжение таблицы ДВ.1

Структура настоящего стандарта	Структура международного стандарта МЭК 61400-1:2019
8.5 Ручное управление	8.4 Анализ отказов системы управления
8.6 Функция кнопки аварийного останова	8.5 Ручное управление
8.7 Ручное, автоматическое и дистанционное повторное включение	8.6 Функция кнопки аварийного останова
8.8 Система торможения	8.7 Ручное, автоматическое и дистанционное повторное включение
9 Механические системы	8.8 Система торможения
9.1 Общие требования	9 Механические системы
9.2 Ошибки при сборке	9.1 Общие требования
9.3 Гидравлические или пневматические системы	9.2 Ошибки при сборке
9.4 Главный мультипликатор	9.3 Гидравлические или пневматические системы
9.5 Система установки на ветер	9.4 Главная коробка передач
9.6 Система управления лопастями	9.5 Система установки на ветер
9.7 Аварийные тормоза	9.6 Система управления лопастями
9.8 Подшипники качения	9.7 Механические тормоза функций защиты
10 Электрическая система	9.8 Подшипники качения
10.1 Общие требования	10 Электрическая система
10.2 Общие технические требования к электрической системе	10.1 Общие требования
10.3 Условия среды внутри ветроэнергетических установок	10.2 Общие технические требования к электрической системе
10.4 Защитные устройства	10.3 Условия среды внутри ВЭУ
10.5 Разъединительные устройства	10.4 Защитные устройства
10.6 Система заземления	10.5 Отключение от источника питания
10.7 Молниезащита	10.6 Система заземления
10.8 Проводка	10.7 Молниезащита
10.9 Самовозбуждение	10.8 Электрические кабели
10.10 Защита от электромагнитных импульсных воздействий молнии	10.9 Самовозбуждение
10.11 Качество электроэнергии	10.10 Защита от грозовых электромагнитных импульсов
10.12 Электромагнитная совместимость	10.11 Качество электроэнергии
10.13 Электронные системы и устройства преобразования энергии	10.12 Электромагнитная совместимость
10.14 Петли проводки	10.13 Системы и оборудование силового электронного преобразователя
10.15 Токосъемные кольца	10.14 Сплетенная/конденсатная ловушка
10.16 Проводники и другие компоненты для передачи электроэнергии, расположенные вертикально	10.15 Токосъемные кольца

Продолжение таблицы ДВ.1

Структура настоящего стандарта	Структура международного стандарта МЭК 61400-1:2019
10.17 Электроприводы и двигатели-преобразователи	10.16 Вертикальные кабели и элементы для передачи мощности
10.18 Электрические машины	10.17 Электроприводы и двигатели-преобразователи
10.19 Силовые трансформаторы	10.18 Электрические машины
10.20 Низковольтные комплектные устройства распределения и управления	10.19 Силовые трансформаторы
10.21 Высоковольтные комплектные распределительные устройства	10.20 Устройства комплектные низковольтные распределения и аппаратура управления
10.22 Ступицы	10.21 Устройства комплектные распределительные высокого напряжения
11 Сборка, монтаж и установка (раздел 12)	10.22 Ступицы
11.1 Общие требования (12.1, 12.3)	11 Выбор ВЭУ по условиям соответствия площадке размещения
11.2 Планирование работ (12.2)	11.1 Общие требования
11.3 Доставка на площадку (12.4)	11.2 Оценка топографической сложности площадки и ее влияния на турбулентность
11.4 Параметры окружающей среды (12.5)	11.3 Режимы ветра, требуемые для оценки
11.5 Документация (12.6)	11.4 Оценка влияний возмущений воздушных потоков от соседних ВЭУ
11.6 Перемещение, погрузка, разгрузка и хранение (12.7)	11.5 Оценка прочих параметров окружающей среды
11.7 Фундамент/распорные системы (12.8)	11.6 Оценка сейсмических условий
11.8 Сборка и монтаж (12.3, 12.9, 12.10)	11.7 Оценка параметров электрической сети
11.9 Крепежные соединения (12.11)	11.8 Оценка свойств грунтов
11.10 Краны, лебедки и подъемное оборудование (12.12)	11.9 Оценка структурной целостности на основе данных измерения параметров ветра
12 Ввод в эксплуатацию, эксплуатация и техническое обслуживание (раздел 13)	11.10 Оценка структурной целостности при воздействии нагрузок, вызванных специфическими особенностями площадки размещения
12.1 Общие требования (13.1)	12 Сборка, монтаж и возведение
12.2 Общие требования для осуществления безопасности эксплуатации, проведения осмотров и технического обслуживания (13.2)	12.1 Общие требования
12.3 Инструкции по вводу в эксплуатацию (13.3)	12.2 Планирование
12.4 Руководство по эксплуатации (13.4)	12.3 Условия монтажа
12.5 Руководство по техническому обслуживанию (13.5)	12.4 Доступ к площадке
13 Дополнительные требования к ветроэнергетическим установкам, предназначенным для эксплуатации в зонах с холодным климатом (раздел 14)	12.5 Параметры окружающей среды
13.1 Общие требования (14.1)	12.6 Документация

Продолжение таблицы ДВ.1

Структура настоящего стандарта	Структура международного стандарта МЭК 61400-1:2019
13.2 Условия обледенения и условия низких температур (14.2)	12.7 Поступление, перемещение и хранение
13.3 Факторы внешней среды холодного климата (14.3)	12.8 Фундамент/распорные системы
13.4 Проектирование конструкции (14.4)	12.9 Сборка ВЭУ
13.5 Расчетные случаи и варианты нагружения (14.5)	12.10 Монтаж ВЭУ
13.6 Системы управления (14.6)	12.11 Крепежные соединения
13.7 Механические системы (14.7)	12.12 Краны, лебедки и подъемное оборудование
13.8 Электрические системы (14.8)	13 Ввод в эксплуатацию, эксплуатация и техническое обслуживание
Приложение А Проектные данные для создания ветроэнергетических установок специального класса безопасности (класса S)	13.1 Общие требования
Приложение В Расчетные нагрузки и оценка площадки для размещения ветроэнергетических установок специального класса безопасности (класса S)	13.2 Проектные требования к безопасности эксплуатации, инспекции и технического обслуживания
Приложение С Применение моделей турбулентности	13.3 Инструкции по вводу в эксплуатацию
Приложение D Учет возможного обледенения конструкций при проектировании ветроэнергетических установок (приложение L)	13.4 Руководство по эксплуатации
Приложение Е Расчет сейсмических нагрузок (приложение D)	13.5 Руководство по техническому обслуживанию
Приложение F Статистическая экстраполяция нагрузок для расчета предельной прочности (приложение G)	14 Холодные климатические условия
Приложение G Одновременно действующие нагрузки (приложение I)	14.1 Общие требования
Приложение Н Определение частных коэффициентов безопасности материалов и расчет прочности на основе результатов испытаний (приложение K)	14.2 Условия обледенения и условия низких температур
Приложение I Расчет на усталость по правилу Майнера с экстраполяцией нагрузки (приложение Н)	14.3 Внешние условия для холодного климата
Приложение J Прогнозирование экстремальной скорости ветра с помощью метода Монте-Карло	14.4 Проектирование конструкции
Приложение K Оценка влияния аэродинамического затенения и турбулентности на площадках ветроэнергетических станций (приложение Е)	14.5 Расчетные ситуации и варианты нагружения
Приложение L Прогнозирование распределения ветра для площадок размещения ветроэнергетических установок на основе методов типа «измерение—сопоставление—прогноз» (приложение F)	14.6 Системы управления
Приложение М Ветроэнергетические установки средней мощности	14.7 Механические системы
Приложение ДА Выбор ветроэнергетических установок по условиям соответствия площадке размещения (раздел 11)	14.8 Электрические системы

Окончание таблицы ДВ.1

Структура настоящего стандарта	Структура международного стандарта МЭК 61400-1:2019
Приложение ДБ Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте	Приложение A Проектные параметры для внешних условий
Приложение ДВ Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного стандарта	Приложение B Расчетные нагрузки и оценка пригодности площадки размещения ветроэнергетических установок специального класса безопасности (класса S)
Библиография	Приложение C Модели турбулентности
	Приложение D Расчет сейсмических нагрузок
	Приложение E Оценка влияния аэродинамического затенения и турбулентности на площадках ветроэнергетических станций
	Приложение F Прогнозирование распределения ветра для площадок размещения ветроэнергетических установок на основе методов типа «измерение–сопоставление–прогноз» (ИСП)
	Приложение G Статистическая экстраполяция нагрузок для расчета предельной прочности
	Приложение H Расчет на усталость по правилу Майнера с экстраполяцией нагрузки
	Приложение I Одновременные нагрузки
	Приложение J Прогнозирование экстремальной скорости ветра с помощью метода Монте-Карло
	Приложение K Калибровка коэффициента безопасности конструкционных материалов и расчета прочности при помощи тестирования
	Приложение L Учет возможного обледенения при проектировании ветроэнергетических установок
	Приложение M Ветроэнергетические установки средней мощности
	Библиография
Примечание — После заголовков разделов (подразделов) и приложений настоящего стандарта приведены в скобках номера аналогичных им разделов (подразделов и обозначения приложений) международного стандарта.	

Библиография

[1] МЭК 61400-3-1:2019 Системы ветроэнергетические. Часть 3-1. Требования к проектированию стационарных оффшорных ветроэнергетических установок (Wind energy generation systems — Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines)

[2] *Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об Обеспечении единства измерений»*

[3] *МЭК 61400-3:2009 Установки ветроэнергетические. Часть 3. Требования к проектированию плавучих ветроэнергетических установок (Wind turbines — Part 3: Design requirements for offshore wind turbines)*

[4] *МЭК 60721-2-1:2013 Классификация внешних воздействующих факторов. Часть 2-1. Природные внешние воздействующие факторы. Температура и влажность (Classification of environmental conditions — Part 2-1: Environmental conditions appearing in nature — Temperature and humidity)*

[5] МЭК 61400-13:2015 Установки ветроэнергетические. Часть 13. Измерение механических нагрузок (Wind turbines — Part 13: Measurement of mechanical loads)

[6] *ИСО 4354:2009 Воздействие ветра на сооружения (Wind actions on structures)*

[7] МЭК 61400-6:2020 Системы ветроэнергетические. Часть 6. Требования к проектированию башен и опор (Wind energy generation systems — Part 6: Tower and foundation design requirements

[8] ИСО 13849-2:2012 Безопасность машин. Детали систем управления, связанные с обеспечением безопасности. Часть 2. Валидация (Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 2: Validation)

[9] ИСО 13849-1:2015 Безопасность машин. Детали систем управления, связанные с обеспечением безопасности. Часть 1. Общие принципы проектирования (Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 1: General principles for design)

[10] *ИСО 13850:2015 Безопасность машин. Аварийный останов. Принципы проектирования (Safety of machinery — Emergency stop function — Principles for design)*

[11] *ИСО 6336-2:2019 Расчет допустимой нагрузки прямозубых и косозубых цилиндрических зубчатых передач. Часть 2. Расчет критической выносливости поверхности (выкрашивания) [Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 2: Calculation of surface durability (pitting)]*

[12] *ИСО 6336-3:2019 Расчет допустимой нагрузки прямозубых и косозубых цилиндрических зубчатых передач. Часть 3. Расчет прочности зуба на изгиб (Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 3: Calculation of tooth bending strength)*

[13] *ISO/TS 16281:2008 Подшипники роликовые. Методы расчета модифицированной базовой номинальной долговечности для универсально нагруженных подшипников (Rolling bearings — Methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings)*

[14] *МЭК 60204-11:2018 Безопасность машин. Электрооборудование машин и механизмов. Часть 11. Требования к оборудованию на напряжение свыше 1000 В переменного тока или 1500 В постоянного тока, но не выше 36 кВ (Safety of machinery — Electrical equipment of machines — Part 11: Requirements for equipment for voltages above 1 000 V AC or 1 500 V DC and not exceeding 36 kV)*

[15] *МЭК 60721 (все части) Классификация условий окружающей среды (Classification of environmental conditions)*

[16] *МЭК 60071-1:2019 Координация изоляции. Часть 1. Определения, принципы и правила (Insulation co-ordination — Part 1: Definitions, principles and rules)*

[17] *МЭК 60071-2:2018 Координация изоляции. Часть 2. Руководство по применению (Insulation co-ordination — Part 2: Application guidelines)*

[18] *МЭК 60364 (все части) Электроустановки низковольтные (Low voltage electrical installation)*

[19] *Правила устройства электроустановок: 7-е издание (ПУЭ). С изменениями 2021/Главгосэнергонадзор России. М.: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2022. 610 с.*

[20] МЭК 62305 (все части) Защита от молнии (Protection against lightning)

[21] МЭК 62477-1:2022 *Требования безопасности к силовым электронным преобразовательным системам и оборудованию. Часть 1. Общие положения (Safety requirements for power electronic converter systems and equipment — Part 1: General)*

[22] МЭК 61800-5-1:2022 *Системы силовых электрических приводов с регулируемой скоростью. Часть 5-1. Требования к электрической, термической и энергетической безопасности (Adjustable speed electrical power drive systems — Part 5-1: Safety requirements — Electrical, thermal and energy)*

[23] МЭК 60034 (все части) *Машины электрические вращающиеся (Rotating electrical machines)*

[24] МЭК 61439 (все части) *Устройства комплектные низковольтные распределения и управления (Low-voltage switchgear and controlgear assemblies)*

[25] МЭК 62271 (все части) *Устройства распределительные комплектные высоковольтные (High-voltage switchgear and controlgear)*

[26] *Правила обеспечения работников средствами индивидуальной защиты и смывающими средствами (утверждены приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 766н)*

[27] *Приказ Минэнерго России от 4 октября 2022 г. № 1070 «Об утверждении Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации и о внесении изменений в приказы Минэнерго России от 13 сентября 2018 г. № 757, от 12 июля 2018 г. № 548» (зарегистрировано в Минюсте России 6 декабря 2022 г. № 71384)*

[28] ИСО 2533:1975 *Атмосфера стандартная (От –2 до 32 км идентична стандартным атмосферам ИКАО и ВМО) (Standard Atmosphere)*

[29] Mann, J. The spatial structure of neutral atmospheric surface-layer turbulence. *J. Fluid Mech.* 273: 141–168 (1994)

[30] T. von Karman, Progress in the statistical theory of turbulence. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 34: 530—539 (1948)

[31] Mann, J. Wind field simulation. *Prob. Eng. Mech.* 13(4): 269–282 (1998)

[32] Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y., Cote O.R. Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 98: 563–598 (1972)

[33] *IEA Task 19*, «IEA Wind Recommended Practice 13: Wind energy projects in cold climate,» 2011 Edition

[34] Viterna, D.J. Larry, Theoretical and Experimental Power From Large Horizontal Axis Wind Turbines, NASA, 1982

[35] Lehtomäki, V. et al. Fatigue loads of iced turbines: Two case studies. *Elsevier Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 158; 37—50 (2016)

[36] Rissanen, S. et al. Modelling load and vibrations due to iced turbine operation. *Wind Engineering* 40(3): 293—303 (2016)

[37] Homola, M. et al. The relationship between chord length and rime icing on wind turbines. 2009, Wiley Wind Energy

[38] Homola, M. Atmospheric icing on wind turbines. PhD thesis, Narvik University (2011)

[39] ИСО 3010:2017 *Конструкции строительные. Основы расчета. Сейсмическое воздействие на конструкции (Basis for design of structures — Seismic actions on structures)*

[40] ЕН 1998-1:2004 *Еврокод 8. Проектирование конструкций устойчивых к землетрясениям. Часть 1. Основные правила, сейсмические акции и правила для зданий (Eurocode 8, Design of Structure for Earthquake Resistance; Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings)*

[41] ASCE 7-05, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 2006

[42] BSL, The Building Standard Law of Japan, The building centre of Japan, 2004

[43] AIJ, Architectural Institute of Japan, Seismic Loads Commentary, 2004

[44] IBC, International Building Code, International Code Council, Falls Church, Virginia, 2009

[45] UBC-97, Uniform Building Code, International Conference of Building Officials (ICBO), 1997

[46] Takei, Y., Ishihara, T. Seismic Load Evaluation of Wind Turbine Support Structures Considering High Structural Damping and Additional Mode, *Proc. Of Grand Renewable Energy Conference*, 2014

[47] Witcher, D. Seismic analysis of wind turbines in the time domain, *Wind Energy* 8: 81—91 (2005)

[48] Prowell, I., Elgamal, A., Uang, C.-M., Luco, J.E., Romanowitz, H., Duggan, E. Shake table testing and numerical simulation of a utility-scale wind turbine including operational effects, Wind Energy

[49] *Wind Energy* 11(6) November-December (2008), Special Issue on Design Load Definition

[50] Moriarty, P.J., Holley, W.E., Butterfield, S.P. Extrapolation of Extreme and Fatigue Loads Using Probabilistic Methods, NREL-NWTC, Golden, CO (2004)

[51] Efron, B., Tibshirani, R.J. An Introduction to the Bootstrap, Chapman and Hall, New York (1993)

[52] Hogg, R.V., Craig, A.T. Introduction to Mathematical Statistics, 5th Ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1995)

[53] Hoeffding, W. A Non-Parametric Test of Independence, *The Annals of Mathematical Statistics* 19(4): 546—557 (1948)

[54] Blum, J.R., Kiefer, J., Rosenblatt, M. Distribution Free Tests of Independence based on the Sample Distribution Function, *The Annals of Mathematical Statistics* 32(2): 485—498 (1961)

[55] Fogle, J., Agarwal, P., Manuel, L. Towards an Improved Understanding of Statistical Extrapolation for Wind Turbine Extreme Loads, *Wind Energy* 11(6): 613—635 (2008)

[56] Rosenblatt, M. Remarks on a Multivariate Transformation, *Ann. Math. Stat.* 23: 470—472 (1952).

[57] Saranyasoontorn, K., Manuel, L. Design Loads for Wind Turbines using the Environmental Contour Method, *Journal of Solar Energy Engineering including Wind Energy and Building Energy Conservation*, Transactions of the ASME128(4): 554—561 (2006)

[58] *EH 1990-2002* *Еврокод. Основные положения по проектированию строительных конструкций (Eurocode: Basis of structural design)*

[59] *EH 1993-1-6:2007* *Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-6. Прочность и устойчивость оболочек (Eurocode 3 — Design of steel structures — Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures)*

[60] Dowling, N.E., Fatigue Failure Predictions for Complicated Stress-strain Histories, *J. of Materials* 7(1): 71—87 (1972)

[61] Matsuishi, M., Endo, T. Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress, *Proc. Japan Soc. of Mech. Engrs.* 68(2): 37—40 (1968)

[62] Miner, M.A. Cumulative Damage in Fatigue, *J. of Applied Mech.* 12: A159—A164 (1945)

[63] Moriarty, P.J., Holley, W.E. Using Probabilistic Models in Wind Turbine Design, *Proc. ICASP9*, San Francisco, CA, July 6—9 (2003)

[64] Palmgren, A. Die Lebensdauer von Kugellagern. VDI. Z. 68: 339—341 (1924)

[65] Ishihara, T., Yamaguchi, A. Prediction of the extreme wind speed in mixed climate region by using Monte Carlo simulation and Measure-Correlate-Predict method, *Wind Energy* 18: 171—186 (2015)

[66] Holland, G.J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Monthly Weather Review* 108: 1212—1218 (1980)

[67] Schloemer, R.W. Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee, Florida, *Hydrometeorogical Report* 31 (1954)

[68] Ishihara, T., Siang, K.K., Leong, C.C., Fujino, Y. Wind field model and mixed probability distribution function for typhoon simulation, *Proc. Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*: 412—426 (2005)

[69] Ishihara, T., Hibi, K. Numerical study of turbulent wake flow behind a three-dimensional steep hill, *Wind and Structures* 5 (2-4): 317—328 (2002)

[70] Yasui, H., Ohkuma, T., Marukawa, H., Katagiri, J. Study on evaluation time in typhoon simulation based on Monte Carlo method, *J. Wind Eng. Indust. Aerodyn.* 90: 1529—1540 (2002)

[71] Frandsen S. Turbulence and turbulence generated structural loading in wind turbine clusters, *Risoe report R-1188* (2007)

[72] Larsen, G.C., Madsen, H.Aa., Thomsen, K., Larsen, T.J. Wake meandering — a pragmatic approach. *Wind Energy* 11: 377—395 (2008)

[73] Madsen, H.A., Larsen, G.C., Larsen, T.J., Troldborg, N. Calibration and Validation of the Dynamic Wake Meandering Model for Implementation in an Aeroelastic Code. *J. Sol. Energy Eng.* 132, 4 (2010)

[74] Larsen, T.J., Madsen, H.A., Larsen, G.C., Hansen, K.S. Validation of the Dynamic Wake Meander Model for Loads and Power Production in the Egmond and Zee Wind Farm. *Wind Energy* 16: 605—624 (2013)

[75] National Wind Power and Climatic Research Unit of the University of East Anglia, Prediction of extreme wind speed at wind energy sites, a set of guidelines prepared under ETSU contract W/11/00427/00

[76] Harris, R.I. Gumbel re-visited — a new look at extreme value statistics applied to wind speeds, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 59: 1-22 (1996)

[77] Quarton, D.C. Wind Farms in Hostile Terrain, Final Report, A report prepared under ETSU contract W/43/00501/00/00, July 1999

[78] Harris, R.I. The accuracy of design values predicted from extreme value analysis, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89: 153—164 (2001)

[79] Cook, N.J. The designers guide to wind loading of building structures, Butterworths (1995)

УДК 621.311:006.354 ОКС 27.160

Ключевые слова: установки ветроэнергетические, ветроэлектрические станции, технические требования, проектирование, безопасность

Редактор *Л.В. Коретникова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *М.В. Бучная*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 10.01.2024. Подписано в печать 06.02.2024. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 16,28. Уч.-изд. л. 14,65.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

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

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

gost.e-ecolog.ru