ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 54418.2— 2014 (МЭК 61400-2: 2006)

Возобновляемая энергетика Ветроэнергетика

УСТАНОВКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ

Часть 2

Технические требования к малым ветроэнергетическим установкам

IEC 61400-2:2006
Wind turbines — Part 2: Small wind turbines
(MOD)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2015

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» (ОАО «НИИЭС») на основе собственного аутентичного перевода на русский язык международного стандарта, указанного в пункте 4

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

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 ноября 2014 г. № 1686-ст

4 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к международному стандарту МЭК 61400-2:2006 «Системы турбогенераторные ветровые. Часть 2. Требования к проектированию небольших ветровых турбогенераторов» (IEC 61400-2:2006 Wind turbines — Part 2: Small wind turbines) путем изменения отдельных фраз (слов, значений показателей, ссылок), которые выделены в тексте курсивом.

Внесение указанных технических отклонений направлено на учет особенностей объекта и аспекта стандартизации, характерных для Российской Федерации.

Сведения о соответствии ссылочных национальных стандартов Российской Федерации международным стандартам приведены в дополнительном приложении ДА

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0—2012 (раздел 8). Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном 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

© Стандартинформ, 2015

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

Содержание

1 Область применения . . . 1
2 Нормативные ссылки . . . 1
3 Термины и определения . . . 2
4 Обозначения и сокращения . . . 6
4.1 Обозначения . . . 6
4.2 Индексы . . . 9
4.3 Сокращения . . . 9
5 Основные требования . . . 9
5.1 Общая информация . . . 9
5.2 Метод проектирования . . . 10
5.3 Гарантия качества . . . 11
5.4 Система координат . . . 11
6 Факторы окружающей среды . . . 12
6.1 Основные положения . . . 12
6.2 Классы малых ветроэнергетических установок . . . 12
6.3 Режимы ветра . . . 13
6.4 Факторы окружающей среды . . . 18
6.5 Влияние электрической нагрузки . . . 19
7 Проектирование конструкции малых ветроэнергетических установок . . . 20
7.1 Основные положения . . . 20
7.2 Метод проектирования . . . 20
7.3 Нагрузки и варианты нагрузок . . . 20
7.4 Упрощенный метод расчета . . . 21
7.5 Аэроупругое моделирование . . . 26
7.6 Измерение нагрузок . . . 29
7.7 Расчет напряжения . . . 29
7.8 Испытания на механическую прочность . . . 29
7.9 Анализ предельных значений . . . 30
8 Система управления и защиты . . . 31
8.1 Основные положения для построения системы управления и защиты . . . 31
8.2 Функции системы защиты . . . 31
8.3 Ручное отключение . . . 31
8.4 Отключение малых ветроэнергетических установок для проведения плановых осмотров, технического обслуживания . . . 31
9 Испытания . . . 32
9.1 Основные положения . . . 32
9.2 Испытания для проверки проектных значений . . . 32
9.3 Испытания на нагрузки . . . 33
9.4 Испытания на долговечность . . . 33
9.5 Испытания механических компонентов . . . 35
9.6 Испытания на безопасность и функциональность . . . 36
9.7 Климатические испытания . . . 36
9.8 Испытания электрического оборудования . . . 36
10 Электрическая система . . . 37
10.1 Основные положения . . . 37
10.2 Защитные устройства . . . 37
10.3 Разъединительные устройства . . . 37
10.4 Система заземления . . . 37
10.5 Молниезащита малых ветроэнергетических установок . . . 37
10.6 Электрические кабели . . . 38
10.7 Электрические нагрузки . . . 38
11 Несущие конструкции . . . 39
11.1 Основные положения . . . 39

11.2 Требования динамики . . . 39
11.3 Факторы окружающей среды . . . 39
11.4 Заземление . . . 39
11.5 Фундамент . . . 39
11.6 Предельные проектные нагрузки . . . 39
12 Требования к документации . . . 39
12.1 Основные положения . . . 39
12.2 Установка . . . 39
12.3 Руководство по эксплуатации . . . 40
12.4 Руководство по техническому обслуживанию и осмотру . . . 40
13 Маркировка малых ветроэнергетических установок . . . 42
Приложение А (справочное) Сертификация типа малых ветроэнергетических установок . . . 43
Приложение Б (обязательное) Проектные данные для конструирования малых ветроэнергетических установок класса *S* . . . 45
Приложение В (справочное) Стохастические модели турбулентности . . . 46
Приложение Г (справочное) Детерминированная модель турбулентности . . . 48
Приложение Д (справочное) Коэффициенты безопасности для материалов . . . 49
Приложение Е (справочное) Элементарные уравнения . . . 57
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте . . . 64
Библиография . . . 65

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Возобновляемая энергетика
Ветроэнергетика

УСТАНОВКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ

Часть 2

Технические требования к малым ветроэнергетическим установкам

Renewable power engineering. Wind power engineering. Wind turbines.
Part 2. Design requirements for small wind turbines

Дата введения — 2016—07—01

1 Область применения

Настоящий стандарт содержит требования к обеспечению безопасности, контролю качества, надежности, а также требования, необходимые для обеспечения технической безопасности малых ветроэнергетических установок. Данные требования включают в себя требования к конструктивному исполнению, монтажу, техническому обслуживанию и эксплуатации малых ветроэнергетических установок в нормальных и экстремальных условиях внешней среды.

В настоящем стандарте рассматриваются соответствующие уровни защиты от повреждений, возникающих в процессе эксплуатации.

Настоящий стандарт распространяется на все подсистемы малых ветроэнергетических установок, такие как устройства управления и защиты, электрические и механические системы, несущие конструкции, фундаменты.

Настоящий стандарт распространяется на ветроэнергетические установки малой мощности (малые ветроэнергетические установки, МВЭУ) с ометаемой площадью менее 200 м^2, генерирующие на напряжениях до 1000 В при переменном и 1500 В при постоянном токе.

Настоящий стандарт устанавливает минимальный набор требований, необходимых для выполнения при проектировании малых ветроэнергетических установок и их компонентов, разработке технической документации (конструкторской, технологической, проектной), в т. ч. технических условий.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.1.030—81 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление

ГОСТ 12.2.007.0—75 Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности

ГОСТ 27.002—89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения

ГОСТ 27.301—95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения

ГОСТ 11828—86 Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний

ГОСТ 21130—75 Изделия электротехнические. Зажимы заземляющие и знаки заземления. Конструкция и размеры

ГОСТ ИСО/МЭК 17025—2009 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий

ГОСТ ISO 9000—2011 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь

ГОСТ ISO 9001—2011 Системы менеджмента качества. Требования

ГОСТ IEC 60034-5—2011 Машины электрические вращающиеся. Часть 5. Классификация степеней защиты, обеспечиваемых оболочками вращающихся электрических машин (Код IP)

ГОСТ Р 8.568—97 Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения

Издание официальное

ГОСТ Р 50571.5.54—2011 (МЭК 60364-5-54:2002) Электроустановки низковольтные. Часть 5-54. Выбор и монтаж электрооборудования. Заземляющие устройства, защитные проводники и проводники уравнивания потенциалов

ГОСТ Р 51237—98 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения

ГОСТ Р 51991—2002 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования

ГОСТ Р 52776—2007 (МЭК 60034-1—2004) Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики

ГОСТ Р 54257—2010 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования

ГОСТ Р 54418.1—2012 Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 1. Технические требования

ГОСТ Р 54418.12.1—2011 (МЭК 61400-12-1:2005) Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 12-1. Измерение мощности, вырабатываемой ветроэлектрическими установками

ГОСТ Р 55589—2013 (МЭК 60050-415:1999) Международный электротехнический словарь. Часть 415. Установки ветроэнергетические. Системы генерирования электроэнергии

ГОСТ Р ИСО 9004—2010 Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества

ГОСТ Р ИСО/МЭК 17020—2012 Общие критерии работы различных типов контролирующих органов

ГОСТ Р МЭК 60034-2-1—2009 Машины электрические вращающиеся. Часть 2-1. Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин (за исключением машин для подвижного состава)

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

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

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по *ГОСТ Р 55589*, *ГОСТ Р 51237*, *ГОСТ 27.002*, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **аварийный останов** (для ВЭУ): Остановка ветроэнергетической установки, последовавшая в результате включения системы защиты или вмешательства персонала.

3.2 **автоматическое повторное включение;** АПВ: Процесс, происходящий в течение интервала времени от 0,01 с до нескольких с, в течение которого выключатель, сработавший из-за аварии в системе, автоматически замыкается и происходит подключение к электрической сети.

3.3 **базовая скорость ветра V_{ref}** (для ВЭУ): Основная экстремальная характеристика скорости ветра, используемая для классификации ветроэнергетических установок.

Примечания

1 Прочие климатические параметры, оказывающие влияние на конструкцию ветроэнергетической установки, выводятся из базовой скорости и других основных параметров, определяемых классом принадлежности ветроэнергетической установки.

2 Ветроэнергетические установки, спроектированные в соответствии с требованиями класса ветроэнергетических установок, имеющего установленную базовую скорость, должны выдерживать климатические условия, в которых экстремальная средняя скорость ветра за 10-минутный интервал с периодом повторяемости 50 лет на высоте оси ветроколеса меньше или равна этой базовой скорости.

3.4 **экстремальная скорость ветра**: Величина самой высокой скорости ветра, *усредненной за период t, с, с ежегодной вероятностью превышения 1/N (период повторяемости — N лет).*

Примечание — В настоящем стандарте периоды повторяемости N = 50 лет и N = 1 год и интервалы времени, для которых определяется среднее значение, составляют t = 3 с и t = 10 мин. Часто используется широко известный, но менее точный термин — «скорость выживания». В настоящем стандарте установлены требования к проектированию ветроэнергетических установок с учетом экстремальных скоростей ветра для определения расчетной нагрузки.

3.5 **вектор скорости ветра**: Вектор, указывающий направление движения элементарного объема воздуха, окружающего рассматриваемую точку. Величина вектора равна 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.

3.6 **вертикально-осевая ветроэнергетическая установка**: ветроэнергетическая установка, имеющая вертикально расположенную ось ветроколеса.

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

3.8 **внешние условия** (для ВЭУ): Факторы, оказывающие воздействия на процесс эксплуатации ветроэнергетической установки.

Примечание — Данные факторы включают в себя ветровой режим и прочие климатические факторы (например, снег, гололед), возможность возникновения землетрясения и условия, обусловленные возможностью подключения к сетям.

3.9 **втулка** (для ВЭУ): Устройство, с помощью которого осуществляется фиксация лопастей ветроколеса или их сборочных единиц, на валу ветроколеса.

3.10 **высота оси** (для ВЭУ): Высота центра ометаемой площади ветроколеса ветроэнергетической установки над поверхностью земли.

Примечание — Для ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения высота оси измеряется до экваториальной плоскости.

3.11 **выходная мощность**: Количество энергии определенного вида, вырабатываемой устройством в единицу времени.

Примечание — Для ветроэнергетических установок это вырабатываемая электрическая мощность.

3.12 **гондола**: Помещение, расположенное на верху башни горизонтально-осевой ветроэнергетической установки, в котором находятся различные элементы, например, трансмиссия.

3.13 **горизонтально-осевая ветроэнергетическая установка**: ветроэнергетическая установка, у которой ось ветроколеса расположена вертикально.

3.14 **градиент скорости**: Изменение скорости ветра в плоскости, перпендикулярной направлению ветра.

3.15 **интенсивность турбулентности**: Отношение среднеквадратичной пульсации скорости ветра к средней скорости ветра, определенной из того же самого набора выборок измеренной скорости ветра, которое берется за указанный период.

3.16 **запаркованная ветроэнергетическая установка**: Состояние ветроэнергетической установки, при котором ее ветроагрегат не вращается либо совершает холостой ход (зависит от конструкции ветроэнергетической установки).

3.17 **шероховатость поверхности**: Экстраполированная высота, на которой средняя скорость ветра принимается равной нулю в предположении, что профиль скорости ветра по высоте подчиняется логарифмическому закону.

3.18 **логарифмический закон распределения**: Математическое выражение для предполагаемого изменения скорости ветра по высоте над землей в виде логарифмической функции.

3.19 **максимальная рабочая скорость ветра V_{max}**: Величина самой большой расчетной скорости набегающего устойчивого нетурбулентного ветрового потока, измеренной на высоте оси ветроколеса, при которой ветроэнергетическая установка еще продолжает вырабатывать электрическую энергию.

3.20 **малая ветроэнергетическая установка**: Ветроэнергетическая установка с ометаемой площадью менее 200 м^2, преобразующая кинетическую энергию ветра в электрическую.

3.21 **минимальная рабочая скорость ветра**: Величина самой малой скорости ветра на высоте оси ветроколеса, при которой ветроэнергетическая установка начинает вырабатывать электрическую энергию при устойчивом нетурбулентном набегающем воздушном потоке.

3.22 **направление ветра**: Основное направление движения воздуха.

3.23 **катастрофический отказ** (для ВЭУ): Нарушение конструкционных связей или разрушение элемента конструкции или детали ветроэнергетической установки, которое приводит к потере ее жизненно важных функций и снижению безопасности.

3.24 **нормальное отключение** (для ВЭУ): Выключение ветроэнергетической установки, при котором все его этапы находятся под контролем системы управления.

3.25 **ожидание**: Состояние, в которое возвращается ветроэнергетическая установка после нормального отключения.

3.26 **ометаемая площадь**: Площадь проекции поверхности, которую описывает ветроколесо ветроэнергетической установки за один полный оборот, на плоскость, перпендикулярную направлению ветрового потока.

3.27 **опорная конструкция** (для ВЭУ): Часть ветроэнергетической установки, включающая в себя башню и фундамент.

3.28 **отключение** (для ВЭУ): Промежуточное состояние ветроэнергетической установки между режимом производства электрической энергии и режимом простоя (или холостого хода).

3.29 **плановое обслуживание**: Профилактическое техническое обслуживание, проводимое в соответствии с установленным календарным графиком.

3.30 **порыв ветра**: Внезапное и кратковременное изменение величин скорости ветра по отношению к величине средней скорости ветра.

Примечание — Порыв ветра характеризуется временем нарастания, амплитудой и продолжительностью.

3.31 **предельное рабочее состояние ветроэнергетической установки**: Условия, соответствующие граничным характеристикам процесса нормальной эксплуатации ветроэнергетической установки.

3.32 **предельное состояние ветроэнергетической установки**: Состояние конструкции ветроэнергетической установки и нагрузок, действующих на нее, превышение которых приводит к тому, что конструкция больше не удовлетворяет проектным требованиям.

Примечание — Целью проектных расчетов (т. е. проектных требований для предельного состояния) является обеспечение сохранности при вероятном предельном состоянии, характеристики которого ниже определенного значения, установленного для определенного конструктивного типа (см. *ГОСТ Р 54257*).

3.33 **предполагаемая обстановка**: Возможный режим работы ВЭУ: например, производство электрической энергии, ожидание и т. д.

3.34 **простой** (для ВЭУ): Состояние ветроэнергетической установки, при котором ее ветроагрегат медленно вращается, не производя электрической энергии.

3.35 **против ветра** *(с наветренной стороны)*: В направлении, противоположном преобладающей скорости ветра.

3.36 **противоаварийная защита**: Конструктивная особенность оборудования, обеспечивающая защиту в случае возникновения аварийной ситуации.

3.37 **вертикальный профиль ветра (закон распределения)**: Математическое выражение для предполагаемого изменения скорости ветра по высоте над поверхностью земли.

Примечание — Обычно используемые профили описываются логарифмическими зависимостями (1) или степенными 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;
z — высота над поверхностью земли;
z_r — базовая высота над землей, используемая для построения профиля;
z_0 — параметр шероховатости поверхности;
α — показатель степени функции распределения.

3.38 **установка ветроэнергетической установки на ветер:** Поворот оси ветроколеса относительно вертикальной оси на ветер (только для горизонтально-осевых ветроагрегатов).

3.39 **несовпадение оси ветроколеса с направлением скорости ветра (для ветроколес с горизонтальной осью вращения)**: Отклонение оси вращения ветроколеса в горизонтальной плоскости от направления ветра.

3.40 **распределение скорости ветра**: Вероятностная функция распределения, используемая для описания распределения скоростей ветра за продолжительный период времени.

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

$$P_R(V_0) = 1 - \exp[-\pi(V_0/2\,V_{ave})^2], \quad (3)$$

$$P_W(V_0) = 1 - \exp[-(V_0/C)^k],$$

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

где $P(V_0)$ — совокупная функция вероятности, т. е. вероятность того, что $V < V_0$;
V_0 — предельная скорость ветра;
V_{ave} — среднее значение скорости ветра;
C — масштабный параметр функции Вейбулла;
k — параметр формы функции Вейбулла;
Γ — гамма-функция.

Оба параметра C и k можно определить по результатам измерения данных. Функция Рэлея идентична функции Вейбулла при $k = 2$, а C и V_{ave} удовлетворяют условиям, установленным в (4) при $k = 2$.

Функции распределения выражают совокупную вероятность того, что скорость ветра ниже, чем V_0. Таким образом, разность $(P(V_1) - P(V_2))$, вычисленная для указанных пределов V_1 и V_2, соответствует доле времени, в течение которого скорость ветра остается в этих пределах. Дифференцирование функций распределения дает соответствующие функции плотности вероятности.

3.41 **распределение скорости ветра по Вейбуллу**: Вероятностная функция распределения скорости ветра в соответствии с 3.40, которая зависит от двух параметров: параметра формы, определяющего диапазон разброса значения, и масштабного параметра, определяющего среднюю скорость ветра.

Примечание — См. распределение скорости ветра (3.40).

3.42 **распределение скорости ветра по Рэлею**: Вероятностная функция распределения скорости ветра в соответствии с пунктом 3.40, которая зависит от одного параметра — масштабного параметра, определяющего среднюю скорость ветра.

Примечание — Распределение Рэлея — частный случай распределения Вейбулла (3.41), имеющего второй параметр — параметр формы.

3.43 **расчетная нагрузка**: Сочетание предполагаемой обстановки и внешних условий, определяющих величину нагрузки на конструкцию.

3.44 **расчетная скорость ветра**: Скорость, используемая в качестве исходных данных при простых расчетах, и равная $1{,}4V_0$.

3.45 **проектные пределы**: Набор условий, определяемых проектировщиком ветроэнергетической установки, которые регулируют ее работу.

3.46 **резонанс**: Феномен, возникающий в колебательном контуре, при котором период вынужденных колебаний приближен к периоду собственных колебаний.

3.47 **система защиты** (для ВЭУ): Система защиты, обеспечивающая, что состояние ветроэнергетической установки и ее параметры останутся в пределах, определенных проектом.

3.48 **система разворота**: Пассивная система контроля превышения скорости посредством уменьшения ометаемой площади ветроколесом.

3.49 **система управления** (для ВЭУ): Подсистема, которая получает информацию о состоянии ветроэнергетической установки, ее элементов и/или окружающей ее среды и удерживает ветровую установку в заданных рабочих пределах.

3.50 **абсолютная величина вектора скорости ветра**, *V*: Скорость ветра для заданной точки в пространстве — это скорость движения элементарного количества воздуха, окружающего указанную точку.

Примечание — Скорость ветра — это величина локального вектора скорости ветра (3.5).

3.51 **экологические условия (условия окружающей среды)**: Параметры окружающей среды (скорость ветра, высота размещения, температура, влажность и прочие параметры), которые оказывают влияние на особенности функционирования ветроэнергетической установки.

3.52 **среднегодовая скорость ветра**: Осредненная скорость ветра согласно определению среднегодового значения.

3.53 **среднегодовое значение**: Среднее значение ряда измеренных данных, достаточного объема и продолжительности, служащее для оценки ожидаемой величины рассматриваемого параметра.

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

3.54 **средняя скорость ветра**: Среднестатистическое значение мгновенных значений скорости ветра, осредненных на заданном периоде времени, продолжительность которого может изменяться от нескольких секунд до нескольких и даже десятков лет.

3.55 **срок службы**: Заданный срок эксплуатации ветроэнергетической установки при наличии технического обслуживания и с установленной вероятностью аварийного разрушения.

Пример — Лопасть ветрогенератора — это значимый компонент.

3.56 **степенной закон распределения**: Математический закон, отражающий зависимость вертикального профиля ветра в виде степенной функции.

3.57 **показатель степени функции сдвига ветра** α: Показатель степени функции распределения (см. также 3.38).

3.58 **тормоз** (для ВЭУ): Устройство ветроэнергетической установки, способное снижать скорость вращения ветроколеса или останавливать его вращение.

3.59 **угловая скорость**: Частота изменения угла поворота (степень вращения).

3.60 **нормативное значение (свойство материала)**: Величина, которая с определенной вероятностью не может быть достигнута за неограниченное количество циклов испытаний.

3.61 **холостой ход** (для ВЭУ): Состояние генератора ветроэнергетической установки, при котором он медленно вращается, не производя электрической энергии.

3.62 **частота вращения** (для ВЭУ): Скорость вращения ветроколеса ветроэнергетической установки относительно своей оси.

3.63 **эксплуатационные пределы**: Набор условий, определяемых проектировщиком ВЭУ, которые регулируют работу системы управления и защиты.

4 Обозначения и сокращения

4.1 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

A — площадь поперечного сечения, м^2;

A_{proj} — часть площади, спроецированная на плоскость, параллельную или перпендикулярную к направлению ветра, м^2;

a — параметр, используемый при определении среднеквадратичного отклонения продольной составляющей скорости ветра;

B — число лопастей;
C — масштабный параметр функции Вейбулла, м/с;
C_d — коэффициент аэродинамического сопротивления;
C_f — коэффициент мощности (силы);
C_l — коэффициент подъемной силы;
C_T — коэффициент осевой нагрузки;
C_{oh} — функция когерентности;
D — диаметр ветроколеса, м;
e_r — эксцентриситет — расстояние от центра тяжести ветроколеса до оси вращения, м;
F — сила, Н;
F_{zB} — сила, действующая на основание лопасти в направлении по размаху, Н;
$F_{x\text{-}shaft}$ — осевая нагрузка вала, Н;
f — частота, $с^{-1}$;
f_k — нормативная величина прочности материала;
G — коэффициент короткого замыкания, равный отношению крутящего момента короткого замыкания генератора к номинальному крутящему моменту;
g — ускорение свободного падения, принимаемое равным 9,81 $м/с^2$;
I_B — массовый момент инерции в основании лопасти относительно оси, кг · $м^2$;
I_{15} — расчетное значение интенсивности турбулентности воздушного потока при средней скорости ветра 15 м/с, определенной на 10-минутном интервале на высоте оси ветроколеса;
K — модифицированная функция Бесселя;
k — параметр формы функции распределения Вейбулла;
L — интегральный масштаб изотропной турбулентности, м;
L_{tt} — расстояние между основанием и вершиной башни, м;
L_{rt} — расстояние между осью центра ветроколеса и осью вращения, м;
L_{rb} — расстояние между осью ветроколеса и первым подшипником, м;
L_c — связной масштабный коэффициент, м;
L_k — интегральный масштабный параметр составляющей вектора скорости, м;
M_{xB}, M_{yB} — изгибающий момент на вершине лопасти, Н · м;
M_{brake} — крутящий момент при низкой скорости вала, вызванный работой тормоза, Н · м;
$M_{x\text{-}shaft}$ — крутящий момент на валу ветроколеса в месте расположения первого подшипника, Н · м;
M_{shaft} — суммарный изгибающий момент на валу у первого подшипника (около ветроколеса), Н · м;
M_{tower} — изгибающий момент башни у точки крепления, Н · м;
m_B — масса лопастей, кг;
$m_{overhang}$ — масса башни, кг;
m_r — масса ветроколеса, включающая в себя массу лопастей и массу втулки, кг;
$m_{towertop}$ — масса гондолы и ветроколеса, кг;
$N(.)$ — число циклов до разрушения как функция напряжения (или деформации) для указанного аргумента (т. е. характеристическая кривая S-N);
n — частота вращения ветроколеса, об/мин;
n_i — подсчитанное число усталостных циклов в i выборке нагрузки;
O — коэффициент технического использования ВЭУ, %;
P — электрическая мощность, Вт;
$P_R(V_0)$ — вероятностная функция распределения Рэлея, т. е. вероятность того, что $V < V_0$;
$P_W(V_0)$ — вероятностная функция распределения Вейбулла, т. е. вероятность того, что $V < V_0$;
p — вероятность выживания;
Q — крутящий момент ветроколеса, Н · м;
R — радиус ветроколеса, м;
R_{cog} — расстояние (по радиусу) от центра тяжести лопасти до оси ветроколеса, м;
r — величина проекции вектора разделения, м;
$S_1(f)$ — спектральная плотность энергии продольной составляющей турбулентных пульсаций, $м^2/с$;

S_k — одномерный спектр составляющей вектора скорости, м^2/с;

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

T — собственное значение времени порыва, с;

t — время, с;

T_d — проектный срок службы, с;

T_E — неучтенное время, ч;

T_N — время простоя МВЭУ, ч;

T_T — общее время, затраченное на проведение испытаний, ч;

T_U — неизвестное время, ч;

V — скорость ветра, м/с;

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

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

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

V_{design} — расчетная скорость ветра, м/с;

V_{eN} — ожидаемая экстремальная скорость ветра (средняя за 3 с) с периодом повторяемости N лет. V_{e1} и V_{e50} с периодом повторяемости 1 год и 50 лет соответственно, м/с;

V_{gustN} — наибольшая величина порыва с периодом повторяемости N лет, м/с;

V_{hub} — скорость ветра на высоте оси ветроколеса, осредненная за 10 мин., м/с;

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

$V_{max,shutdown}$ — максимальное значение скорости ветра, при которой происходит нормальное отключение МВЭУ, м/с;

V_0 — предельная величина скорости ветра в модели распределения скорости ветра, м/с;

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

V_{ref} — базовая скорость ветра, осредненная за 10 мин., м/с;

V_{tip} — скорость на вершине лопасти, м/с;

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

W — осевой момент сопротивления, используемый в расчете на прочность, м^3;

x, y, z — координаты системы, использующиеся для описания векторного поля скоростей: вдоль ветра (продольных), поперек ветра (боковых) и по высоте соответственно, м;

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

z_r — базовая высота над уровнем земли, м;

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

α — показатель степени для функции, описывающей профиль ветра;

β — параметр в модели экстремального изменения направления;

Γ — гамма-функция;

γ_f — парциальный коэффициент безопасности по нагрузкам,

γ_m — парциальный коэффициент безопасности для материала;

Δ — множество значений;

$\theta(t)$ — переходный процесс изменения направления ветра, °;

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

θ_{eN} — величина экстремального изменения направления ветра с периодом повторяемости N лет, °;

η — КПД элементов, задействованных в преобразовании энергии (генератора, редуктора, системы преобразования);

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

λ — коэффициент, характеризующий режим работы ветроколеса;

ρ — плотность воздуха, принимаемая 1,225 кг/м^3;

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

σ_2 — среднеквадратичное отклонение нормальной составляющей скорости ветра (дисперсия), м/с;

σ_3 — среднеквадратичное отклонение боковой составляющей скорости ветра (дисперсия) м/с;
σ_d — проектная прочность, МПа;
σ_k — среднеквадратичное отклонение *k* составляющей скорости ветра, м/с;
ω_n — угловая скорость вращения ветроколеса, рад/с;
ω_{yaw} — угловая скорость рыскания.

4.2 Индексы

В настоящем стандарте применены следующие индексы:

ave — средний;

B — лопасть;

design — исходные данные для простых расчетных уравнений;

*e*50 — один раз за 50 лет (осредненная за 3 с);
*e*1 — *один раз за 1 год (осредненная за 3 с)*;
hub — втулка;

max — максимум;

r — ветроколесо;

shaft — вал;

x — направление по оси x;

y — направление по оси y;

z — направление по оси z.

S — специальный класс ветровых (ветроэнергетических) турбин в соответствии со стандартами серии ГОСТ Р 54418.

4.3 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ВК — ветроколесо;
ЭКН — экстремальный когерентный порыв с изменением направления;
ЭКП — экстремальный когерентный порыв;
ЭИН — экстремальное изменение направления ветра;
ЭМС — электромагнитная совместимость;
ЭРП — экстремальный рабочий порыва;
МЭВ — модель экстремальной скорости ветра;
У — усталостное напряжение;
НПВ — модель нормального профиля ветра;
МВЭУ — малая ветроэнергетическая установка;
МНТ — модель нормальной турбулентности;
П — предельные нагрузки;
КЗ — короткое замыкание;
ПСН — проектный случай нагружения.

5 Основные требования

5.1 Общая информация

Технические условия и требования по обеспечению надежности конструкции, механических, электрических систем и систем управления МВЭУ приведены в перечисленных ниже разделах. Данное подробное описание требований относится к проектированию, производству, строительству, руководствам по эксплуатации и техническому обслуживанию МВЭУ и связанному с этим процессу обеспечения качества.

В приложении А приведены рекомендации по использованию настоящего стандарта при сертификации типа МВЭУ.

5.2 Метод проектирования

Алгоритм метода проектирования МВЭУ приведен на рисунке 1. Данный алгоритм может быть применен при проектировании МВЭУ различных конфигураций. Для МВЭУ с площадью ометания менее чем 2 м^2 башня не рассматривается как часть конструкции.

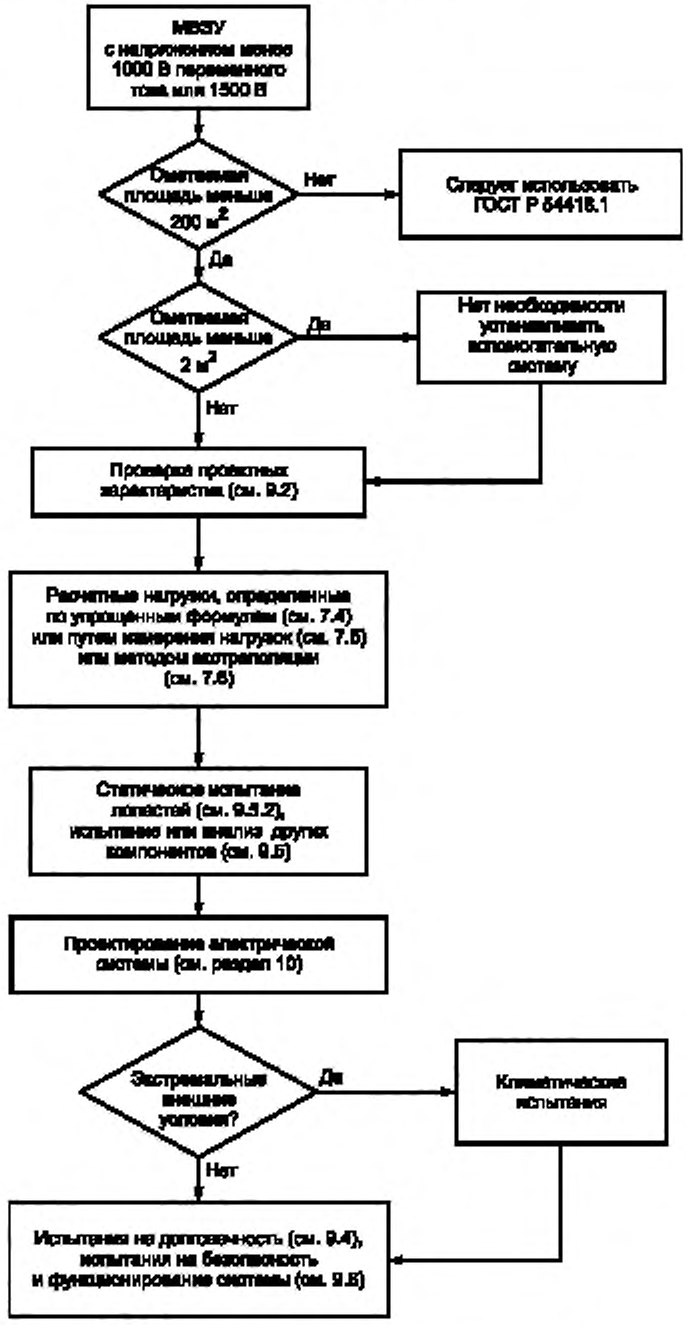


Рисунок 1 — Алгоритм метода проектирования МВЭУ

Первичные данные МВЭУ получают при проведении испытаний, в ходе которых проверяют достижение проектных характеристик (см. 9.2), после чего значения прогнозируемых расчетных нагрузок получают путем применения одного из методов или их комбинацией:

- упрощенный метод применяют для некоторых конфигураций МВЭУ, которые приведены в 7.4. Примеры вариантов нагрузок, формулы для их расчета и данные по внешним условиям приведены в 7.4;
- модель динамической прочности в сочетании с испытаниями, в ходе которых проверяют достижение проектных характеристик, и ограниченного числа измерений нагрузки для проверки модели. Данная модель должна быть использована для определения нагрузок, возникающих под воздействием ветра в заданном диапазоне скоростей, должна учитывать турбулентность воздушного потока, прочие характеристики ветра, приведенные в 6.3, и проектные состояния конструкций, приведенные в 7.5. Должны быть рассмотрены все характерные комбинации внешних воздействий и проектных состояний. Минимальный набор таких комбинаций определен в настоящем стандарте как варианты нагружения;
- проведение полномасштабных испытаний нагрузок в сочетании с экстраполяцией измеренных значений.

Расчет нагрузок по вышеперечисленным методам выполняется с некоторой погрешностью. В методах расчета нагрузок (см. 7.8) следует учитывать коэффициенты прочности.

Для всех агрегатов необходимо проводить статические испытания лопастей (см. 9.5). Результаты испытаний допускается использовать вместо расчетов для подтверждения прочности конструкции МВЭУ и ее компонентов.

Условия испытаний должны отражать расчетную нагрузку, включая соответствующие коэффициенты безопасности.

Для всех МВЭУ должны быть проведены испытания на безопасность и функциональность (см. 9.6), а также испытание на долговечность.

5.3 Гарантия качества

Качество МВЭУ является интегральным показателем и обеспечивается на этапах проектирования, закупок, производства, поставки, возведения, эксплуатации и технического обслуживания как МВЭУ, так и всех ее компонентов.

Система обеспечения качества должна соответствовать требованиям ГОСТ ISO 9001 и ГОСТ Р ИСО 9004.

5.4 Система координат

Для определения направлений нагрузок используется система координат, представленная на рисунке 2.

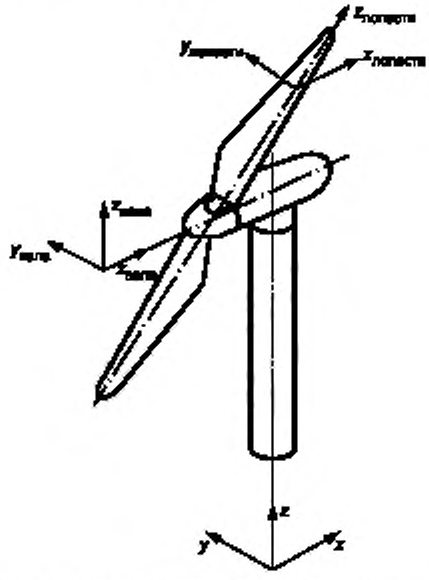


Рисунок 2 — Определение систем координат для компонентов горизонтально-осевой ВЭУ

Башня: ось *x* направлена по направлению ветра, ось *z* направлена вверх, а ось *y* направлена, как в правосторонней системе координат. Система координат для башни не меняется во времени.

Вал: направление оси *x* выбирается таким образом, чтобы положительный момент оси совпадал с направлением вращения ветроколеса. Оси *y* и *z* отдельно не используются, рассматривается только их общий момент. Система координат для оси вала вращается вместе с гондолой.

Лопасть: ось *x* следует располагать таким образом, чтобы ее момент совпадал с направлением вращения ветроколеса. Ось *y* направлена, чтобы момент оси совпадал с изгибающим моментом на вершине лопасти. Ось *z* направлена к вершине лопасти. Система координат для лопастей является правосторонней, если вращение ветроколеса происходит по часовой стрелке, и левосторонней, если вращение ветроколеса происходит против часовой стрелки. Система координат для лопастей вращается вместе с ветроколесом.

6 Факторы окружающей среды

6.1 Основные положения

На МВЭУ воздействуют факторы окружающей среды и электрические нагрузки, которые влияют на процессы нагружения элементов конструкции и отражаются на сроке службы и процессе ее эксплуатации. Для обеспечения надлежащего уровня надежности и безопасности в процессе проектирования необходимо учесть факторы окружающей среды, режимы электрических нагрузок и характеристики грунтов, которые должны быть детально изложены в проектной документации.

Факторы окружающей среды подразделяются на режимы ветра и прочие факторы. Электрические режимы обусловлены режимами сети подключения или параметрами локальной (или автономной) электрической нагрузки, например, аккумуляторных батарей, гибридной энергосистемы или местной электросети. Характеристики грунтов учитываются при проектировании фундаментов МВЭУ.

Прочность конструкции МВЭУ в первую очередь зависит от режимов ветра. Прочие факторы окружающей среды также влияют на конструктивные особенности МВЭУ, такие как функции системы управления, срок службы, процессы коррозии и т. д.

Каждый вид факторов окружающей среды подразделяется на нормальный и экстремальный. Нормальные факторы главным образом затрагивают процессы повторно-периодического нагружения элементов конструкции, в то время как экстремальные факторы представляют редкие проектные состояния. Проектные случаи нагружения должны состоять из комбинации факторов окружающей среды с режимами эксплуатации МВЭУ.

6.2 Классы малых ветроэнергетических установок

Факторы окружающей среды, которые должны быть рассмотрены при проектировании МВЭУ, зависят от предполагаемой площадки размещения или типа площадки для установки МВЭУ.

Классы МВЭУ определяются скоростью ветра и параметрами турбулентности.

Приведенная в настоящем стандарте классификация МВЭУ учитывает большинство случаев, возникающих в практике проектирования. Значения скоростей ветра и параметров турбулентности, приведенные в таблице 1, являются базовыми для группового описания площадок, соответствующих каждому классу МВЭУ.

Определение принадлежности МВЭУ к определенному классу осуществляется в соответствии с проектными интервалами скоростей ветра и параметрами турбулентности. В таблице 1 представлены величины базовых параметров, которые определяют принадлежность МВЭУ к определенному классу (I, II, III, IV или S). Каждый класс ветроагрегатов применим для различных площадок, имеющих скорости ветра и параметры турбулентности, соответствующие значениям рассматриваемого класса.

В случае, если выявлено, например, наличие более жестких режимов ветра или других параметров внешней среды, чем это предусмотрено в таблице 1, или требуется обеспечение специальных условий безопасности, необходимо назначить класс *S*.

Проектные параметры МВЭУ класса *S* должны быть выбраны проектировщиком и представлены в проектной документации. Для таких случаев величины параметров, выбранные для проектирования МВЭУ, должны быть более жесткими, чем ожидаемые параметры внешней окружающей среды при эксплуатации МВЭУ.

МВЭУ, имеющие параметры в соответствии с классами I, II, III и IV, не предназначены для размещения в прибрежной зоне или в зонах тропических штормов, ураганов, циклонов и тайфунов. Для перечисленных условий должны быть использованы МВЭУ класса *S*.

Таблица 1 — Базовые параметры классов МВЭУ

Класс МВЭУ	I	II	III	IV	S
V_{ref} (м/с)	50	42,5	37,5	30	Значения расчетных параметров назначаются проектировщиком
V_{ave} (м/с)	10	8,5	7,5	6	
I_{15}	0,18	0,18	0,18	0,18	
a	2	2	2	2	

Примечание — Значения расчетных параметров приведены к оси ветроколеса; I_{15} — расчетное значение интенсивности турбулентности воздушного потока при средней скорости 15 м/с; a — безразмерный параметр, используемый в формуле (7)

Для полной характеристики внешних условий, используемых при проектировании МВЭУ нормальных классов (в соответствии с таблицей 1 от I до IV), должны быть дополнительно использованы расчетные параметры, величины которых установлены в 6.3, 6.4 и 6.5.

Сокращения, приведенные в *наименованиях подпунктов 6.3.2.2, 6.3.2.3, 6.3.3.2—6.3.3.6*, используются для описания режимов ветра для проектных случаев нагружения, определенных в 7.5.

Примечание — При расчете нагрузки по простым формулам ветровые условия упрощены.

Для МВЭУ класса *S* производитель в проектной документации должен привести описание примененных моделей и указать величины проектных параметров. Если приняты модели, описанные в разделе 6 настоящего стандарта, то достаточно указать величины параметров. Проектная документация МВЭУ класса *S* должна содержать данные, приведенные в приложении Б.

Проектный срок службы должен быть указан в проектной документации.

6.3 Режимы ветра

6.3.1 Общие требования

МВЭУ должна обеспечивать надежное и безопасное функционирование при режимах ветра, соответствующих выбранному классу. Расчетные параметры режимов ветра должны быть подробно представлены в проектной документации. Режимы ветра для обеспечения безопасности и определения силового воздействия на элементы конструкции МВЭУ разделяются на нормальные режимы, которые часто случаются в течение нормальной эксплуатации МВЭУ, и экстремальные режимы, которые имеют периоды повторяемости один год и 50 лет.

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.

6.3.2 Нормальные режимы ветра

6.3.2.1 Модель распределения скорости ветра

Выбор модели распределения скорости ветра оказывает существенное влияние на проектирование МВЭУ, потому что определяет частоту изменения нагрузок, действующих на элементы конструкции в нормальных проектных состояниях. Средняя величина скорости ветра на высоте оси ветроколеса, определенная на 10-минутном интервале, определена в соответствии с распределением Рэлея.

В этом случае вероятность распределения скорости ветра на высоте оси ветроколеса будет иметь вид:

$$P_R = (V_{hub}) = 1 - \exp\left[-\pi\left(\frac{V_{hub}}{2V_{ave}}\right)^2\right], \quad (5)$$

где V_{hub} — скорость набегающего воздушного потока на высоте оси ветроколеса (для МВЭУ с горизонтальной осью вращения), м/с;

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

6.3.2.2 Модель нормального профиля ветра (НПВ)

В модели нормального профиля ветра профиль ветра, $V(z)$, м/с, определяет среднюю скорость ветра как функцию высоты z, м, над уровнем земли. Для стандартных классов МВЭУ нормальную скорость ветра определяют из уравнения:

$$V(z)-V_{hub}\left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{\alpha}, \tag{6}$$

где показатель степени α принимается равным 0,2.

Принятая модель профиля ветра используется для определения среднего вертикального сдвига ветра по нормали к плоскости, ометаемой ветроколесом.

6.3.2.3 Модель нормальной турбулентности (МНТ)

Модель нормальной турбулентности должна включать в себя сдвиг ветра в соответствии с моделью нормального профиля ветра. Под турбулентностью понимают среднюю величину случайных изменений скорости ветра в течение 10 мин. Модель турбулентности должна учитывать изменения скорости ветра, сдвиги ветра и их направления.

Для нормальных классов МВЭУ спектральная плотность мощности векторного поля скоростей ветра, используемая в модели турбулентности, должна удовлетворять следующим условиям:

а) среднеквадратичное отклонение продольной составляющей скорости ветра выражается зависимостью:

$$\sigma_1 = I_{15}\frac{(15+aV_{hub})}{(a+1)}, \tag{7}$$

где I_{15} — для разных классов приведены в таблице 1. Характерные зависимости для стандартного отклонения σ_1, м/с, и интенсивности турбулентности $\frac{\sigma_1}{V_{hub}}$ показаны на рисунке 3.

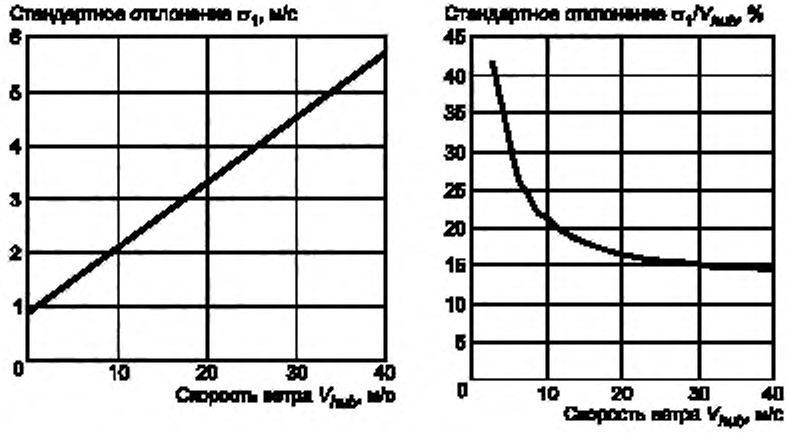


Рисунок 3 — Стандартные отклонения и интенсивность турбулентности в МНТ

б) спектральная плотность энергии продольной составляющей турбулентности, $S_1(f)$, в высокочастотной зоне инерционной области должна быть приближена к зависимости:

$$S_1(f)=0{,}05(\sigma_1)^2\left(\frac{\Lambda_1}{V_{hub}}\right)^{\frac{2}{3}} f^{-\frac{5}{3}}. \tag{8}$$

Продольный масштаб турбулентности воздушного потока Λ_1 на высоте оси ветроколеса Z выражают зависимостью:

$$\begin{cases} 0{,}7\ z_{hub} \text{ при } z_{hub} \le 30 \text{ м} \\ 21 \text{ м при } z_{hub} \ge 30 \text{ м} \end{cases} \tag{9}$$

Описание моделей для турбулентности в потоке со сдвигом приведено в приложении В. Использование других моделей требует обоснования, поскольку выбор модели существенно влияет на величину проектных нагрузок (см. приложение Г).

6.3.3 Экстремальные режимы ветра

6.3.3.1 Общие сведения

Экстремальные режимы ветра используют для определения экстремальных нагрузок на МВЭУ. Эти режимы включают в себя как пиковые скорости ветра при шторме, так и быстрые изменения скорости и направления ветра.

6.3.3.2 Модель экстремальной скорости ветра (МЭВ)

Для стандартных классов МВЭУ экстремальную скорость ветра, V_{e50}, м/с, с периодом повторяемости 50 лет, и экстремальную скорость ветра, V_{e1}, м/с, с периодом повторяемости один год определяют по формулам:

$$V_{e50}(z) = 1{,}4V_{ref}\left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{0{,}11}, \tag{10}$$

$$V_{e1} = 0{,}75V_{e50}. \tag{11}$$

Поправка (± 15)° на кратковременные отклонения воздушного потока от среднего направления может не учитываться.

6.3.3.3 Экстремальный рабочий порыв ветра (ЭРП)

Величина скорости порыва ветра на высоте оси ветроколеса, V_{gustN}, м/с, с периодом повторяемости N лет для стандартного класса МВЭУ определяют по формуле:

$$V_{gustN} = \beta\left(\frac{\sigma_1}{1+0{,}1\left(\frac{D}{\Lambda_1}\right)}\right), \tag{12}$$

где σ_1 — стандартное отклонение в соответствии с формулой (7);
Λ_1 — масштаб турбулентности в соответствии с формулой (9);
D — диаметр ветроколеса;
β — параметр, принимаемый равным 4,8 для периода повторяемости один год и 6,4 для периода повторяемости 50 лет.

Скорость ветра с периодом повторяемости N лет определяют по формуле:

$$V(t) = \begin{cases} V(z) - 0{,}37V_{e50}\sin\left(\frac{3\pi t}{T}\right)\left[1-\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right], \text{ при } 0 \le t \le T \\ V(z) \text{ при } t < 0 \text{ и } t > T \end{cases}, \tag{13}$$

где $V(z)$ определяют по формуле (6);
T = 10,5 с — для периода повторяемости один год;
T = 14,0 с — для периода повторяемости 50 лет.

Пример экстремального рабочего порыва (N = 1, V_{hub} = 25 м/с) приведен на рисунке 4.

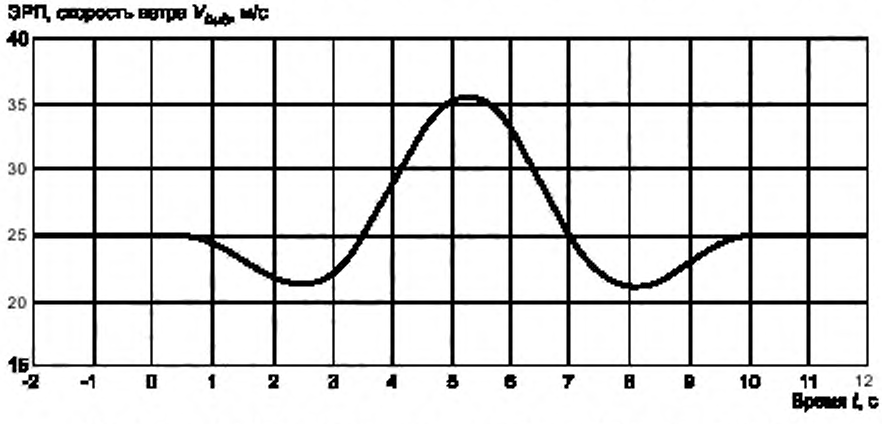


Рисунок 4 — Пример экстремального рабочего порыва (N = 1, V_{hub} = 25 м/с)

6.3.3.4 Экстремальное изменение направления ветра (ЭИН)

Величину ЭИН ветра, θ_{eN}, град, с периодом повторяемости N лет определяют по формуле:

$$\theta_{eN}(t) = \pm\beta \arctan\left(\frac{\sigma_1}{V_{hub}\left(1+0{,}1\left(\frac{D}{\Lambda_1}\right)\right)}\right), \quad (14)$$

где θ_{eN} ограничен интервалом (± 180)°, град;

Λ_1 — масштаб турбулентности в соответствии с выражением (9);

D — диаметр ветроколеса;

β — параметр, принимаемый равным 4,8 для периода повторяемости один год и 6,4 для периода повторяемости 50 лет.

Переходный участок процесса экстремального изменения направления с периодом повторяемости N лет, $\theta_N(t)$, град, определяют согласно следующему выражению:

$$\theta_{eN}(t) = \begin{cases} 0 & \text{для } t < 0 \\ 0{,}50_{eN}(1 - \cos(\pi t/T) & \text{для } 0 \le t < T, \\ \theta_{eN} & \text{для } t > T \end{cases} \quad (15)$$

где T = 6 с — продолжительность процесса экстремального изменения направления. Знак необходимо выбирать таким образом, чтобы на переходном участке возникла ситуация наихудшего нагружения. Предполагается, что в конце процесса изменения направления оно остается неизменным.

На рисунке 5 показан пример экстремальной величины изменения направления ветра с периодом повторяемости 50 лет для ветроколеса диаметром D = 5 м с высотой оси 20 м для различных значений V_{hub}. Соответствующий переходный процесс для V_{hub} = 25 м/с приведен на рисунке 6.

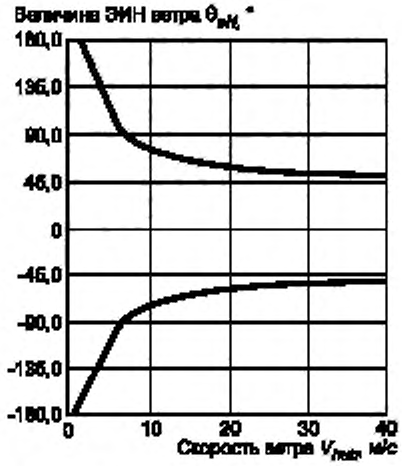


Рисунок 5 — Пример экстремальной величины изменения направления (N = 50, D = 5 м, z_{hub} = 20 м)

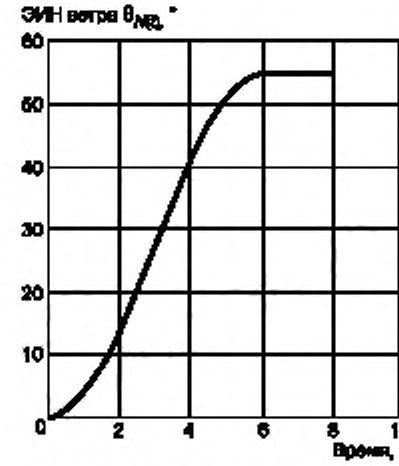


Рисунок 6 — Пример ЭИН ветра (N = 50, V_{hub} = 25 м/с)

6.3.3.5 Экстремальный когерентный порыв ветра (ЭКП)

Для стандартного класса МВЭУ величина ЭКП ветра с изменением направления ветра должна быть принята V_{cg} =15 м/с.

Скорость ветра определяют по формуле:

$$V(z,t) = \begin{cases} V(z) & \text{для } t \le 0 \\ V(z) + 0{,}5V_{cg}\left[1-\cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)\right] & \text{для } 0 \le t \le T, \\ V(z) + V_{cg} & \text{для } t \ge T \end{cases} \quad (16)$$

где T = 10 с — время нарастания порыва ветра и скорость ветра $V(z)$ определяют в соответствии с моделью нормального профиля скорости ветра [см. формулу (6)]. Нарастание скорости ветра в течение ЭКГ ветра показано на рисунке 7 для V_{hub} = 25 м/с.

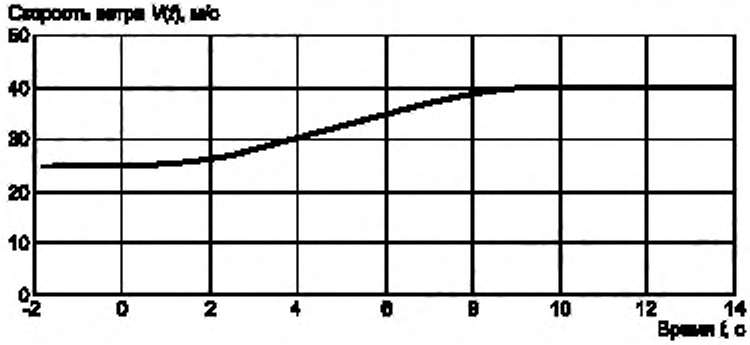


Рисунок 7 — Пример ЭГП ветра (V_{hub} = 25 м/с)

6.3.3.6 Экстремальный когерентный порыв с изменением направления ветра (ЭКН)

Предполагается, что нарастание скорости ветра (см. рисунок 7) происходит одновременно с изменением направления ветра от 0° до θ_{cg}, град. Величину θ_{cg}, град, определяют по формуле:

$$\theta_{cg}(V_{hub}) = \begin{cases} 180^\circ \text{ для } V_{hub} < 4 \text{ м/с} \\ \frac{720^\circ}{V_{hub}} \text{ для } 4 \text{ м/с} \le V_{hub} \le V_{ref} \end{cases}. \quad (17)$$

Одновременное изменение направления определяют по формуле:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0^\circ & \text{для } t \le 0 \\ \pm 0{,}5\theta_{cg}\left[1-\cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)\right] & \text{для } 0 \le t \le T, \\ \pm\theta_{cg} & \text{для } t \ge T \end{cases} \quad (18)$$

где T =10 с — время нарастания скорости ветра. В расчетах используют модель нормального профиля скорости ветра.

Величина изменения направления θ_{cg} и процесс изменения направления $\theta(t)$ показаны в зависимости от V_{hub} и в функции времени для V_{hub} = 25 м/с на рисунках 8 и 9 соответственно.

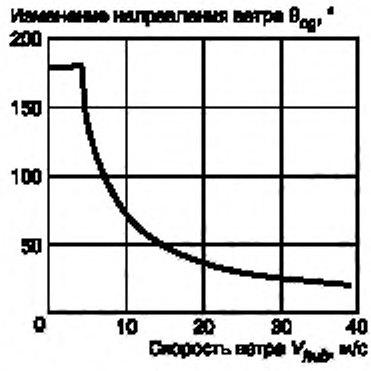


Рисунок 8 — Изменение направления ветра для ЭКН

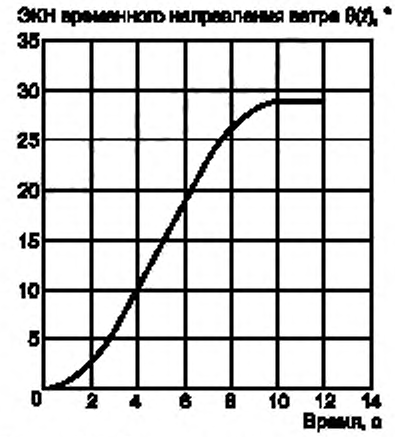


Рисунок 9 — Пример переходного процесса изменения направления ветра (V_{hub} = 25 м/с)

6.4 Факторы окружающей среды

6.4.1 Общая информация

Факторы окружающей среды влияют на целостность конструкции МВЭУ и ее безопасность. К числу таких факторов относятся температурное, фотохимическое, коррозионное, механическое, электрическое и прочие физические и физико-химические воздействия. Комбинация перечисленных факторов может увеличивать результирующее воздействие.

Меры по снижению воздействия факторов окружающей среды должны быть отражены в проектной документации. Следующие факторы окружающей среды должны быть учтены при проектировании:

- перепады температур;
- влажность;
- плотность воздуха;
- солнечная радиация;
- атмосферные осадки (дождь, град, снег и лед);
- химически активные вещества;
- запыленность атмосферы (механические частицы);
- молния;
- сейсмические процессы;
- соленость воды.

В случае необходимости данный перечень может быть расширен.

Для морских прибрежных МВЭУ факторы окружающей среды требуют дополнительного рассмотрения.

Климатические факторы, используемые при проектировании, должны быть представлены в виде конкретных величин, параметров или указаны пределы их допустимого изменения.

При проектировании МВЭУ должна быть также учтена вероятность одновременного воздействия нескольких из перечисленных выше факторов.

Изменения климатических факторов в допустимых пределах, соответствующих периоду повторяемости один год, не должны вызывать нарушений нормального процесса эксплуатации МВЭУ.

Экстремальные факторы окружающей среды в соответствии с 6.4.3 должны быть скомбинированы с факторами нормального режима ветра в соответствии с 6.3.2.

6.4.2 Нормальные факторы окружающей среды

Нормальные факторы окружающей среды, которые должны быть учтены при проектировании, имеют следующие величины:

- интервал нормальных рабочих температур от минус 10 до 40 °С;
- относительная влажность воздуха до 95 %;
- чистота атмосферы соответствует незагрязненной атмосфере над сушей в соответствии с *ГОСТ Р 51991*;

- интенсивность солнечной радиации 1000 Вт/м^2;
- плотность атмосферного воздуха 1,225 кг/м^3.

Примечание — В международной практике вместо ГОСТ Р 51991 применяют [2].

Если проектировщик указывает дополнительные внешние факторы, то параметры и их величины должны быть отражены в проектной документации и соответствовать требованиям *ГОСТ Р 51991*.

6.4.3 Экстремальные факторы окружающей среды

6.4.3.1 Основные положения

При проектировании МВЭУ должны быть учтены следующие экстремальные факторы окружающей среды: экстремальные перепады температур, гроза, обледенение и сейсмические процессы.

6.4.3.2 Экстремальные перепады температур

Для стандартных классов МВЭУ проектными значениями экстремальных перепадов температур являются интервалы как минимум от минус 20 до 50 °С.

6.4.3.3 Молниезащита малых ветроэнергетических установок

Условия защиты от грозовых разрядов, приведенные в 10.5, являются достаточными для МВЭУ нормального класса безопасности.

6.4.3.4 Гололед

Для МВЭУ нормального класса данное условие не рассматривается.

Расчет нагрузки ото льда производится на всех открытых участках компонентов МВЭУ. Рекомендуется при расчетах нагрузок ото льда принимать толщину льда 30 мм и плотность 900 кг/м^3. Данная статическая ледовая нагрузка должна складываться с нагрузкой лобового сопротивления на парковочную систему турбины при $3V_{ave}$.

При расчете нагружения на несущую конструкцию МВЭУ следует учитывать нагрузку ото льда.

6.4.3.5 Учет сейсмичности площадки

Для МВЭУ нормального класса данное условие не рассматривается.

6.5 Влияние электрической нагрузки

6.5.1 Основные положения

При проектировании МВЭУ следует учитывать влияние вида электрического соединения (электрическая сеть, аккумуляторные батареи, локальная (местная) сеть и т. д.).

6.5.2 Тип электрического соединения

6.5.2.1 Нормальные условия

При проектировании МВЭУ должны быть рассмотрены нормальные условия, изменяющиеся в следующих пределах:

- напряжение — допускается отклонение от номинального значения в пределах (± 10) % (*в соответствии с [3]*);
- частота — допускается отклонение от номинального значения в пределах (± 2) %;
- асимметрия напряжений — изменение составляющей обратной последовательности фаз по отношению к составляющей прямой последовательности фаз не должно превышать 2 %;
- циклы автоматического повторного включения — период цикла первого автоматического повторного включения от 0,2 до 5 с, второго — от 10 до 90 с;
- простои — количество отключений от сети — следует принять равным 20 ч в год. Нормальным следует считать отключение до 24 ч.

6.5.2.2 Экстремальные условия

При проектировании МВЭУ должны быть учтены экстремальные условия, которые должны находиться в следующих пределах:

- напряжение — допускается отклонение от номинального значения в пределах (± 20) %;
- частота — допускается отклонение от номинального значения в пределах (± 10) %;
- асимметрия напряжений — изменение составляющей обратной последовательности фаз по отношению к составляющей прямой последовательности фаз не должно превышать 15 %;
- отключения с периодом повторяемости один раз в неделю.

6.5.3 Влияние местной нагрузки (или локальной сети)

6.5.3.1 Аккумуляторные батареи

МВЭУ должна работать во всем диапазоне напряжения аккумуляторных батарей: диапазон напряжения — от минус 15 до 30 % от номинального напряжения (например, 12 В, 24 В, 36 В и т. д.) на 5 % выше и ниже настроек контроллера заряда.

6.5.3.2 Местная (локальная) сеть

Параметры подключенной к местной (локальной) сети МВЭУ, являющиеся нормальными, должны находиться в следующих пределах:

- напряжение — номинальное значение (± 15) %;
- частота — номинальное значение (± 5) Гц.

7 Проектирование конструкции малых ветроэнергетических установок

7.1 Основные положения

При проектировании конструкции МВЭУ должны быть обеспечены требуемый уровень безопасности, целостность конструкции и прочность ее несущих элементов в заданном диапазоне нагрузок. Для подтверждения конструктивной целостности МВЭУ и обеспечения заданного уровня ее надежности должна быть проверена расчетами и/или испытаниями предельная и усталостная прочности элементов конструкции.

При расчете конструкций следует учитывать требования ГОСТ 27.301.

Примечание — В международной практике при расчете конструкций применяют [1].

7.2 Метод проектирования

Верификацию проектных данных конструкции МВЭУ рекомендуется выполнять расчетами и/или испытаниями.

Существуют три метода определения проектных нагрузок на МВЭУ:

- упрощенный метод (см. 7.4);
- аэроупругое моделирование (см. 7.5);
- испытания на механическую прочность (см. 7.6).

7.3 Нагрузки и варианты нагрузок

Нагрузки, описанные в *7.3.1—7.3.5*, должны быть рассмотрены при проектировании.

7.3.1 Гравитационные и инерционные нагрузки

Гравитационные и инерционные нагрузки — это статические и динамические нагрузки, действующие на элементы конструкции МВЭУ и возникающие в результате вибрации, вращения, действия силы тяжести и сейсмической активности (или движения опорной конструкции).

Особое внимание следует обратить на вибрацию самой МВЭУ.

7.3.2 Аэродинамические нагрузки

Аэродинамические нагрузки — это статические и динамические нагрузки, которые вызваны обтеканием воздушным потоком подвижных и неподвижных частей МВЭУ (в т. ч. башни и фундамента) и силовым взаимодействием воздушного потока с ними.

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

7.3.3 Эксплуатационные нагрузки

Эксплуатационные нагрузки возникают в процессе работы МВЭУ вследствие управляющих воздействий на элементы и системы МВЭУ. Они возникают вследствие изменения режима ветра, в процессе регулирования частоты вращения ветроколеса, во время пуска и останова ветроколеса, а также включения и выключения генератора и др.

7.3.4 Прочие виды нагрузок

В расчетах должны быть также учтены нагрузки, если они обусловлены особыми условиями эксплуатации МВЭУ: например, нагрузки от волн (для МВЭУ, размещенных в море), аэродинамического следа, ударные, ледовые; нагрузки, возникающие при транспортировании, установке, монтаже, обслуживании и ремонте МВЭУ.

7.3.5 Нагрузки на конструкцию МВЭУ

При проектировании МВЭУ необходимо рассмотреть все наиболее важные проектные ситуации, которые возникают в процессе жизненного цикла МВЭУ.

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

Все варианты нагружения, ожидаемые с достаточной степенью вероятности, должны быть рассмотрены совместно с функционированием системы управления и защиты.

Проектные варианты нагружения, использующиеся для проверки структурной целостности МВЭУ, должны быть рассчитаны на основе комбинирования:

- работы МВЭУ без аварий в нормальных условиях;
- работы МВЭУ без аварий в экстремальных условиях;
- аварийной работы МВЭУ в соответствующих экстремальных условиях;
- транспортирования, установки и обслуживания в соответствующих экстремальных условиях.

Если существует взаимосвязь между экстремальными факторами внешней среды и ситуациями отказа, то комбинация этих двух событий должна рассматриваться как реальный проектный вариант нагружения и должна быть учтена в расчетах.

Каждая проектная ситуация требует рассмотрения нескольких вариантов расчетного нагружения. Минимальное количество расчетных вариантов нагружения приведено в таблице 2 (таблица 4 также должна быть принята во внимание). В этих таблицах варианты расчетного нагружения определены для каждой проектной ситуации в соответствии с режимами ветра, электрическими нагрузками и прочими факторами внешней среды.

При вычислении нагрузки на конструкцию следует также учитывать параметры (факторы), влияющие на безопасное функционирование МВЭУ, но не отслеживаемые системами управления и защиты: например, закручивание кабелей, вибрацию, скорость вращения ротора и т. д.

7.4 Упрощенный метод расчета

7.4.1 Основные положения

Расчет нагрузок по элементарным уравнениям допускается для МВЭУ со следующими конструктивными особенностями:

- наличие горизонтальной оси вращения;
- количество лопастей две и более;
- консольные лопасти;
- жесткая втулка (небалансирующая или шарнирная втулка).

Для других конфигураций МВЭУ для расчета нагрузок следует применять аэроупругое моделирование (см. 7.5) или проводить испытания на механическую прочность (измерение нагрузок) (см. 7.6).

В приложении Е приведены элементарные уравнения для расчета нагрузок при разных проектных ситуациях.

Для расчета нагрузок упрощенным методом необходимы следующие проектные данные:

- частота вращения ветроколеса n_{design};
- скорость ветра V_{design};
- крутящий момент Q_{design};
- угловая скорость вращения $\omega_{yaw,max}$;
- максимальная частота вращения ветроколеса n_{max}.

Коэффициент быстроходности определяют по следующим формулам:

$$\lambda = \frac{V_{tip}}{V_{hub}} = \frac{\omega R}{V_{hub}} \Rightarrow \lambda_{design} = \frac{R}{V_{design}} \frac{\pi n_{design}}{30}, \tag{19}$$

$$\omega_s = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}. \tag{20}$$

Виды нагрузок, вычисляемые по элементарным формулам, представлены в таблице 2.

В таблице 2 для каждого случая расчетной нагрузки установлен соответствующий вариант расчета, обозначенный буквами «У» и «П». «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, устойчивостью элементов конструкции.

Таблица 2 — Варианты расчетного нагружения в упрощенном методе

Проектная ситуация	Вид нагружения		Режим ветра	Вариант расчета	Примечание
Выработка электроэнергии	*A*	Нормальная работа		У	
	B	Установка МВЭУ на ветер	$V_{hub}=V_{design}$	П	
	C	Поворот с отклонением (рассогласование, ошибка)	$V_{hub}=V_{design}$	П	
	D	Максимальная ударная нагрузка	$V_{hub}=2{,}5V_{ave}$	П	Ветроколесо вращается, но может быть остановлено или может вибрировать
Выработка электроэнергии в сочетании с отказом	*E*	Максимальная скорость вращения ветроколеса		П	
	F	Короткое замыкание	$V_{hub}=V_{design}$	П	
Нормальный останов	*G*	Отключение (торможение)	$V_{hub}=V_{design}$	П	Максимальный крутящий момент короткого замыкания генератора
Парковка (безветрие или останов)	*H*	Простой с ветровой нагрузкой	$V_{hub}=V_{e50}$	П	
Парковка, максимальная нагрузка	*I*	Ветровая нагрузка с максимальным риском	$V_{hub}=V_{ref}$	П	Самая неблагоприятная нагрузка на МВЭУ
Транспортирование, сборка, техническое обслуживание и ремонт	*J*	Определяется проектировщиком		П	

В случае необходимости данный перечень может быть расширен.

7.4.2 Вариант нагрузки *A* «Нормальная работа»

Вариант нагрузки *A* «Нормальная работа» — усталостная нагрузка. В процессе проектирования должны быть рассмотрены максимальные значения скорости ветра из диапазонов, установленных в таблице 4, приводящие к самому опасному случаю нагружения лопастей и вала МВЭУ.

Проектная усталостная нагрузка на лопасти МВЭУ должна включать в себя как минимум расчеты экстремальных значений центробежной нагрузки F_{zb}, действующей на основание лопасти, и изгибающих моментов на конце лопасти (M_{sB} и M_{yB}) по зависимостям:

$$\Delta F_{zB}=2m_B R_{cog}\omega_{0,design}^2, \tag{21}$$

$$\Delta M_{sB}=\frac{Q_{design}}{B}+2m_B gR_{cog}, \tag{22}$$

$$\Delta M_{yB}=\frac{\lambda_{design}Q_{design}}{B}. \tag{23}$$

Проектная усталостная нагрузка на вал ветроколеса рассчитывается в месте расположения первого подшипника (ближайшем к ветроколесу) и является комбинацией осевой нагрузки ($\Delta F_{x\text{-}shaft}$), крутящего момента ($M_{x\text{-}shaft}$) и суммарного изгибающего момента (M_{shaft}). Расчеты проводят по зависимостям:

$$\Delta F_{x\text{-}shaft} = \frac{3}{2}\frac{\lambda_{design} Q_{design}}{R}, \quad (24)$$

$$\Delta M_{x\text{-}shaft} = Q_{design} + 2m_r g e_r, \quad (25)$$

$$\Delta M_{shaft} = 2m_r g L_{rb} + \frac{R}{6}\Delta F_{x\text{-}shaft}. \quad (26)$$

где e_r рекомендуется принимать 0,005R, если иное значение не указано в проектной документации.

7.4.3 Вариант нагрузки *B* «Установка МВЭУ на ветер»

Предельные нагрузки (гироскопические силы и моменты) определяются в предположении их появления при максимальном значении угловой скорости $\omega_{yaw,max}$, соответствующей n_{design}.

Для МВЭУ с пассивной системой ориентации на ветер максимальное значение угловой скорости определяется по зависимости:

$$\omega_{yaw,max} = 3 - 0{,}01 \cdot (\pi R^2 - 2). \quad (27)$$

Для всех МВЭУ с площадью ометания меньше 2 м^2 максимальная угловая скорость вращения принимается 3 рад/с.

Для МВЭУ с активной системой ориентации на ветер максимальная угловая скорость определяется при нормальных ветрах. Если допускается работа МВЭУ при экстремальных скоростях ветра, то максимальная скорость вращения должна быть измерена при этих условиях.

Нагрузку, возникающую от изгибающего момента лопастей M_{yB}, определяют по формуле:

$$M_{yB} = m_B \omega_{yaw}^2 L_{rt} R_{cog} + 2\omega_{yaw} I_B \omega_r + \frac{R}{9}\Delta F_{x\text{-}shaft}, \quad (28)$$

где $\Delta F_{x\text{-}shaft}$ определяется по формуле (24).

Изгибающий момент оси вала M_{shaft} зависит от количества лопастей МВЭУ и рассчитывается по следующим формулам:

- для двухлопастного ветроколеса:

$$M_{shaft} = 4\omega_{yaw}\omega_r I_B + m_r g L_{rb} + \frac{R}{6}\Delta F_{x\text{-}shaft}; \quad (29)$$

- для трех- или более лопастного ветроколеса M_{shaft} определяется по формуле:

$$M_{shaft} = B\omega_{yaw}\omega_r I_B + m_r g L_{rb} + \frac{R}{6}\Delta F_{x\text{-}shaft}. \quad (30)$$

7.4.4 Вариант нагрузки *C* «Поворот с отклонением (рассогласование, ошибка)»

Все МВЭУ работают с некоторым отклонением (ошибкой) поворота. Допустимо отклонение (ошибка) в 30°.

Изгибающий момент, вызванный отклонением (ошибкой) поворота вычисляют по формуле:

$$M_{yd} = \frac{1}{8}\rho A_{proj,B} C_{l,max} R^3 \omega_{\lambda design}^2 \left[1 + \frac{4}{3\lambda_{design}} + \left(\frac{1}{\lambda_{design}}\right)^2\right], \quad (31)$$

где $C_{l,max}$ — коэффициент подъемной силы, который при отсутствии данных следует принимать 2,0.

7.4.5 Вариант нагрузки *D* «Максимальная ударная нагрузка»

МВЭУ может подвергаться высоким ударным нагрузкам от ротора. Осевая нагрузка действует параллельно оси вала, и ее максимальное значение вычисляют по формуле:

$$F_{x\text{-}shaft} = C_T 3{,}125 \rho V_{ave}^2 \pi R^2, \quad (32)$$

где C_T — нагрузочный коэффициент, равный 0,5.

7.4.6 Вариант нагрузки *E* «Максимальная скорость вращения ветроколеса»

Центробежную нагрузку в основании ветроколеса F_{zB} и изгибающий момент на оси вала M_{shaft}, вызванные центробежными силами и несбалансированностью ветроколеса, определяют по формулам:

$$F_{zB} = m_B \omega_{n,max}^2 R_{cog}, \tag{33}$$

$$M_{shaft} = m_t g L_{cb} + m_t e_c \omega_{n,max}^2 L_{cb}, \tag{34}$$

где $\omega_{n,max} = (\frac{\rho}{30})\, n_{max}$ определяют в соответствии с 9.2.4.

7.4.7 Вариант нагрузки *F* «Короткое замыкание»

В случае короткого замыкания в генераторе на валу ветроколеса создается большой осевой момент из-за токов короткого замыкания на генераторе, который определяют по формуле:

$$M_{x\text{-}shaft} = G\, Q_{design}, \tag{35}$$

где G — коэффициент короткого замыкания, который при отсутствии данных следует принимать равным 2,0.

Изгибающий момент на конце лопасти определяют по формуле:

$$M_{xB} = \frac{M_{x\text{-}shaft}}{B}. \tag{36}$$

7.4.8 Вариант нагрузки *G* «Нормальный останов»

Для МВЭУ с механической или электрической системой торможения момент торможения должен быть больше максимального приводного момента (приводящего МВЭУ в движение). Момент торможения M_{brake}, измеренный во время испытаний или рассчитанный, должен быть учтен в проектных расчетах малых МВЭУ. Максимальный крутящий момент на валу складывается из момента торможения и проектного крутящего момента (предполагается, что начало торможения соответствует проектному крутящему моменту):

$$M_{x\text{-}shaft} = M_{brake} + Q_{design}. \tag{37}$$

При высокой скорости вала в момент торможения значение M_{brake} следует умножить на соответствующий коэффициент передаточного механизма (трансмиссии или редуктора), который рекомендуется принять равным 2 при отсутствии более точных значений.

Нагружение лопастей МВЭУ во время торможения зависит от крутящего момента на валу и собственной массы лопастей:

$$M_{xB} = \frac{M_{x\text{-}shaft}}{B} + m_B g R_{cog}, \tag{38}$$

где $M_{x\text{-}shaft}$ — крутящий момент на валу, определяемый по формуле (37).

7.4.9 Вариант нагрузки *H* «Парковка»

Для этого варианта нагрузки МВЭУ остановлена нормальным образом. Нагрузки на открытые (незащищенные) части МВЭУ должны вычисляться, исходя из экстремальной скорости ветра (осредненной за 3 с) с периодом повторяемости 50 лет согласно 6.3.3.2.

Изгибающий момент на конце лопасти МВЭУ в состоянии парковки, который превосходит тормозной, определяют по формуле:

$$M_{xB} = C_d \frac{1}{4} \rho V_{e50}^2 A_{proj,B}, \tag{39}$$

где C_d — коэффициент лобового сопротивления, равный 1,5;
$A_{proj,B}$ — площадь лопастей.

Для МВЭУ, у которых ветроколесо вращается со скоростью V_{e50}, подъемный коэффициент $C_{l,max}$ возникнет на одной из лопастей ветроколеса из-за изменения направления ветра. Изгибающий момент основания лопасти определяют по формуле:

$$M_{yB} = C_{l,max} \frac{1}{6} \rho V_{e50}^2 A_{proj,B}. \tag{40}$$

Если нет данных для $C_{l,max}$, то его значение принимается равным 2,0.

Для МВЭУ в состоянии парковки осевая нагрузка вычисляют по формуле:

$$F_{x,stat} = B \cdot C_d \frac{1}{2} \rho V_{e50}^2 A_{proj,e^*} . \quad (41)$$

Для вращающегося ветроколеса осевую нагрузку вычисляют по формуле:

$$F_{x,stat} = 0{,}17 B A_{proj,0} \cdot \lambda_{e50}^2 \rho V_{e50}^2 , \quad (42)$$

где λ_{e50} — отношение окружной скорости к V_{e50}, которое приблизительно равно

$$\lambda_{e50} = \frac{\eta_{max} \pi R}{30 V_{e50}} . \quad (43)$$

Максимальный изгибающий момент башни вычисляется с учетом осевой силы по одной из формул (41) и (42) (зависит от конструкции турбины). Также следует учитывать силу торможения и подъемную силу на башне и гондоле, расчет которых производят по формуле:

$$F = C_f \frac{1}{2} \rho V_{e50}^2 A_{proj} , \quad (44)$$

где C_f — коэффициент силы (см. таблицу 3);

A_{proj} — часть ометаемой площади ветроколеса, спроецированная на поверхность, перпендикулярную направлению ветра.

Для свободно стоящей башни максимальный изгибающий момент воздействует на основание башни. Для башни с оттяжками максимальный изгибающий момент будет воздействовать на верхние соединительные тросы.

Также необходимо рассчитать нагрузки на отдельные элементы лопасти, вала и башни.

7.4.10 Вариант нагрузки *I* «Парковка, максимальная нагрузка»

При поломке в поворотном механизме МВЭУ может подвергаться значительным нагрузкам от ветра с различных направлений. Поэтому в проектных целях силы, воздействующие на лопасти, гондолу, башню и хвост (если он имеется), должны быть вычислены для всех возможных воздействий, включая ветровую нагрузку спереди, сбоку или сзади ветроколеса.

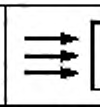
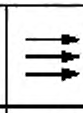
Нагрузка на каждый компонент определяют по формуле:

$$F = C_f \frac{1}{2} \rho V_{ref}^2 A_{proj} , \quad (45)$$

где C_f — коэффициент силы, возникающей при торможении или раскрутке;

A_{proj} — часть ометаемой площади (при самом худшем режиме), соответствующая коэффициенту силы. Для необтекаемых форм (например, углы гондолы или секции башни) проекции площадей должны быть перпендикулярны направлению ветра. Для аэродинамических форм эта поверхность должна быть обтекаемой.

Таблица 3 — Коэффициенты силы C_f

						
Характерная длина < 0,1 м	1,3	1,3	1,5	1,5	1,5	2,0
Характерная длина > 0,1 м	0,7	1,2	1,5	1,5	1,5	2,0

7.4.11 Вариант нагрузки *J* «Транспортирование, сборка, техническое обслуживание и ремонт»

Производитель должен учитывать все нагрузки на МВЭУ и ее компоненты при транспортировании, сборке, техническом обслуживании и ремонте МВЭУ. Такими нагрузками могут быть следующие нагрузки:

- гравитационные нагрузки на МВЭУ при ее транспортировании в положении, отличном от вертикального;
- нагрузки, вызванные спецтехникой и инструментами во время сборки МВЭУ;
- ветровые нагрузки во время сборки МВЭУ;
- нагрузки во время установки МВЭУ на фундамент;
- нагрузки при наклоне башни во время установки МВЭУ;
- нагрузки на опорную конструкцию во время установки на нее.

В качестве примера можно привести уравнение для вычисления нагрузок при наклоне башни

$$M_{tower} = 2(m_{tower\,top} + \frac{m_{overhang}}{2})gL_{II}, \quad (46)$$

где M_{tower} — изгибающий момент башни в точке крепления подъемной установки;
$m_{tower\,top}$ — суммарная масса гондолы и ветроколеса, кг;
$m_{overhang}$ — масса части башни между точкой подъема и вершиной башни, кг;
L_{II} — расстояние между подъемной точкой и вершиной башни, м.

Формула (46) основана на следующих допущениях:
- динамический коэффициент усиления, равный 2;
- центр масс башни находится на оси ветроколеса;
- максимальный изгибающий момент возникает тогда, когда башня находится в горизонтальном положении.

7.5 Аэроупругое моделирование

7.5.1 Основные положения

В настоящем разделе описаны варианты расчетного нагружения МВЭУ и установлено минимальное количество вариантов проектных случаев нагрузки (см. таблицу 4), которые должны быть рассмотрены при аэроупругом моделировании.

В таблице 4 варианты расчетного нагружения определены для каждой проектной ситуации в соответствии с режимами ветра, электрическими нагрузками и прочими факторами внешней среды. В процессе проектирования должны быть рассмотрены скорости ветра из диапазонов, установленных в таблице 4, приводящие к самому опасному случаю нагружения МВЭУ.

Для МВЭУ, имеющей конструктивные особенности, в целях обеспечения целостности конструкции должны быть рассмотрены соответствующие случаи проектного нагружения.

В таблице 4 для каждого случая расчетной нагрузки установлен соответствующий вид расчета, обозначенный буквой «У» или «П». «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, устойчивостью элементов конструкции.

7.5.2 Проектные случаи нагрузки элементов конструкции малых ветроэнергетических установок при выработке электроэнергии (ПСН 1.1—1.5)

В данной проектной ситуации рассматривается следующий режим: ветроколесо вращается, МВЭУ работает и подключена к электрической нагрузке. В расчетной схеме следует учесть дисбаланс ветроколеса. Максимальный дисбаланс массы ветроколеса и аэродинамическая неуравновешенность (например, шаг лопастей и различие их углов поворота), указанные производителем, должны быть учтены при расчетах.

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

Наихудшее сочетание условий необходимо учесть при расчетах, например, изменение направления ветра при нарушении ориентации поворота в ПСН 1.4.

ПСН 1.1 включает нагрузки, исходя из модели нормальной турбулентности (МНТ), которая сопровождает процесс нормальной эксплуатации МВЭУ в течение срока ее службы. ПСН 1.2—1.5 относятся к переходным процессам, которые были отобраны как потенциально опасные ситуации, возникающие в процессе эксплуатации.

7.5.3 Проектные случаи нагрузки элементов конструкции малых ветроэнергетических установок при выработке электроэнергии в сочетании с отказами или потерей электрической сети (ПСН 2.1—2.3)

Любой отказ в системе управления и защиты или отказ в собственной электрической цепи (например, короткое замыкание в цепи генератора) является значимым для нагружения МВЭУ.

Таблица 4 — Варианты проектных случаев нагрузки в аэроупругой модели

Проектная ситуация	Проектные случаи нагрузки (ПСН)	Режим ветра	Прочие условия	Вид расчета
1) Выработка электроэнергии	1.1	МНТ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ или $3V_{ave}$		У, П
	1.2	ЭКН $V_{hub} < V_{design}$		П
	1.3	ЭРП$_{50}$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ или $3V_{ave}$		П
	1.4	ЭИН$_{50}$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ или $3V_{ave}$		П
	1.5	ЭКП $V_{hub} = V_{design}$		П
2) Выработка электроэнергии в сочетании с отказом или потерей связи с электрической сетью	2.1	НПВ $V_{hub} = V_{design}$ или V_{out} или $2,5V_{ave}$	Отказ в системе управления	П
	2.2	МНТ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ V_{e1}	Неисправность системы контроля или защиты	У, П
	2.3	ЭРП$_1$ $V_{in} < V_{out}$ или $2,5V_{ave}$	Отсоединение от электрической сети	П
3) Нормальный останов	3.1	МНТ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		У
	3.2	ЭРП $V_{hub} = V_{out}$ или $V_{max,shutdown}$		П
4) Аварийный останов или ручное выключение	4.1	МНТ должна быть определена производителем		П
5) Парковка (холостой ход)	5.1	МЭВ 50-летний период повторяемости $V_{hub} = V_{e50}$	Отсоединение от электрической сети	П
	5.2	МНТ $V_{hub} = 0,7V_{ref}$		У
6) Парковка в сочетании с отказом	6.1	МЭВ период повторяемости один год $V_{hub} = V_{e1}$		П
7) Транспортирование, сборка, техническое обслуживание и ремонт	7.1	МНТ должна быть определена производителем		П

Для ПСН 2.1 возникновение отказа, связанного с выполнением функций управления или потерей связи с электрической сетью, должно рассматриваться как нормальное событие. Для ПСН 2.2 такие редкие события, как отказы реализации функций защиты или отказы во внутренних электрических цепях, должны рассматриваться как аварийные.

В ПСН 2.3 должен быть рассмотрен экстремальный ветер с периодом повторяемости один год при потере связи с электрической сетью. Данная ситуация рассматривается как аварийная.

Для МВЭУ с пассивной системой управления могут возникнуть следующие виды отказов:

- в системе установки на ветер (например, блокировка хвостовой части);
- нарушение системы контроля шага лопастей (если система контроля шага лопастей не прошла безопасную наработку).

Усталостная нагрузка оценивается для каждого единичного отказа МВЭУ при возникновении в течение минимум 24 ч в году.

7.5.4 Проектные случаи нагрузок при нормальном (контролируемом) останове малых ветроэнергетических установок (ПСН 3.1—3.2)

Данный проектный случай должен включать в себя все события, приводящие к нагружению МВЭУ в течение нормальных переходных процессов с момента окончания производства электроэнергии до

заторможенного состояния (неподвижного) или состояния покоя (парковки). Число проектных случаев нагрузки должно основываться на особенности функционирования системы управления.

При отсутствии системы контроля останов МВЭУ происходит ручным отключением и усталостная нагрузка может быть проигнорирована. Для ПСН 3.2 максимальная скорость ветра — V_{out} или $V_{max.\ shutdown}$.

7.5.5 Проектные случаи нагрузок малых ветроэнергетических установок при аварийном останове (или ручном отключении) (ПСН 4.1)

При проектировании МВЭУ должны быть рассмотрены нагрузки, возникающие в процессе аварийного останова или ручного отключения. В руководстве по техническому обслуживанию производитель должен указать ограничения по скорости ветра (максимальной рабочей скорости ветра).

7.5.6 Проектные случаи нагрузок малых ветроэнергетических установок, находящихся в состоянии парковки (или на холостом ходе) (ПСН 5.1—5.2)

Рабочее колесо запаркованной МВЭУ как при неподвижном положении, так и на холостом ходу должно быть оценено при условиях экстремальной скорости ветра. Эти условия могут быть оценены как на основе модели экстремальной скорости ветра, так и на основе квазистатического анализа с соответствующими поправками для порывов и динамических реакций.

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

Должен быть рассмотрен случай отключения МВЭУ на холостом ходу от электрической сети.

Для МВЭУ, не имеющей связи с электрической сетью, потери в электрической сети не рассчитываются. В проектных нагрузках определяются вероятности повреждения компонентов МВЭУ при экстремальной скорости ветра.

7.5.7 Проектные случаи нагрузок малых ветроэнергетических установок, находящихся в состоянии парковки в сочетании с ситуацией отказа (ПСН 6.1)

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

7.5.8 Проектные случаи нагрузок малых ветроэнергетических установок при транспортировании, сборке, техническом обслуживании и ремонте (ПСН 7.1)

Производитель должен указать все климатические параметры и проектные ситуации, допустимые при транспортировании, сборке, техническом обслуживании и ремонте МВЭУ. В соответствии с этим должны быть рассмотрены следующие нагрузки:

- нагрузки при транспортировании МВЭУ в положении, отличном от вертикального;
- нагрузки при сборке, вызванные спецтехникой и инструментами;
- нагрузки при наклоне башни во время ее подъема;
- нагрузки при установке МВЭУ на фундамент;
- ветровые нагрузки в период установки;
- нагрузки при установке вспомогательных конструкций.

7.5.9 Расчет нагрузок

Нагрузки, описанные в 7.3, должны быть определены для каждого проектного случая нагружения. В соответствующих случаях необходимо принять во внимание:

- возмущения поля скоростей ветра, вызванные работой самой МВЭУ (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 защиты и управления МВЭУ.

7.6 Измерение нагрузок

Измерение нагрузок, действующих на элементы конструкции МВЭУ, должно быть проведено в условиях, максимально приближенных к условиям, описанным в 7.5. Экстраполяция полученных значений проводится в соответствии с *[4]*. Иные требования описаны в 9.3 и *[4]*.

Для всех проектных нагрузок, описанных в 7.4 и 7.5, измеренные нагрузки могут рассматриваться вместо расчетных, если условия измерений идентичны проектным.

7.7 Расчет напряжения

Для всех компонентов МВЭУ должны быть определены проектные напряжения. Напряжения определяются в соответствии с проектными нагрузками для каждой силы и момента, на базе которых определяются результирующие эквивалентные напряжения. Результирующие эквивалентные напряжения должны быть сравнены с проектными значениями для материалов.

При расчете напряжений следует учитывать:

- вариации напряжений;
- концентрации напряжений;
- величину и направление результирующих нагрузок;
- варианты размеров компонентов и толщин материалов;
- неровность поверхности компонентов, обработку их поверхности;
- виды нагрузок (изгибающие, растягивающие, кручение и т. д.);
- сварка, литье, обработка, торцевое волокно конструкции и т. д.

В таблице 5 представлены формулы для вычисления эквивалентных значений напряжений.

Таблица 5 — Эквивалентные нагрузки

	Ветроколесо	Прямоугольное основание лопасти	Вал ветроколеса
Осевая нагрузка	$\sigma_{zB} = \frac{F_{zB}}{A_B}$	$\sigma_{zB} = \frac{F_{zB}}{A_B}$	$\sigma_{x\text{-}shaft} = \frac{F_{x\text{-}shaft}}{A_{x\text{-}shaft}}$
Изгиб	$\sigma_{MB} = \frac{\sqrt{M_{xB}^2 + M_{yB}^2}}{W_B}$	$\sigma_{MB} = \frac{M_{xB}}{W_{xB}} + \frac{M_{yB}}{W_{yB}}$	$\sigma_{M\text{-}shaft} = \frac{M_{shaft}}{W_{shaft}}$
Сдвиг	Незначительное	Незначительное	$\tau_{M\text{-}shaft} = \frac{M_{x\text{-}shaft}}{2W_{shaft}}$
Совместное (осевая нагрузка и изгиб)	$\sigma_{eqB} = \sigma_{zB} + \sigma_{MB}$		$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_{x\text{-}shaft} + \sigma_{M\text{-}shaft})^2 + 3\tau_{M\text{-}shaft}^2}$

7.8 Испытания на механическую прочность

7.8.1 Требования к предельной прочности материала

Предельная прочность материала устанавливается при 95 % вероятности выживания с уровнем доверительной вероятности 95 %. Если свойства материала вторичны по отношению к вероятности безотказной работы, то запас прочности материала уточняется в соответствии с приложением Д.

При определении прочностных свойств материала компонента МВЭУ следует учитывать:

а) натурное испытание материала;

б) соответствие свойств материала элемента конструкции свойствам материала, полученным в результате испытаний опытных образцов;

в) испытания статичных, усталостных и других нагрузок;

г) эффекты внешней среды (например, коррозия, воздействие ультрафиолетовых лучей, влажность, температура и т. д.);

д) влияние геометрических характеристик расчетных сечений на свойства материала (например, распределение материла по форме лопастей, наличие уплотнений в строительных смесях и деревянных элементах, распределение металла при ковке и т. д.).

В таблице 6 представлены парциальные коэффициенты безопасности для материала. Полная характеристика прочностных свойств материала определяется с учетом пяти вышеперечисленных условий. Минимальная характеристика прочностных свойств материала выявляется только на основе испытаний. Для этого случая рекомендуется использовать максимально возможные значения парциальных коэффициентов безопасности для нагрузок (см. таблицу 6). Руководство для проведения испытаний различных типов материалов приведено в приложении Д.

Таблица 6 — Парциальные коэффициенты безопасности для материала

Вид нагрузки	Полная характеристика	Минимальная характеристика
Усталостная	1,25*	10,0**
Предельной прочности	1,1	3,0
* Показатель, учитываемый при расчете повреждений в формуле (48). ** Показатель, принимаемый при измерении предельных нагрузок материалов.		

7.8.2 Парциальные коэффициенты безопасности для нагрузок

Парциальные коэффициенты безопасности для усталостных нагрузок и для нагрузок предельной прочности представлены в таблице 7.

Таблица 7 — Парциальные коэффициенты безопасности для нагрузок

Метод определения проектных нагрузок	Для усталостных нагрузок γ_f	Для нагрузок предельной прочности γ_f
Упрощенный метод	1,0	3,0
Аэроупругое моделирование	1,0	1,35
Испытания с экстраполяцией	1,0	3,0

7.9 Анализ предельных значений

7.9.1 Анализ предельных нагрузок

Для того чтобы обеспечить надежные значения проектных величин, необходимо учесть парциальные коэффициенты безопасности по нагрузкам и материалам в соответствии с требованием:

$$\sigma_a \le \frac{f_k}{\gamma_m \gamma_f}, \tag{47}$$

где f_k — нормативная величина прочности материала;
γ_m — парциальный коэффициент безопасности для материала;
γ_f — парциальный коэффициент безопасности по нагрузкам.

7.9.2 Усталостное разрушение

Расчеты на усталостную прочность должны быть произведены по соответствующей надежной методике. Например, в соответствии с методикой Майнера предельное состояние считается достигнутым, когда накопленное повреждение превысит 1. В данном случае повреждение, накопленное за проектный срок службы МВЭУ, должно быть меньше или равно 1. Повреждение, накопленное за проектный срок службы МВЭУ, определяют по формуле:

$$Damage = \sum_i \frac{n_i}{N(\gamma_f \gamma_m s_i)} \le 1{,}0, \tag{48}$$

где n_i — подсчитанное число усталостных циклов в i выборке нагрузки;
s_i — уровень напряжения (деформации), зависящий от подсчитанного числа циклов в i выборке;
N — число циклов до разрушения как функция напряжения (или деформации) для указанного аргумента (т. е. характеристическая кривая S — N);
γ_f, γ_m — парциальный коэффициент безопасности по нагрузкам и для материала соответственно.

В упрощенном методе (см. 7.4) для случая нагрузки *A* число усталостных циклов определяют по формуле:

$$n = \frac{B n_{design} T_d}{60}, \quad (49)$$

где T_d — проектный срок службы МВЭУ, с.

При отсутствии кривой *S* — *N* в формуле (47) используется предельное значение парциального коэффициента безопасности для материала при минимальной характеристике нагрузки из таблицы 6 (γ_m=10,0).

7.9.3 Анализ предельного отклонения

Необходимо убедиться в том, что отклоняющие воздействия на МВЭУ учтены в проектных нагрузках.

При проектировании МВЭУ крайне важно удостовериться в отсутствии механических взаимодействий между лопастями и башней МВЭУ. Лопасть не должна касаться башни ни при одном случае нагружения. Максимальное отклонение конца лопасти, умноженное на соответствующий коэффициент нагрузки, должно быть меньше зазора между лопастью и башней при холостом ходе.

8 Система управления и защиты

8.1 Основные положения для построения системы управления и защиты

При проектировании МВЭУ необходимо учитывать, что ее рабочие параметры находились в нормальных пределах в различных режимах работы. Безопасное функционирование МВЭУ обеспечивается системой управления и защиты. Например, такая система должна предотвращать превышения предельной скорости вращения ветроколеса.

8.2 Функции системы защиты

Система защиты предназначена для обеспечения безотказной работы МВЭУ. В общем случае функции защиты должны обеспечить защиту МВЭУ от любого отдельного отказа, выхода из строя источника питания или любого неконтролируемого компонента системы, осуществляющего функции защиты. Контроль состояния элементов МВЭУ должен выявлять угрозы для ее безотказной работы. В любом случае их отказ должен приводить к выключению МВЭУ.

Система защиты должна обеспечивать безотказную работу МВЭУ как при ручном, так и при автоматическом управлении.

Необходимо принять меры по предотвращению случайных или неправомерных настроек системы защиты.

8.3 Ручное отключение

Для МВЭУ с площадью ометания более 40 м^2 необходима ручная кнопка/переключатель для осуществления процедуры отключения. Ручная кнопка/переключатель для выключения предназначена для отключения автоматической системы управления и полной остановки МВЭУ из любого рабочего состояния.

Для МВЭУ с площадью ометания менее 40 м^2 ручная кнопка/переключатель для отключения не требуется, но должна быть задана процедура отключения.

8.4 Отключение малых ветроэнергетических установок для проведения плановых осмотров, технического обслуживания

Производитель обязан обеспечить безопасное отключение МВЭУ для выполнения плановых осмотров, технического обслуживания или планового ремонта. Процедура отключения включает в себя перечень требований и условий, при которых происходит отключение, например, по максимальной скорости ветра, которая должна быть не меньше $0,5V_{ave}$.

Для выполнения технического обслуживания ветроколесо и поворотная система должны вернуться в свое начальное положение. Производитель должен обеспечить процедуры для приведения МВЭУ в состояние покоя. Опускание малых МВЭУ с башней, построенных методом поворота, является

приемлемой мерой для остановки МВЭУ. Обслуживание малых МВЭУ с башней, построенных методом поворота, может проводиться на земле. Если техническое обслуживание МВЭУ проводится на высоте башни, то необходимо предварительно отключить МВЭУ.

9 Испытания

9.1 Основные положения

Перечень обязательных испытаний для МВЭУ приведен в 5.2. Испытания должны отражать функциональные возможности и режимы всех компонентов проектируемой МВЭУ. При проведении испытаний следует использовать правильно откалиброванные приборы и соответствующую модель для испытаний.

Измерение скорости ветра на площадке МВЭУ следует производить по секторам с помощью метеорологического оборудования, установленного в соответствии с *ГОСТ Р 54418.12.1*.

Детальное описание испытаний (методы, условия), сведения о применяемом испытательном оборудовании и полученные результаты должны быть представлены в отчете об испытаниях.

В описание метода испытаний должны быть включены:

- процедуры измерения;
- измерительные инструменты и приборы;
- проводимые измерения и методы анализа результатов измерений.

Отклонения измеренных данных от проектных также должны быть представлены в отчете об испытаниях.

Отчет об испытаниях должен соответствовать *ГОСТ ИСО/МЭК 17025* и другим стандартам (например, применяемым в международной практике стандартам *[4]* и *[5]*).

Примечание — В соответствии с [6] средства измерений, применяемые в процессе испытаний, должны пройти метрологическую аттестацию в соответствии с [7]. Применяемое испытательное оборудование должно пройти аттестацию по ГОСТ Р 8.568.

Пригодность контрольно-измерительных приборов к проведению испытаний устанавливается проверкой документов, подтверждающих необходимый класс точности приборов и дату их последующей поверки. Класс точности электроизмерительных приборов должен устанавливаться в соответствии с ГОСТ 11828.

9.2 Испытания для проверки проектных значений

9.2.1 Основные положения

При испытаниях для проверки проектных значений проводят испытания следующих проектных параметров МВЭУ:

- проектная мощность P_{design};
- частота вращения ветроколеса n_{design};
- вращающий момент на валу Q_{design};
- максимальная частота вращения ветроколеса n_{design}.

9.2.2 Проектная мощность, частота вращения ветроколеса, расчетная скорость ветра и вращающий момент на валу

Проектная мощность P_{design} и проектная частота вращения ветроколеса n_{design} зависят от скорости ветра. Расчетная скорость ветра определяется как $1{,}4V_{ave}$.

Измерение мощности, частоты вращения ветроколеса и вращающего момента на валу следует производить при номинальной электрической нагрузке.

Интервал для любой выборки скоростей ветра с интервалом осреднения 1 мин., которая используется для определения вышеупомянутых величин, должен быть 1 м/с. Скорости ветра должны быть измерены в диапазоне от V_{in} до $2V_{ave}$ и содержать как минимум 30 замеров. Замер основывается на среднем значении данных, записанных в течение 1 мин. с частотой записи 0,5 Гц.

При отсутствии других более точных значений проектные значения частоты вращения ветроколеса и вращающего момента на валу следует определять по формулам:

$$n = 0{,}6+0{,}000\,005P_{design} \text{ при } P_{design} \le 20\,000 \text{ Вт},$$

$$n = 0{,}7 \text{ при } P_{design} \ge 20\,000 \text{ Вт}, \tag{50}$$

$$Q_{design} = \frac{30P_{design}}{\eta\pi n_{design}}. \tag{51}$$

9.2.3 Максимальная угловая скорость вращения

Максимальная угловая скорость вращения определяется по значению максимальной частоты вращения. Измеренное значение не может быть использовано в упрощенном методе расчета, вместо него следует определять значение по формуле (27).

При измерении максимальной угловой скорости вращения в лабораторных условиях следует учитывать:

- факторы окружающей среды;
- погрешности метода интерполяции (или экстраполяции);
- погрешности измерительных приборов.

9.2.4 Максимальная частота вращения ветроколеса

При определении максимальной частоты вращения ветроколеса производят серию измерений скоростей вращения ветроколеса для скорости ветра в диапазоне от 10 до 20 м/с при характерных условиях: например, отсутствие электрической нагрузки или порыв ветра. Измерение скорости ветра следует проводить за интервал времени не менее 2 ч, в котором продолжительность скоростей ветра, превышающих 15 м/с, не менее 30 мин.

По измеренным данным методом линейной интерполяции (или экстраполяции) для скорости ветра V_{ref} определяется максимальная скорость вращения.

9.3 Испытания на нагрузки

Программа испытаний на нагрузки МВЭУ должна охватывать все возможные варианты нагружения МВЭУ для различных ситуаций из 7.5: функционирование МВЭУ при нормальных и экстремальных режимах ветра; работа МВЭУ в аварийных условиях, при торможении и поворотах ветроколеса. Испытания должны охватывать все основные режимы функционирования МВЭУ во всем диапазоне скоростей ветра.

Следует проводить измерение основных нагрузок, метеорологических параметров и рабочих параметров МВЭУ. В обязательном порядке должны быть измерены нагрузки в основных точках нагружения МВЭУ — изгибающие моменты на вершинах лопастей, нагрузки на валу и нагрузки, действующие на опорную конструкцию. Метеорологические параметры должны включать в себя скорость ветра на высоте оси ветроколеса и ее направление. В качестве рабочих параметров МВЭУ определяются скорость вращения ветроколеса, электрическая мощность, положение поворотного механизма и состояние МВЭУ.

Подтверждение проектных нагрузок происходит при сопоставлении с измеренными нагрузками. Выявленные несоответствия должны быть занесены в отчет об испытаниях.

Руководство для проведения испытаний и оценки результатов испытаний приведено в *[4]*.

9.4 Испытания на долговечность

9.4.1 Основные положения

Испытания на долговечность проводят для проверки:

- структурной целостности и свойств материалов (коррозия, растрескивание, деформации);
- надежности защиты МВЭУ от воздействий окружающей среды;
- динамики состояния МВЭУ.

МВЭУ считается успешно прошедшей длительное испытание, если она проработала:

- в течение всего периода испытания;
- не менее 6 мес.;
- не менее 2500 ч при различных скоростях ветра;
- не менее 250 ч при скоростях ветра $1{,}2V_{ave}$ и выше;
- не менее 25 ч работы при скоростях ветра $1{,}8V_{ave}$ и выше.

Среднее значение интенсивности турбулентности воздушного потока при скорости ветра 15 м/с, определенной на 10-минутном интервале (с частотой записи показаний 0,5 Гц), на высоте оси ветроколеса и значение максимального порыва за период испытания должны быть представлены в отчете об испытаниях.

Производители малых МВЭУ обычно предлагают разные конструкции башен для одного типа МВЭУ. В таких случаях, если с помощью расчетов или краткосрочного испытания подтверждается, что динамическое и статическое состояние альтернативной башни не приведет к превышению проектных нагрузок системы, длительные испытания всех конструкций башен необязательны.

9.4.2 Показатели надежности работы

9.4.2.1 Основные положения

Надежная работа означает:

- время работы составляет по меньшей мере 90 % от общего времени работы МВЭУ;
- отсутствие значительных изменений (поломок) конструкции МВЭУ или ее компонентов;
- отсутствуют значительное изнашивание, коррозия или повреждение компонентов МВЭУ;
- нет существенного снижения производства электрической энергии при соизмеримых скоростях ветра.

Если во время испытания (за исключением технического обслуживания и плановых осмотров) произошло значительное изменение в конструкции МВЭУ, то принимается решение о его продолжении. Это решение должно быть занесено в отчет об испытаниях. Под значительным изменением в конструкции МВЭУ понимают замену вышедшего из работы компонента МВЭУ, влияющего на безопасность и работоспособность МВЭУ, на тип, не предусмотренный проектом. К таким компонентам относятся лопасти ветроколеса, система аккумулирования, генератор, инвертор и т. д.

Значительным изнашиванием называется любое изнашивание, которое в экстраполированном времени жизни МВЭУ приведет к существенному снижению мощности или габаритных параметров. Изнашивание, коррозия и повреждения компонентов должны быть оценены детальной инспекцией системы МВЭУ в заключении экспертизы.

9.4.2.2 Испытание на продолжительность работы

Испытания на продолжительность работы включают определение комплексного показателя надежности. Комплексный показатель надежности — коэффициент технического использования по ГОСТ 27.002.

Коэффициент технического использования МВЭУ *О* определяется как отношение времени нормальной эксплуатации МВЭУ за период испытания. Коэффициент технического использования МВЭУ *О* вычисляют по формуле:

$$O = \frac{(T_T - T_N - T_U - T_E)}{(T_T - T_U - T_E)} \cdot 100\,\%, \qquad (52)$$

где T_T — время испытания;

T_N — суммарное время отказов МВЭУ;

T_U — суммарное время неопределенного состояния МВЭУ;

T_E — суммарное неучтенное время.

К нормальным режимам эксплуатации МВЭУ относятся:

- производство электроэнергии;
- автоматическое включение и выключение в соответствии с изменением скорости ветра от включения при слабом ветре и до выключения при сильном ветре;
- режим холостого хода или парковка при скорости ветра ниже V_{in} или выше V_{out};
- увеличенное время между нормальным отключением (не по причине отказа) и перезапуском МВЭУ.

Время неопределенного режима МВЭУ не следует исключать из расчета.

В T_N учитывается время, в течение которого на МВЭУ возникают различные аварийные ситуации:

- все аварийные состояния МВЭУ, зафиксированные системой управления и защиты МВЭУ;
- все автоматические отключения МВЭУ при обнаружении отказов системой управления и защиты;
- ручное отключение для проведения ремонта при аварийных условиях;
- плановые осмотры, проходящие в соответствии с календарным графиком работ.

Под временем «неопределенного» состояния МВЭУ [T_U в формуле (52)] рассматривают время:

- аварии или обслуживания системы сбора данных испытаний;
- потерянные или невосстановимые данные о режимах МВЭУ.

Из общего времени испытания следует исключить периоды времени T_E:

- экспертизы МВЭУ во время внеплановых испытаний, нерекомендуемых производителем (например, экспертиза системы сбора данных);
- ручное отключение или перевод в режим испытания, препятствующие нормальной работе МВЭУ, для любых целей кроме технического обслуживания, или при условиях, воспринимаемых как аварийные;

- отключение от электрической сети, аккумуляторной батареи, инвертора или любого внешнего компонента системы МВЭУ, подвергавшегося испытаниям. Если эти компоненты являются важными компонентами МВЭУ, то это время должно считаться как T_N;

- снижение или прекращение производства электрической энергии при внешних условиях, отличающихся от проектных.

Если отказ МВЭУ произошел для одной из вышеперечисленных ситуаций при нормальных внешних условиях, то это время относится к T_N.

Основные системы МВЭУ, влияющие на надежность ее функционирования, должны быть отражены в отчете об испытаниях. Эти системы должны включать в себя:

- механическое соединение МВЭУ и земли;
- электрическое соединение между МВЭУ и нагрузкой;
- устройства управления между МВЭУ и ближними и/или дальними системами контроля.

В программе испытаний должны быть прописаны категории условий, не имеющих четкого разделения на аварийные и ненормальные. Например, к таким ситуациям относятся:

- случайное включение тормозов;
- сбой системы управления при изменении напряжения.

В отчете об испытаниях должны быть указаны измерительные приборы, точности и единицы измерений для фиксации состояний режимов МВЭУ во время испытания.

9.4.2.3 Снижение энергетических показателей

В настоящем подпункте описана процедура испытаний для выявления причин снижения энергетических показателей ветротурбины. Во время испытаний для каждого месяца определяются энергетические показатели, соответствующие скоростям ветра. Для каждой скорости ветра должна быть построена зависимость изменения энергетических показателей во времени. Если наблюдается тенденция снижения энергии, то экспертным путем устанавливается причина. Для аккумуляторных батарей следует строить график с точками состояния заряда. При анализе следует использовать только данные, соответствующие нормальным режимам работы.

9.4.3 Динамическое состояние

Оценка динамического состояния МВЭУ производится в целях выявления чрезмерных вибраций. Динамическое состояние МВЭУ должно быть оценено для всех эксплуатационных режимов (например, с нагрузкой, без нагрузки и т. д.) в рабочем диапазоне скоростей ветра (с энергетической характеристики) до 20 м/с. За МВЭУ необходимо наблюдать как минимум 5 мин. при скорости ветра, близкой к 5, 10, 15, 20 м/с, и в сумме 1 ч. Особое внимание должно быть уделено вибрациям и резонансу башни, шуму МВЭУ, динамике хвостового оперения и поведению поворотной системы. Наблюдения должны быть занесены в протокол испытаний.

9.5 Испытания механических компонентов

9.5.1 Основные положения

Статическое испытание лопастей обязательно проводится для всех МВЭУ. Для других несущих компонентов МВЭУ испытания обязательны, если не были определены проектные нагрузки. Испытание элемента МВЭУ проводится для самого опасного предельного состояния с учетом парциальных коэффициентов безопасности. Может быть нанесен ущерб нормальной работе МВЭУ из-за, например, значительной потери жесткости, пластической деформации, прогиба или излома. Необходимо убедиться в соответствии измеренных нагрузок проектным, указанным в спецификации компонентов.

9.5.2 Испытание лопастей

Статическое нагружение лопастей складывается из изгибающего момента и центробежной силы для самого опасного варианта нагружения. Испытания проводятся для лопастей и втулки (соединение с гондолой). Не должно быть отказов в работе при тестировании максимальной расчетной рабочей нагрузки с учетом показателей надежности.

Испытание лопасти рекомендуется проводить при аварийных условиях для определения ее реального запаса прочности.

В международной практике при испытаниях лопасти на усталостную нагрузку необходимо руководствоваться требованиями [8].

9.5.3 Испытания втулки (ступицы)

Проводятся статические испытания втулки (ступицы), включающие имитацию центробежной силы и изгибающего момента во всех точках присоединения лопастей. Также должно быть протестировано

соединение втулки (ступицы) с валом. При испытаниях на максимальные проектные нагрузки с учетом парциальных коэффициентов безопасности не должно быть поломок втулки (ступицы).

9.5.4 Испытания конструкции гондолы

При необходимости проводятся статические испытания гондолы, которые включают в себя изгибающий момент на валу, осевую вращающую силу и собственный вес. При максимальных проектных расчетных нагрузках (включая коэффициенты надежности) гондола не должна получить урона.

9.5.5 Испытания установки на ветер

Испытания установки на ветер проводятся аналогично испытаниям гондолы. Должно быть продемонстрировано, что установка на ветер работает должным образом.

9.5.6 Испытания редуктора

Испытания редуктора проводить не требуется, но *в международной практике* рекомендуется испытание в соответствии с *[9]*.

9.6 Испытания на безопасность и функциональность

Испытания на безопасность и функциональность должны подтвердить, что режимы испытуемой турбины соответствуют проектным и что надежность работы МВЭУ обеспечена должным образом.

Испытания на безопасность и функциональность должны включать испытание системы контроля и защиты в критических ситуациях в соответствии с требованиями проектной документации. Критические ситуации включают в себя:

- контроль мощности и скорости;
- контроль поворотной системы (выравнивания по ветру);
- потерю нагрузки;
- защиту от превышения проектной скорости;
- запуск и отключение при превышении проектной скорости ветра.

Также могут быть учтены:

- защита от значительных вибраций;
- защита батарей от отклонений от нормального напряжения;
- аварийное отключение при нормальной работе;
- закрутка кабелей;
- неизолированные участки кабелей (для подключенных к сети).

Также должны быть испытаны все дополнительные функции системы контроля и защиты, которые могут быть активированы отказом какого-либо компонента, другим критическим событием или нарушением рабочих условий. Эти испытания могут включать в себя моделирование критических событий или рабочих условий. Например, МВЭУ с провисающими проводами, спроектированная с автоматическим отключением, при чрезмерном провисании проводов должна быть испытана на работу этой функции системы защиты.

9.7 Климатические испытания

Испытание МВЭУ, спроектированной для работы в условиях, отличных от нормальных (см. раздел 6) условий окружающей среды, рекомендуется проводить для всей конструкции МВЭУ или для всех ее компонентов, подверженных внешним условиям.

9.8 Испытания электрического оборудования

Все безопасные критические подсистемы (например, генератор, управляющая панель, двигатели, трансформаторы, УЗО, радиаторы) МВЭУ должны быть оценены и протестированы на стандарты МЭК и национальные стандарты.

Например, для генераторов испытания необходимо проводить в соответствии с ГОСТ Р 52776, ГОСТ Р МЭК 60034-2-1, ГОСТ IEC 60034-5.

Примечание — В международной практике при испытаниях электрического оборудования используют [10].

10 Электрическая система

10.1 Основные положения

Электрическая система МВЭУ, включая все электрическое оборудование и компоненты (система управления, генераторы и т. д.), должна соответствовать требованиям соответствующих национальных стандартов. Конструкция электрической системы МВЭУ должна удовлетворять требованиям ГОСТ 12.2.007.0.

МВЭУ, предназначенные для подсоединения к электрической сети, должны соответствовать требованиям 10.7.3. Все оборудование и компоненты электрической системы должны соответствовать проектным воздействиям внешней среды (см. 6.4), к числу которых относятся температурное, фотохимическое, коррозионное, механическое и др.

Все оборудование и компоненты электрической системы, выбранные на базе энергетических характеристик, должны соответствовать проектным нагрузкам, включая аварийные условия. Однако если компонент электрической системы не удовлетворяет проектным условиям, то он может быть использован в качестве дополнительной защиты всей электрической системы МВЭУ.

Защита МВЭУ от ударов молний и других кратковременных перегрузок должна быть разработана в соответствии с *ГОСТ 12.1.030*. Нет необходимости обеспечивать защиту тех частей МВЭУ, безопасности которых удары молний не наносят ущерба.

Примечание — В международной практике в данных целях применяют [11].

10.2 Защитные устройства

Электрическая система МВЭУ в соответствии с требованиями *ГОСТ Р МЭК 60204-1* и 7.1–7.5, 7.8 должна включать в себя соответствующие устройства, гарантирующие защиту от сбоев как самой МВЭУ, так и сети подключения, которые могут привести к опасной ситуации или состоянию МВЭУ.

Примерами таких устройств являются защита от перегрузки по току, терморезисторы от перегрева и т. д.

10.3 Разъединительные устройства

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

Не допускается использовать полупроводниковые приборы в качестве единственных самостоятельных отключающих приборов и устройств.

В конструкции МВЭУ 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.

10.4 Система заземления

В проекте МВЭУ должна быть разработана местная система электродного заземления в соответствии с требованиями ГОСТ Р 50571.5.54, ГОСТ 21130, ГОСТ 12.1.030, ГОСТ 12.2.007.0 (для обеспечения правильного функционирования электрических установок) и ГОСТ 12.1.030 (для молниезащиты).

В проектной документации должен быть указан диапазон проводящих свойств грунтов, которому соответствует данная система электродного заземления, а также должны быть даны рекомендации на случай, если будет установлено несоответствие указанному диапазону.

Выбор и установка оборудования электродного заземления (электроды заземления, провода заземления, главные клеммы заземления, заземляющие шины) должно соответствовать условиям молниезащиты.

10.5 Молниезащита малых ветроэнергетических установок

Молниезащита МВЭУ должна быть разработана в соответствии с *ГОСТ Р 54418.24*. Не требуется обеспечивать защиту тех частей МВЭУ, безопасности которых удары молний не наносят ущерба, например, лопасти ветроколеса. Дополнительные требования по молниезащите МВЭУ приведены в *[12]*.

10.6 Электрические кабели

Электрические кабели выбираются с учетом температуры, напряжения, тока, внешних условий и старения (масло, ультрафиолетовое старение) в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 60204-1 (раздел 13)*.

Следует учитывать механические нагрузки, возникающие при установке и эксплуатации электрических кабелей. Они должны устанавливаться в соответствии с *ГОСТ Р МЭК 60204-1 (раздел 14)*.

Армированные кабели и изолирующие трубы должны использоваться в том случае, если имеется вероятность повреждения кабелей грызунами и другими животными. Подземные кабели должны располагаться на такой глубине, чтобы избежать повреждений от передвижной техники, обслуживающей МВЭУ, или от сельскохозяйственных машин. Линии расположения подземных кабелей должны быть маркированы лентами разметки.

10.7 Электрические нагрузки

10.7.1 Основные положения

Требования к электрическим нагрузкам для МВЭУ описаны в 10.7.2—10.7.5.

10.7.2 Зарядка батареи

МВЭУ, предназначенные для зарядки батарей, должны быть спроектированы с учетом соответствующего тока и напряжения, рекомендованного в руководстве по эксплуатации для конкретной батареи. Другие характеристики батареи, которые должны быть учтены при проектировании МВЭУ:

- температура;
- емкость;
- размер и номинальная мощность.

Зарядные токи должны быть способны выдерживать максимальные напряжения при потерях нагрузок или в случаях, когда батареи полностью заряжены и напряжение передается к другому устройству.

10.7.3 Электроэнергетическая сеть (системы соединения с сетью)

10.7.3.1 Основные положения

МВЭУ, предназначенные для соединения с электрической сетью, должны соответствовать требованиям 10.7.3.2—10.7.3.3.

10.7.3.2 Самовозбуждение

Любая цепь электрической схемы МВЭУ, которая допускает возникновение самовозбуждения, должна быть разомкнута и надежно удерживаться в разомкнутом состоянии в случае потери связи с сетью подключения.

Если конденсаторная батарея подключается параллельно с генератором МВЭУ (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 МВЭУ предусмотрены устройства, не допускающие его самовозбуждения, то в соответствующей документации должно быть указано, что самовозбуждение генератора исключено.

10.7.3.3 Гармоники тока и энергетическое состояние оборудования

Энергетические характеристики компонентов, таких как инверторы, регуляторы электроэнергии и статические компенсаторы реактивной мощности, должны быть спроектированы таким образом, чтобы гармоники токов и напряжений не интерферировали с защитным реле сети подключения. В особенности для МВЭУ, соединенных с сетью, гармоники тока, сгенерированного МВЭУ, должны быть такими, чтобы общая форма гармоник напряжения в точке соединения с сетью не превышала критические гармоники электрической сети.

10.7.4 Прямое присоединение к электромотору (например, водозабор)

МВЭУ, соединенные напрямую с электромотором, могут менять напряжение, ток и частоту. Следует убедиться в безопасной работе МВЭУ во всем рабочем диапазоне. Испытания на долговечность работы или другие испытания могут быть частью спецификации.

10.7.5 Прямая резистивная нагрузка (например, нагрев)

МВЭУ, соединенные напрямую с резистивной нагрузкой, могут менять напряжение, ток и частоту. Следует убедиться в безопасной работе МВЭУ во всем рабочем диапазоне. Испытания на долговечность работы или другие испытания могут быть частью спецификации.

МВЭУ, предназначенные для присоединения к резистивным нагрузкам, таким как тепловая нагрузка, должны использовать проводники, подходящие для меняющихся токов, напряжений и температур.

11 Несущие конструкции

11.1 Основные положения

Несущая конструкция является наиболее важным элементом МВЭУ. Она принимает на себя нагрузки от МВЭУ. Если площадь ветроколеса больше 2 м^2, то несущую конструкцию рассматривают как часть системы МВЭУ. Несущая конструкция должна соответствовать требованиям национальных стандартов.

Рекомендуется каждую МВЭУ, которая не может быть безопасно опущена на землю для обслуживания, обеспечивать системой тормозящего спуска для подъема, спуска и работы наверху башни.

11.2 Требования динамики

Резонанс несущей конструкции МВЭУ может быть очень важным проектным решением. При проектировании необходимо максимально избегать частоты системы МВЭУ, вызывающей чрезмерную вибрацию. Это чрезвычайно важно для несущей конструкции при строительстве.

11.3 Факторы окружающей среды

В процессе возведения, эксплуатации и технического обслуживания МВЭУ должны быть соблюдены указанные проектировщиком максимально допустимые величины факторов окружающей среды, описанные в разделе 6.

11.4 Заземление

Для снижения повреждений от молний несущая конструкция МВЭУ (включая канатные оттяжки) должна быть надлежащим образом заземлена.

11.5 Фундамент

Для МВЭУ с площадью ветроколеса больше 2 м^2 производитель должен указать требования к фундаменту, включая планировку фундамента и местоположение канатных оттяжек, с рекомендациями и требованиями по установке. Производитель должен обеспечить детальные чертежи образцов фундамента и указать подходящие условия грунта для проектных нагрузок на фундамент.

11.6 Предельные проектные нагрузки

Рассматриваются возникающие проектные нагрузки при нормальном обслуживании, включая восхождение, подъем и спуск на башне. Эти нагрузки должны согласоваться с допустимыми нагрузками, описанными в соответствующей документации.

12 Требования к документации

12.1 Основные положения

Документация по МВЭУ должна содержать описание всех видов работ по сборке, монтажу, наладке и вводу в эксплуатацию МВЭУ. В руководстве по эксплуатации и техническому обслуживанию МВЭУ должны быть подробно изложены операции по вводу в эксплуатацию, эксплуатации, техническому осмотру и обслуживанию МВЭУ. Документация по МВЭУ может состоять из одного или нескольких руководств для монтажников, владельца МВЭУ и обслуживающего персонала.

В документации должны быть приведены инструкции для безопасной эксплуатации МВЭУ. В документации должны быть указаны модель МВЭУ и ее серийный номер. Документация должна быть оформлена на *русском языке*.

12.2 Установка

12.2.1 Основные положения

Проектировщик оборудования должен обеспечить наличие необходимых чертежей, спецификаций и инструкций для выполнения сборочных, монтажных, подъемных, транспортных и строительных работ.

Документация по установке МВЭУ должна содержать информацию о всех допустимых нагрузках на оборудование при выполнении перечисленных выше работ. В документации по установке МВЭУ должна быть указана масса всех сборочных единиц, приведено описание технологии транспортировки, подъема, установки и монтажа оборудования.

В случае, если монтаж оборудования должен осуществлять только специально обученный персонал, то соответствующая информация должна быть приведена в документации по установке МВЭУ: «УСТАНОВКА ВЫПОЛНЯЕТСЯ ТОЛЬКО СПЕЦИАЛЬНО ОБУЧЕННЫМ ПЕРСОНАЛОМ».

Инструкции для выполнения подъемно-транспортных работ должны содержать требования к кранам, лебедкам и прочему подъемному и транспортному оборудованию, в т. ч. ко всем стропам, крюкам и другим инструментам, требующимся для безопасного подъема. На поднимаемых узлах и деталях должны быть четко обозначены точки для строповки. В инструкции должна быть приведена технология установки и дано указание по использованию конкретных инструментов, оснастки, приспособлений и приборов, требуемых для безопасной установки.

В документации по установке МВЭУ должны быть указаны виды и сроки испытаний всех компонентов МВЭУ.

В руководство по монтажу МВЭУ должна быть включена схема электрических соединений с международными обозначениями электрических машин со всей необходимой информацией для выбора кабелей и проводов, если их поставкой занимается покупатель.

12.2.2 Опорная конструкция

Для выбора опорной конструкции МВЭУ с площадью ометания меньше или равной 2 м^2 в документации должен быть приведен минимальный перечень следующей информации:

- подробные сведения механической части МВЭУ/крепление башни;
- подробные сведения электрической части МВЭУ/крепление башни;
- минимальное расстояние между лопастями и башней;
- максимальные нагрузки на высоте башни.

Для выбора опорной конструкции МВЭУ с площадью ометания более 2 м^2 вышеперечисленная информация должна быть дополнена в соответствии с 11.5.

12.3 Руководство по эксплуатации

В руководстве по эксплуатации должны быть описаны процедуры нормального включения и выключения МВЭУ. Руководство по эксплуатации должно включать в себя все соответствующие настройки системы контроля, такие как заданные значения аварийного отключения. Руководство по эксплуатации также должно охватывать комплексное описание всей системы для нормальной эксплуатации и ее прямое назначение.

Производитель должен предоставить инструкцию по выключению МВЭУ с указанием ограничения скорости ветра и других условий, в которых эта процедура может безопасно осуществляться. В руководстве по эксплуатации должна быть приведена контактная информация для сервисного обслуживания клиентов.

12.4 Руководство по техническому обслуживанию и осмотру

12.4.1 Основные положения

Производитель должен разработать руководство по техническому обслуживанию и осмотру. В руководстве по техническому обслуживанию и осмотру должны быть перечислены все требования и приведены описания работ по проведению технического обслуживания и осмотра МВЭУ.

Если в руководстве установлено требование о проведении технического обслуживания и осмотра только специально обученным и подготовленным для выполнения данных видов работ персоналом, то соответствующая информация должна быть приведена на титульном листе руководства по техническому обслуживанию и осмотру: «ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И ОСМОТР ВЫПОЛНЯЕТСЯ ТОЛЬКО СПЕЦИАЛЬНО ОБУЧЕННЫМ ПЕРСОНАЛОМ».

12.4.2 Техника безопасности

Инструкция по технике безопасности должна содержать подробное описание процедур:

- отключения нагрузки и/или источника энергии (см. 10.3);
- блокировки вращения ветроколеса;
- останова и закрепления механизма ориентации на ветер;
- останова и закрепления механизма поворота лопастей (при наличии).

Должна быть разработана инструкция для отключения МВЭУ от электрической сети.

Производитель должен разработать рекомендации для безопасного подъема на высоту башни оборудования и персонала.

12.4.3 Периодические технические осмотры

Производитель должен установить интервал проведения периодических технических осмотров МВЭУ, включая башню, трансмиссию, регулятор и ветроколесо. Производитель должен установить перечень компонентов МВЭУ, подлежащих периодическому техническому осмотру. Такой перечень должен включать в себя:

- лопасти ветроколеса;
- состояние кабелей (изношенность или скрученность, напряженность, растяжка, крепление);
- утечки смазки;
- крепеж (зажимы, клеммы, соединители).

Производитель должен предоставить перечень оборудования и измерений, необходимых для проверки нормального функционирования МВЭУ. Производитель должен установить диапазоны характеристик, критичных для безопасности МВЭУ, при которых обеспечивается нормальное функционирование МВЭУ. Производитель должен представить рекомендуемую форму журнала по техническому обслуживанию и осмотру, который должен вестись для каждой МВЭУ. В журнале должны быть отражены дата и время проведения технического обслуживания и осмотра, а также фамилии и имена специалистов, которые проводили техническое обслуживание и осмотр. Также в журнале могут быть представлены данные по аккумуляторным батареям, водяному насосу, преобразователям напряжения, тока, частоты и т. д. Любые важные события, корректирующие действия и другая информация, касающаяся технического состояния МВЭУ, должны быть зарегистрированы в соответствующих графах журнала.

12.4.4 Руководство по техническому обслуживанию

Производитель должен разработать руководство по периодическому техническому обслуживанию. Под периодическим техническим обслуживанием понимается любое обслуживание или ремонт, которые производитель считает необходимым проводить через определенный интервал времени для обеспечения нормального функционирования МВЭУ. Минимальный обязательный перечень работ, отнесенных к техническому обслуживанию:

- смазка узлов;
- испытание аварийного отключения;
- регулирование/замена тормозной системы;
- замена подшипников, щеток/контактных колец.

Если производитель установит, что МВЭУ должна быть отключена перед проведением регламентных работ, то соответствующая информация должна быть приведена в документации: «ВНИМАНИЕ: ПЕРЕД ВЫПОЛНЕНИЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСУЖИВАНИЯ ВЫПОЛНИТЕ НЕОБХОДИМУЮ ПРОЦЕДУРУ ДЛЯ ПРАВИЛЬНОГО ЗАВЕРШЕНИЯ РАБОТЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ».

В руководстве по техническому обслуживанию должно быть установлено требование о необходимости отражения в журнале по техническому обслуживанию и осмотру информации о проведенных работах по техническому обслуживанию и ремонту (требования в 12.4.3).

12.4.5 Выявление неисправностей

Производитель должен представить перечень неисправностей, которые могут быть выявлены и исправлены без привлечения специально обученного персонала. Такой перечень должен содержать перечень неисправностей, которые могут быть выявлены и исправлены квалифицированным оператором и не требуют специального испытательного оборудования или обученного персонала.

12.4.6 Безопасность персонала

В руководствах по установке, эксплуатации и техническому обслуживанию производитель должен представить информацию, необходимую для обеспечения безопасности персонала. Должна быть предоставлена информация: процедуры подъема, лестницы, опорные точки, применение средств индивидуальной защиты персонала. Производитель должен указать ограничения скорости ветра для подъема и/или спуска с башни.

Ограждения, защитные кожухи, закрывающие наружные движущиеся части трансмиссий, электрооборудования должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.003.

13 Маркировка малых ветроэнергетических установок

Каждая МВЭУ должна иметь маркировку. Маркировка должна быть выполнена четко и разборчиво. Маркировка должна быть нанесена несмываемой краской на хорошо видной части МВЭУ. Маркировка как минимум должна содержать следующую информацию:

- страна и наименование производителя МВЭУ;
- модель и серийный номер изделия;
- дата изготовления;
- номинальная мощность;
- номинальное напряжение и ток на клеммах МВЭУ с указанием диапазонов;
- частота тока на клеммах МВЭУ.

Дополнительно на маркировке могут быть указаны:

- масса башни;
- предельно допустимая скорость ветра;
- класс МВЭУ;
- ометаемая площадь ветроколеса;
- расчетная мощность;
- длина лопасти.

Приложение А
(справочное)

Сертификация типа малых ветроэнергетических установок

А.1 Общие положения

Процедура сертификации для больших и малых ВЭУ описана в *[13]*. Настоящий стандарт содержит требования, отличные от требований, установленных в *[13]*. В настоящем приложении содержатся рекомендации по сертификации МВЭУ для производителей и органов сертификации.

Сертификация типа ВЭУ согласно *[13]* и настоящему стандарту представлена на рисунке А.1.

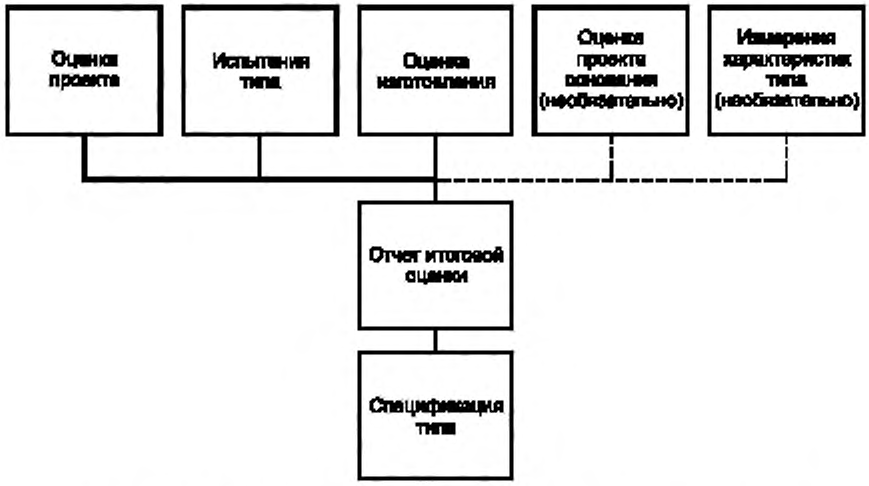


Рисунок А.1 — Сертификация типа ВЭУ согласно *[13]* и настоящему стандарту

А.2 Оценка проекта

Процедура оценки проекта ВЭУ согласно *[13]* содержит 10 элементов. Для процедуры оценки проекта МВЭУ согласно *[13]* необходимо выполнение только трех элементов. Однако рекомендуется выполнение еще двух элементов дополнительно к 10 обязательным элементам, что в общей сложности составит 12 элементов для ВЭУ. В качестве дополнительных элементов при проведении процедуры оценки проекта ВЭУ рекомендуется проведение испытаний для подтверждения проектных данных и статические испытания лопасти. Все 12 элементов представлены на рисунке А.2. Статические испытания лопасти, испытания для подтверждения проектных данных и испытания компонентов могут быть проведены производителем.

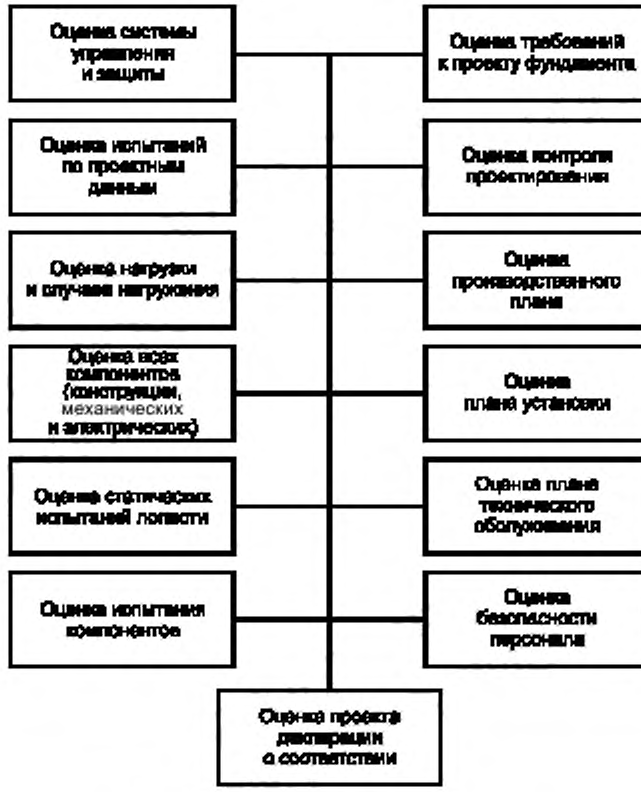


Рисунок А.2 — Элементы оценки проекта

А.3 Типовые испытания

Типовые испытания МВЭУ состоят из четырех элементов:

- испытания безопасности и функциональности;
- испытание производительности;
- испытание надежности;
- другие испытания (ЭМС, экологические и т. д.). Все элементы представлены на рисунке А.3.

Разница по сравнению с большими ВЭУ заключается в замене измерения нагрузки и испытания на выносливость лопасти испытанием надежности.

Все испытания осуществляются аккредитованной испытательной лабораторией, или удостоверяющий орган должен проверить, что сторона, проводящая тестирование, выполняет как минимум критерии *ГОСТ Р ИСО/МЭК 17020* или *ГОСТ ИСО/МЭК 17025* в установленном порядке.



Рисунок А.3 — Элементы испытаний типа

Приложение Б
(обязательное)

Проектные данные для конструирования малых ветроэнергетических установок класса *S*

При проектировании МВЭУ класса *S* в проектной документации должны быть указаны следующие данные.

Б.1 Технические характеристики ветроагрегата:

- номинальная мощность, кВт;
- рабочий интервал скоростей ветра на уровне оси ветроколеса от V_{in} до V_{out}, м/с;
- проектный срок службы, год;

Б.2 Параметры ветра:

- среднегодовая скорость ветра, м/с;
- осредненный угол наклона набегающего потока, °;
- распределение скорости ветра (Вейбулла, Рэлея и т. д.);
- модель турбулентности и параметры;
- экстремальные скорости ветра на уровне оси ветроколеса для периода повторяемости один год V_{e1} и 50 лет V_{e50}, м/с;
- модель экстремального порыва ветра и параметры для периода повторяемости один год и 50 лет;
- модель экстремального изменения направления и параметры для периода повторяемости 1 год и 50 лет;
- модель экстремального когерентного порыва ветра и параметры;
- модель экстремального когерентного порыва ветра с изменением направления и параметры.

Б.3 Характеристики сети подключения:

- номинальное напряжение и диапазон, В;
- номинальная частота и диапазон, Гц;
- асимметрия напряжений, В;
- наибольшая продолжительность отключения от сети, сут;
- количество отключений электрической сети, раз в год;
- цикл автоматического повторного включения (описание);
- режим работы при внешнем симметричном и несимметричном коротком замыкании (описание).

Б.4 Прочие условия окружающей среды, которые следует учесть (при их наличии):

- проектные условия для МВЭУ морского базирования (глубина воды, волновая обстановка и т. д.);
- нормальный и экстремальный диапазоны температур, °С;
- относительная влажность воздуха, %;
- плотность воздуха, кг/м^3;
- солнечная радиация, Вт/м^2;
- дождь, град, снег и гололед;
- химически активные вещества;
- механически активные частицы (запыленность атмосферы);
- описание системы молниезащиты;
- модель землетрясения и параметры;
- соленость, г/м^3.

Приложение В
(справочное)

Стохастические модели турбулентности

В.1 Общие положения

В настоящем приложении приведены две модели турбулентности для определения расчетной нагрузки. Параметры данных моделей учитывают требования 6.3.2. Предполагается, что турбулентные флуктуации скорости являются стационарным полем случайных векторов, составляющие которого имеют гауссовское статистическое распределение с нулевым математическим ожиданием. Спектральные плотности мощности даны в виде спектральной и экспоненциальной когерентной модели Каймала или изотропной модели фон Кармана.

В.1.1 Спектральная модель Каймала

Спектральные плотности мощности составляющих представлены в безразмерном виде уравнением:

$$\frac{fS_k(f)}{\sigma_k^2} = \frac{\dfrac{4fL_k}{V_{hub}}}{\left[\dfrac{(1+6fL_k)}{V_{hub}}\right]^{\frac{5}{3}}}, \qquad (B.1)$$

где f — частота, Гц;

k — индекс, указывающий направление составляющей вектора скорости (т. е. 1 — продольная, 2 — боковая и 3 — нормальная);

S_k — одномерный спектр составляющей вектора скорости;

L_k — интегральный масштаб k составляющей вектора скорости;

σ_k — среднеквадратичное отклонение k составляющей вектора скорости [см. формулу (В.2)]:

$$\sigma_k^2 = \int_0^\infty S_k(f)\,df, \qquad (B.2)$$

Спектральные параметры турбулентности модели Каймала приведены в таблице В.1.

Таблица В.1 — Спектральные параметры турбулентности модели Каймала

	Индекс составляющей вектора скорости (k)		
	1	2	3
Среднее квадратичное отклонение составляющей вектора скорости σ_k	σ_1	$0{,}8\,\sigma_1$	$0{,}5\,\sigma_1$
Интегральный масштаб вдоль направления k составляющей вектора скорости L_k	$8{,}1\,\Lambda_1$	$2{,}7\,\Lambda_1$	$0{,}66\,\Lambda_1$
Примечание — σ_1 и Λ_1 — среднеквадратичное отклонение и масштаб турбулентности, установленные в настоящем стандарте.			

В.2 Экспоненциальная когерентная модель

Для вычисления структуры пространственной корреляции продольной составляющей вектора скорости может использоваться следующая экспоненциальная когерентная модель совместно с автоспектральной моделью Каймала:

$$\mathrm{Coh}(r,f) = \exp\left\{-8{,}8\left[\left(\frac{f\cdot r}{V_{hub}}\right)^2 + \left(\frac{0{,}12r}{L_c}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}\right\}, \qquad (B.3)$$

где $\mathrm{Coh}(r, f)$ — функция когерентности, определенная совокупной величиной взаимной спектральной плотности продольных составляющих вектора скорости в двух пространственно удаленных точках, разделенных автоспектральной функцией;

r — величина проекции вектора разделения между двумя точками на плоскость, перпендикулярную направлению вектора средней скорости ветра;

f — частота, Гц;

$L_c = 3{,}5\,\Lambda_1$ — масштаб когерентности.

В.3 Модель изотропной турбулентности фон Кармана

Спектр продольной составляющей вектора скорости в данном случае представлен в виде выражения:

$$\frac{fS_1(f)}{\sigma_1^2} = \frac{\frac{4fL}{V_{ветр}}}{\left[1+71\left(\frac{fL}{V_{ветр}}\right)^2\right]^{\frac{5}{6}}}, \qquad (В.4)$$

где f — частота, Гц;

$L = 3{,}5\ \Lambda_1$ — изотропный интегральный масштаб;

σ_1 — среднеквадратичное отклонение продольной составляющей вектора скорости на высоте оси ветроколеса.

Боковые и вертикальные спектры составляющей вектора скорости представлены зависимостями:

$$\frac{fS_2(f)}{\sigma_2^2} = \frac{fS_3(f)}{\sigma_3^2} = \frac{2fL}{V_{ветр}} \cdot \frac{1+189\cdot\left(\frac{fL}{V_{ветр}}\right)^2}{\left[1+71\left(\frac{fL}{V_{ветр}}\right)^2\right]^{\frac{11}{6}}}, \qquad (В.5)$$

где L — изотропный интегральный масштаб [см. формулу (В.4)];

$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_1$ — среднеквадратичное отклонение k-й составляющей вектора скорости.

Функция когерентности представлена выражением:

$$\mathrm{Coh}\,(r, f) = \frac{2^{\frac{1}{6}}}{\Gamma(5/6)}\left(x^{5/6}\,K_{5/6}(x) - 0{,}5x^{11/6}\,K_{1/6}(x)\right). \qquad (В.6)$$

где $x = 2\pi\left[\left(f\cdot\frac{r}{V_{ветр}}\right)^2+\left(0{,}12\cdot\frac{r}{L}\right)^2\right]^{0{,}5}$;

r — это расстояние между неподвижными точками;

L — изотропный интегральный масштаб;

Γ — гамма-функция;

K — дробный порядок, модифицированная функция Бесселя.

Формула (В.6) может быть аппроксимирована экспоненциальной зависимостью [см. формулу (В.3)] с заменой L_c на изотропный интегральный масштаб L.

Приложение Г
(справочное)

Детерминированная модель турбулентности

Детерминированная модель турбулентности в нормальных условиях ветра применима для ВЭУ, у которых режимы вибрации ветроколеса достаточно быстро затухают. Обеспеченность затухания может быть проверена с помощью простой стохастической модели для вращательно выбранной скорости ветра. В этой верификационной модели проверки независимы, последовательно некоррелированное случайное приращение со среднеквадратичным отклонением 5 % от среднего значения добавляется к средней скорости ветра каждой лопасти на каждом шаге по времени в динамической модели моделирования ВЭУ. Предполагается, что каждая лопасть полностью погружена в мгновенные поля скорости. Анализируются изменения во времени параметров моделируемых лопастей, т. е. прогибы (отклонения) вершин лопастей и точек приложения изгибающего момента (действующие на плоскость и на ребро). Данный анализ состоит в определении отношения амплитуд высших гармоник к основной амплитуде при частоте вращения. Если эти отношения меньше чем 1,5, то может быть использована следующая детерминированная модель.

Продольную составляющую вектора скорости определяют по следующей формуле:

$$v1(y, z,t) = V(z) + A1 \sin(2\pi f_1 t) + A_2 y \sin(2\pi(f_2 t + 1/4 \sin(2\pi f_3 t)) + A_2 z \sin(2\pi(f_2 t + 1/4 \cos(2\pi f_3 t))), \quad (Г.1)$$

где $(y; z)$ — боковые и вертикальные координаты точек на аэродинамической поверхности ветроколеса ВЭУ с началом в центре ветроколеса.

Боковую составляющую вектора скорости определяют по следующей формуле:

$$v_2(t) = A_3 \sin\left(2\pi\left(f_4 t + \frac{1}{4\sin(2\pi f 5t)}\right)\right). \quad (Г.2)$$

Боковую составляющую вектора скорости можно принять постоянной на всей ометаемой площади ветроколеса.

Для предыдущей скоростной модели ветра параметры амплитуды и частоты определяют из следующих соотношений.

Параметры амплитуды:

$A_1 = 2{,}0\ \sigma_1$;

$A_2 = \frac{A_1}{D}$;

$A_3 = 0{,}8$.

Параметры частоты A_1:

$f_1 = 0{,}0194 \frac{V_{hub}}{\Lambda}$;

$f_2 = 4{,}0\ f1$;

$f_3 = \frac{f_1}{10{,}0}$;

$f_4 = 0{,}6\ f_1$;

$f_5 = \frac{f_4}{10{,}0}$.

где σ_1 — среднеквадратичное отклонение скорости ветра на высоте оси ветроколеса;
Λ_1 — масштабный параметр турбулентности;
V_{hub} — скорость ветра на высоте оси ветроколеса, осредненная за 10 мин.;
D — диаметр ветроколеса ВЭУ.

Боковые и продольные составляющие скорости вместе определяют мгновенную скорость ветра на высоте оси ветроколеса, а для направления ветра используют выражения:

$$V_{hub}(t) = ((v_1(0,0,t))^2 + (v_2(t))^2)^{0,5}$$

$$\theta_{hub}(t) = \operatorname{arctg}\frac{v_2(t)}{v_1(0,0,t)}. \quad (Г.3)$$

Приложение Д
(справочное)

Коэффициенты безопасности для материалов

Д.1 Общие положения

В настоящем приложении приведены рекомендации по выбору коэффициентов безопасности для материалов.

Д.2 Обозначения

F — дополнительный коэффициент безопасности, учитывающий геометрические характеристики расчетных сечений в композиционных материалах;

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

P — обеспеченность;

R — отношение минимального напряжения к максимальному напряжению в цикле усталости;

S_i — уровень напряжения (деформации), зависящий от подсчитанного числа циклов в i выборке, мПа;

V_f — объемная доля волокна;

γ_m — парциальный коэффициент безопасности для материала;

δ — коэффициент вариации.

Д.3 Нормативная и расчетная величины нагрузки для материала

Предел выносливости элемента конструкции зависит от его размеров, состояния его поверхности, наличия концентраторов напряжений и т. д.

Нормативное значение свойств материала — величина, учитывающая прочностные свойства элементов конструкции с учетом свойств материалов, основана на определенном уровне статистической вероятности и достоверности. В настоящем стандарте нормативная величина нагрузки основана на 95 % вероятности с 95 % границами доверительного интервала.

Расчетная нагрузка — величина, полученная в результате расчета рассматриваемого варианта нагружения по принятой модели с учетом свойств материала.

Расчетную нагрузку, учитывающую свойства материала, определяют по формуле:

$$f_d = \frac{1}{\gamma_m} f_k , \qquad (Д.1)$$

где f_d — расчетная нагрузка, учитывающая свойства материала;

γ_m — парциальный коэффициент безопасности для материала;

f_k — нормативное значение свойств материала.

Для получения нормативного значения свойств материала применяются различные функции распределения прочности материалов, представленные на рисунке Д.1. Плотность распределения прочности металлов (и других однородных материалов) подчиняется нормальному закону распределения, а композиционных материалов — обычно распределению Вейбулла.

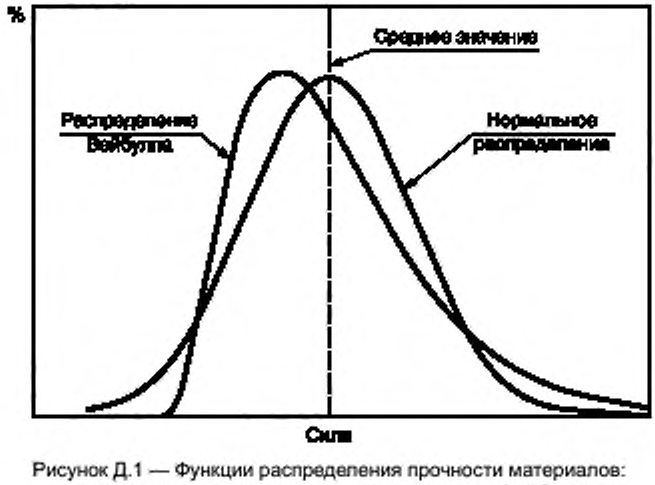


Рисунок Д.1 — Функции распределения прочности материалов: нормальное распределение и распределение Вейбулла

Парциальные коэффициенты безопасности для материалов γ_m устанавливаются при 95 % вероятности выживания с уровнем доверительной вероятности 95 %. Если коэффициенты безопасности для материалов были получены при вероятности, отличной от 95 %, то должны быть выполнены их поправки (умножением) на коэффициенты, приведенные в таблице Д.1 и подчиняющиеся нормальному закону распределения прочности материалов.

Таблица Д.1 — Поправочные коэффициенты для элементов с δ >10 %

p, %	δ = 10 %	δ = 15 %	δ = 20 %	δ = 25 %	δ = 30 %
99	0,93	0,95	0,97	1,02	1,06
98	0,96	0,99	1,03	1,09	1,15
95	1,00	1,05	1,11	1,2	1,3
90	1,04	1,11	1,20	1,32	1,45
80	1,08	1,18	1,31	1,47	1,65

Д.4 Парциальные коэффициенты безопасности для материалов

Д.4.1 Общие положения

Определение парциальных коэффициентов безопасности для материалов, используемых в данном стандарте, соответствует *ГОСТ 27.301*. Различные стандарты подразделяют парциальные коэффициенты безопасности для материалов γ_m на несколько составляющих коэффициентов, учитывающих различные типы неопределенности свойств материалов. В данном стандарте рекомендуется учитывать следующие виды неопределенностей свойств материалов (факторы):

- соответствие свойств и конфигурации испытуемого материала свойствам и конфигурации материала элемента конструкции;
- метод проведения испытаний;
- полный диапазон нагрузок;
- учет воздействия окружающей среды;
- учет влияния геометрических параметров.

Парциальные коэффициенты безопасности для материалов, приведенные в этом стандарте, соответствуют так называемым главным парциальным коэффициентам безопасности для материалов, учитывающих пять вышеперечисленных неопределенностей свойств материалов. Составляющие коэффициенты главного парциального коэффициента безопасности для материалов устанавливаются отдельно по каждому из факторов. При отсутствии испытаний по одному из пяти факторов следует провести корректировку главного коэффициента безопасности для материала. Например, если не было учтено воздействие окружающей среды, то необходимо парциальный коэффициент безопасности для материалов умножить на соответствующий коэффициент, учитывающий воздействие окружающей среды.

Д.4.2 Композиционные материалы

Парциальные коэффициенты безопасности для композиционных материалов должны быть не менее:

- на основе стекловолокна γ_m = 7,4;
- на основе углеволокна γ_m = 3,7.

Парциальные коэффициенты безопасности для композиционных материалов должны учитывать воздействие окружающей среды, геометрические размеры элемента и т. д.* Учет геометрических неоднородностей материала в «главном» парциальном коэффициенте должен производиться в соответствии с Д.5. Характерные усталостные кривые S — N для композиционных материалов приведены на рисунках Д.2 — Д.4.

* *Дополнительная информация приведена в [14].*

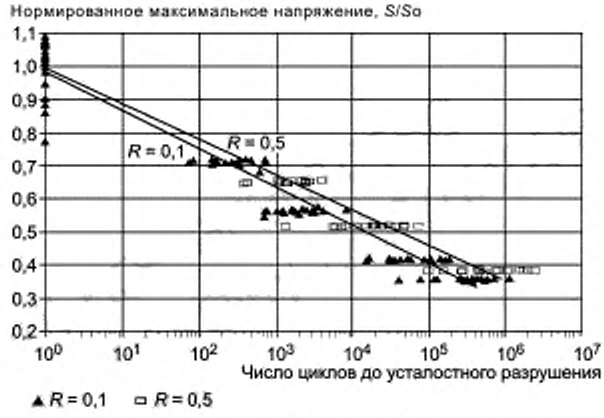


Рисунок Д.2 — Характерные усталостные кривые *S* — *N* для композиционного материала на основе стекловолокна

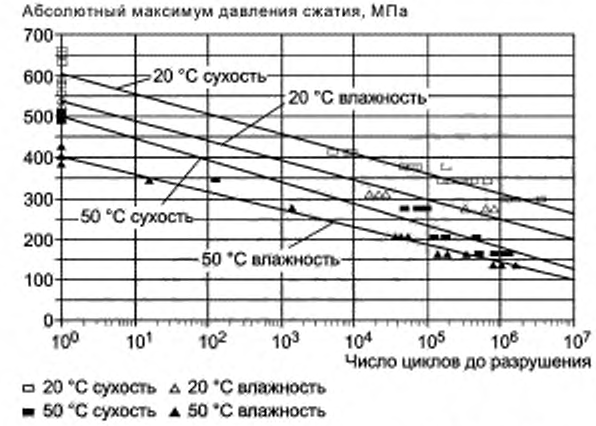


Рисунок Д.3 — Характерные зависимости прочности композиционного материала на основе стекловолокна от влажности

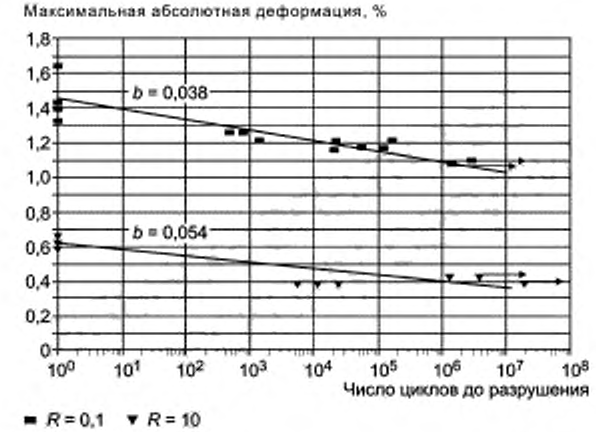


Рисунок Д.4 — Характерные усталостные кривые *S* — *N* для композиционного материала на основе углерода/винилэфира

Д.4.3 Металлы

Парциальные коэффициенты безопасности для металлов (согласно *[16]*) должны быть не менее:

- сталь — 1,9;
- алюминий — 3,5.

Характерные усталостные кривые *S* — *N* для композиционных материалов представлены на рисунке Д.5.

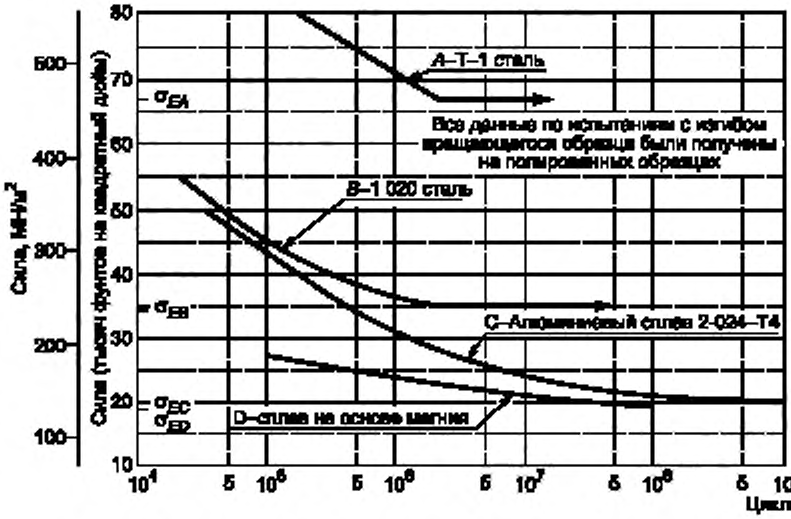


Рисунок Д.5 — Характерные усталостные кривые *S* — *N* для металлов

Учет фактора окружающей среды в виде коррозии материала в главном парциальном коэффициенте должен быть произведен с помощью следующих коэффициентов: сталь — 1,3; алюминий — 1,3; титан — 4,2.

Примечание — Данные коэффициенты — в соответствии с [17].

Д.4.4 Древесина

Парциальные коэффициенты безопасности для мягкой древесины должны быть не менее: 3,4 (значение установлено в соответствии с *[18]*). Поправочный коэффициент, учитывающий факторы окружающей среды, — 1,6 (значение установлено в соответствии с *[19]*). Если не проводятся испытания по выявлению поправочного коэффициента, учитывающего геометрические особенности компонентов, то рекомендуется принимать его равным 2,8 (значение установлено в соответствии с *[20]*).

Дополнительная информация приведена на рисунках Д.6 — Д.10.

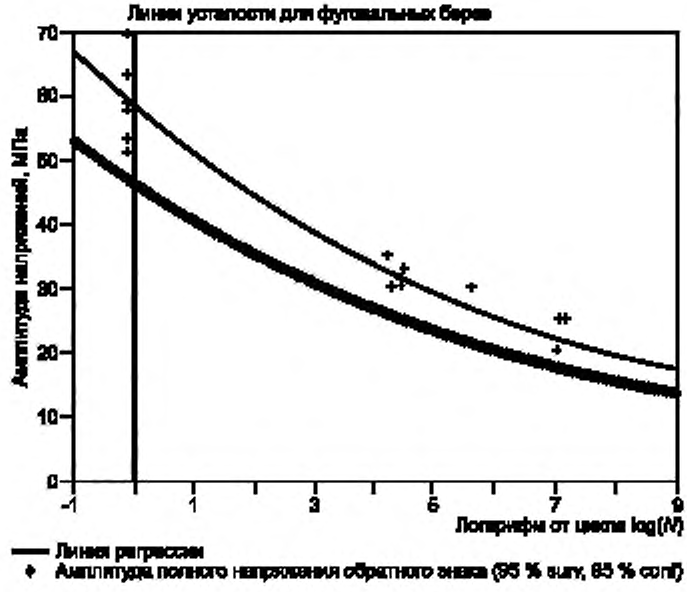


Рисунок Д.6 — Усталостные кривые *S* — *N* для фуговальной мягкой древесины

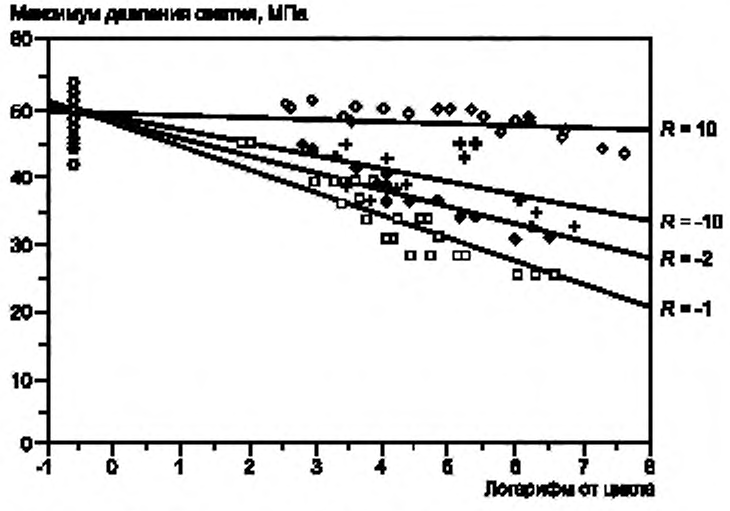


Рисунок Д.7 — Характерные усталостные кривые *S* — *N* для древесины

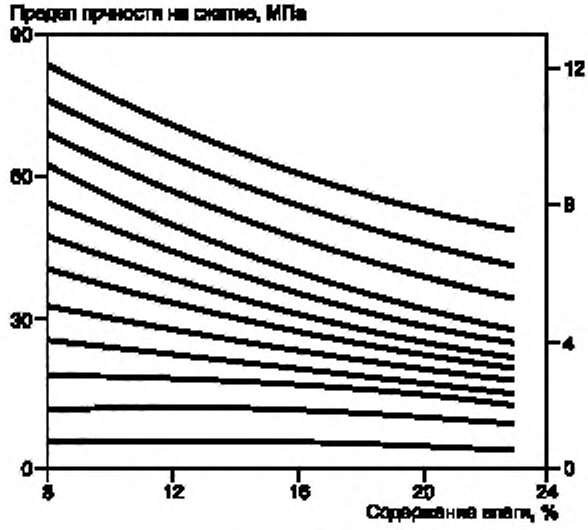
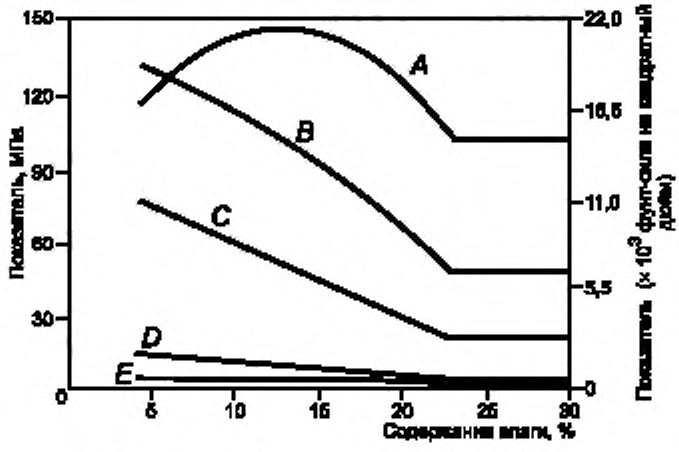


Рисунок Д.8 — Зависимость предельной прочности
(при сжатии до образования щепок) древесины от влажности



A — напряженность, параллельная волокну (зернистости);
B — изгиб; *C* — сжатие, параллельное волокну (зернистости);
D — сжатие, перпендикулярное волокну (зернистости);
E — напряженность, перпендикулярная волокну (зернистости)

Рисунок Д.9 — Зависимости прочности древесины от влажности



Q/P — отношение механического свойства к волокнистости (зернистости) (*P*);
n — эмпирический коэффициент

Рисунок Д.10 — Влияние угла зерна на механические свойства чистой древесины согласно формуле Хэнкинсона

Д.5 Влияние геометрических параметров

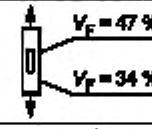
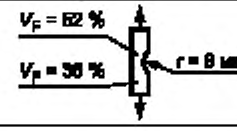
При проектировании следует учитывать геометрические особенности элементов. В международной практике учет влияния геометрических особенностей на прочность однородных материалов следует производить в соответствии с *[20]*, для композиционных материалов — в соответствии с таблицей Д.2.

В таблице Д.2 (см. *[15]*) приведены дополнительные коэффициенты *F*, учитывающие влияние геометрических параметров (неоднородностей) на безопасность материала, на которые должны быть пересчитаны главные парциальные коэффициенты безопасности для материала (см. Д.4.1).

Таблица Д.2 — Коэффициенты *F*, учитывающие влияние геометрических параметров (неоднородностей) на безопасность материала

Деталь	Эскиз		F
Простой образец для испытания (ровный материал)			1,0
Стена балки жестко прикреплена			1,2
Треснувший поперечный участок 90 °			1,0
Единственный внутренний слой, ответвленный на 0 °		$V_F < 0,4$	1,2
		$V_F < 0,4$	—

Окончание таблицы Д.2

Деталь	Эскиз		F
Двойной внутренний слой, ответвленный на 0 °		$V_F < 0,4$	1,6
		$V_F < 0,4$	1,0
Увеличение по высоте процента содержания волокна			1,4
Поверхность заглубления (V_F увеличена, толщина уменьшена на 25 %)			2,5

Приложение Е
(справочное)

Элементарные уравнения

Е.1 В настоящем приложении применяются следующие обозначения:

A — ометаемая площадь ветроколеса, м^2;
A_{pro} — часть ометаемой площади, спроецированной на плоскость, перпендикулярную направлению ветра, м^2;
B — число лопастей;
c — хорда лопасти, м;
C_d — коэффициент аэродинамического сопротивления;
C_f — коэффициент силы;
C_l — коэффициент подъемной силы;
C_p — коэффициент мощности;
C_T — коэффициент осевой нагрузки;
D — диаметр ветроколеса, м;
e_r — эксцентриситет: расстояние от центра тяжести ветроколеса до оси вращения, м;
F — сила, Н;
F_{zB} — сила в направлении оси z на лопасти в основание лопасти, Н;
$F_{x\text{-}shaft}$ — осевая нагрузка на вал, Н;
g — коэффициент ускорения силы свободного падения, принимаемый равным 9,81 м/с^2;
G — коэффициент короткого замыкания для генератора;
I_B — момент инерции лопасти, кг·м^2;
L_{rt} — расстояние между центром ветроколеса и вертикальной осью поворота, м;
L_{rb} — расстояние между центром ветроколеса и первым подшипником, м;
m_B — масса лопасти, кг;
m_r — масса ветроколеса, складывающаяся из массы лопастей и массы ступицы, кг;
M_{xB}, M_{yB} — изгибающие моменты на конце лопасти по осям x и y, Н · м;
M_{brake} — крутящий момент при торможении ВЭУ, Н · м;
$M_{x\text{-}shaft}$ — крутящий момент на валу ветроколеса в точке первого подшипника, Н · м;
M_{shaft} — изгибающий момент в точке первого подшипника, Н · м;
n — число оборотов ветроколеса, об/мин;
P — электрическая мощность, Вт;
Pr — мощность ветроколеса, Вт;
Q — крутящий момент ветроколеса, Н · м;
r — радиальные координаты, м;
R — радиус ветроколеса, м;
R_{cog} — расстояние между центром тяжести лопасти и центром ветроколеса, м;
V — скорость ветра, м/с;
V_{ave} — среднегодовая скорость ветра на высоте оси ветроколеса, м/с;
V_{design} — расчетная скорость ветра, определяемая как 1,4 · V_{ave}, м/с;
V_{eN} — ожидаемая экстремальная скорость ветра (средняя за 3 с) с периодом повторяемости N лет;
V_{e1} и V_{e50} — экстремальные скорости ветра с периодами повторяемости один год и 50 лет соответственно, м/с;
V_{hub} — скорость набегающего воздушного потока на высоте оси ветроколеса, осредненная за 10 мин., м/с;
V_{tip} — скорость ветра на конце лопасти, м/с;
W — относительная скорость ветра, м/с;
Δ — интервал;
γ — угол отклонения от основного направления, угол рыскания;
η — КПД компонентов электрической мощности (как правило, генератор, мультипликатор и система преобразования);
λ — коэффициент окружной скорости;
λ_{e50} — коэффициент окружной скорости с периодом повторяемости 50 лет;
ρ — плотность воздуха, принимаемая 1,225 кг/м^3;
ψ — угол азимута ветроколеса (0°, лопасти вертикально вверх);
ω_n — скорость вращения ветроколеса, рад/с;
ω_{yaw} — угловая скорость вращения ветроколеса, рад/с.

Индексы:
ave — средняя величина;
B — лопасть;

design — проектный параметр;
H — горизонтально-осевое ветроколесо;
hub — высота оси ветроколеса;
max — максимальный;
proj — проектный;
r — ветроколесо;
shaft — вал.

Е.2 Общие положения

В настоящем приложении приведены элементарные уравнения для расчета проектных нагрузок. Вывод уравнений позволяет:

- лучше понимать применимость элементарных уравнений при проектировании;
- понимать физическую сущность происходящих процессов, например, при управлении МВЭУ;
- проектировщикам получить нужные формулы для учета конкретных проектов.

Частоту вращения ветроколеса ω_n, рад/с, определяют по формуле:

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}, \tag{Е.1}$$

где n — проектное число оборотов ветроколеса, об/мин.

Тогда быстроходность λ определяют по формуле:

$$\lambda = \frac{V_{tip}}{V_{hub}} = \frac{\omega_n R}{V_{hub}} = \frac{R}{V_{hub}} \frac{\pi n}{30}, \tag{Е.2}$$

где V_{tip} — скорость ветра на конце лопасти, м/с;
V_{hub} — скорость набегающего воздушного потока на высоте оси ветроколеса;
R — радиус ветроколеса.

Крутящий момент ветроколеса Q определяют по формуле:

$$Q = \frac{P_r}{\omega_n} = \frac{P_r}{\eta \omega_n} = \frac{30P}{\eta \pi n}, \tag{Е.3}$$

где Q — крутящий момент ветроколеса, Н · м;
P_r — мощность ветроколеса, Вт;
P — электрическая мощность, Вт.

В ряде формул также используются:

- V_{design} — расчетная скорость ветра, определенная как $1{,}4V_{ave}$, где V_{ave} зависит от класса ВЭУ;
- P_{design} и n_{design} — соответственно проектные мощность и частота вращения ветроколеса, зависящие от расчетной скорости V_{design}.

Е.3 Расчетный случай нагрузки *A* «Нормальный режим работы»

Случай расчетной нагрузки *A* «Нормальный режим работы» — усталостная нагрузка в постоянном диапазоне. Диапазон частоты вращения ветроколеса принимается от 0,5 до 1,5 от проектной.

При изменении n в диапазоне от $0{,}5n_{design}$ до $1{,}5n_{design}$ получается диапазон изменения силы F_z (переменная скорость вращения ветроколеса), который определяют по формуле:

$$\Delta F_{zB} = m_B R_{cog} \left(\frac{\pi 1{,}5 n_{design}}{30} \right)^2 - m_B R_{cog} \left(\frac{\pi 0{,}5 n_{design}}{30} \right)^2 = 2 m_B R_{cog} \left(\frac{\pi n_{design}}{30} \right)^2 = 2 m_B R_{cog} \omega^2_{design}, \tag{Е.4}$$

где m_B — масса лопасти;
R_{cog} — расстояние между центром тяжести лопасти и центром ветроколеса;
n_{design} — расчетное число оборотов ветроколеса, соответствующее скорости вращения ветроколеса V_{design}.

Изгибающий момент на вершине лопасти состоит из меняющегося в диапазоне крутящего момента (в диапазоне от $1{,}5Q_{design}$ до $0{,}5Q_{design}$ для каждой лопасти) и силы тяжести от веса лопасти:

$$\Delta M_{xB} = (Q_{design}/B) + 2 m_B g R_{cog}. \tag{Е.5}$$

В усложненном виде момент вычисляют по формуле:

$$F_{axial} = C_T (1/2) \rho V^2_{hub} A = C_T (1/2) \rho V^2_{hub} \pi R^2, \tag{Е.6}$$

$$Pr = C_p(1/2)\,\rho\,V^3{}_{hub}\,A = C_p\,(1/2)\,\rho V^3{}_{hub}\pi\,R^2, \quad (E.7)$$

где ρ — плотность воздуха, принятая 1,225, кг/м^3;
A — ометаемая площадь ветроколеса, м^2;
R — радиус ветроколеса, м;
Pr — мощность ветроколеса, Вт.

Учитывая, что C_T равно 3/2 C_p, и решая уравнения (Е.6) и (Е.7), получаем:

$$F_{axial} = (3/2) \cdot (P_r / V_{hub}). \quad (E.8)$$

При подстановке V_{hub} из уравнения (Е.2) и P_r из уравнения (Е.3) получают осевую силу по формуле:

$$F_{axial} = \frac{3}{2}\frac{30\lambda}{R\pi n}P_r = \frac{3}{2}\frac{30\lambda}{R\pi n}\frac{Q\pi n}{30} = \frac{3}{2}\frac{\lambda Q}{R}. \quad (E.9)$$

Момент, действующий на расстоянии 2/3R по оси лопасти, определяют по формуле:

$$M_{yB} = \frac{\lambda Q}{B}. \quad (E.10)$$

Диапазон изменения изгибающего момента на вершине лопасти ΔM_{yB} определяют с учетом того, что Q_{design} изменяется от 0,5 Q_{design} до 1,5Q_{design}, по формуле:

$$\Delta M_{yB} = \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{B}. \quad (E.11)$$

Осевая нагрузка на валу равна осевой нагрузке ветроколеса, как указано в формуле (Е.9):

$$\Delta F_{x\text{-}shaft} = \frac{3}{2}\frac{\lambda_{design} Q_{design}}{B}. \quad (E.12)$$

Диапазон изменения крутящего момента на валу определяют, исходя их данных по крутящему моменту и дисбаланса массы ветроколеса (эксцентриситет). Термин «эксцентриситет» предполагает, что центр массы ветроколеса смещен от вала на 0,005R (если нет точных данных). Диапазон изменения крутящего момента на валу определяют по формуле:

$$\Delta M_{x\text{-}shaft} = Q_{design} + 2m_r g e_r. \quad (E.13)$$

Изгиб вала, как предполагается, максимален в точке расположения первого подшипника. Для изгибающего момента на валу должны быть приняты во внимание масса ветроколеса и осевая «эксцентриситетная» нагрузка (вызвана сдвигом ветра).

Приняв значение эксцентриситета равным R/6, диапазон изменения суммарного момента на валу вычисляют по формуле:

$$\Delta M_{shaft} = 2m_r g L_{rb} + \frac{R}{6}\Delta F_{x\text{-}shaft}, \quad (E.14)$$

где L_{rb} — расстояние между центром ветроколеса и первым подшипником;
m_r — масса ветроколеса (лопасти, ступицы и т. д.).

Е.4 Расчетный случай нагрузки *B* «Установка МВЭУ на ветер»

Изгибающий момент на конце лопасти складывается из центробежной силы, гироскопической и осевой нагрузки.

Центробежную силу определяют по формуле:

$$M_{yB,centrifugal} = m_B \omega^2_{yaw\,max} L_{rt} R_{cog}, \quad (E.15)$$

где L_{rt} — расстояние между центром лопасти ветроколеса и вертикальной осью вращения, м.

Гироскопический момент на лопасти, вызванный изменением частоты вращения и угловой скоростью вращения, определяют по формуле:

$$M_{yB,gyroscopic} = \int_0^R 2\omega_n \omega_{yaw} \cos\psi r^2 m(r) dr = 2\omega_{yaw} I_B \omega_n \cos\psi, \quad (E.16)$$

где $M_{yB,\,gyroscopic}$ достигает максимального значения для $\psi = 0$.

Последний показатель определяется для смещения осевой силы, вызванной изменением скорости или направления ветра. Изгибающий момент на лопасти ветроколеса при условии его вращения с n_{design} (перемещается с $\omega_{yaw,max}$ относительно башни) определяют по формуле:

$$M_{yB} = m_B \omega^2_{yaw,max} L_n R_{cog} + 2\omega_{yaw,max} I_B \omega_{rotdesign} + \frac{R}{9}\Delta F_{x\text{-}shaft}. \quad (E.17)$$

Момент на валу ветроколеса M_{shaft} определяют аналогично методике, рассмотренной выше, при определении момента на ветроколесе при $\omega_{yaw,\ max}$. Для двух лопастных ВЭУ учитывают азимутальное изменение инерции, и M_{shaft} определяют по формуле:

$$M_{shaft} = 2B\omega_{yaw,max} I_B \omega_{n,design}. \quad (E.18)$$

Для трех или более лопастных ВЭУ азимутальное изменение инерции является достаточно малым, поэтому им можно пренебречь, и M_{shaft} определяют по формуле:

$$M_{shaft} = B\omega_{yaw,max} I_B \omega_{n,design}. \quad (E.19)$$

Момент на валу ветроколеса M_{shaft} с учетом собственного веса ветроколеса и центробежной силы, вызванной дисбалансом масс ветроколеса, определяют по следующим формулам.

Для двух лопастных МВЭУ момент на валу ветроколеса M_{shaft} определяют по формуле:

$$M_{shaft} = 2B\omega_{yaw,max} I_B \omega_{n,design} + m_t g L_{rb} + \frac{R}{9}\Delta F_{x\text{-}shaft}, \quad (E.20)$$

где L_{rb} — расстояние между центром ветроколеса и начала опоры, м.

Для трех или более лопастных МВЭУ момент на валу ветроколеса M_{shaft} определяют по формуле:

$$M_{shaft} = B\omega_{yaw,max} I_B \omega_{n,design} + m_t g L_{rb} + \frac{R}{9}\Delta F_{x\text{-}shaft}, \quad (E.21)$$

где L_{rb} — расстояние между центром ветроколеса и начала опоры, м.

Е.5 Расчетный случай нагрузки *C* «Поворот с отклонением (рассогласование, ошибка)»

Затормаживание вращающейся ВЭУ приводит к ошибкам. Возможна критическая перегрузка, если у ветроколеса есть ошибка по установке на ветер и мгновенный ветер ставит всю лопасть под углом атаки максимальной подъемной силы. Следующий анализ — упрощенное представление этого состояния.

Относительную скорость ветра на лопасти ветроколеса определяют по формуле:

$$W = r\omega_n + V_{hub}\sin\gamma\cos\psi. \quad (E.22)$$

В формуле (Е.22) не учтена нормальная составляющая относительной скорости ветра, которая, как правило, мала по сравнению с тангенциальной составляющей.

Изгибающий момент на вершине лопасти определяют по формуле:

$$M_{yB} = \frac{1}{2}\rho c_{ave} C_{l,max} \int_0^R r(r\omega_n + V_{hub}\sin\gamma\cos\psi)^2 dr, \quad (E.23)$$

и он достигает максимального значения при $\psi = 0$.

Интегрируя данное выражение, получают:

$$M_{yB} = \frac{1}{2}\rho c_{ave} C_{l,max}\left[\frac{1}{4}R^4\omega_n^2 + \frac{2}{3}R^3\omega_n V_{hub}\sin\gamma + \frac{1}{2}R^2 V_{hub}^2\sin^2\gamma\right]. \quad (E.24)$$

При ошибке поворота на 30° изгибающий момент на вершине лопасти определяют по формуле:

$$M_{yB} = \frac{1}{8}\rho A_{proj,B} C_{l,max} R^2 \omega^2_{n,design}\left[1 + \frac{4}{3\lambda_{design}} + \left(\frac{1}{\lambda_{design}}\right)^2\right]. \quad (E.25)$$

Е.6 Расчетный случай нагрузки *D* «Максимальная ударная нагрузка»

Осевую нагрузку на вал определяют по формуле:

$$\Delta F_{x\text{-}shaft} = C_T \frac{1}{2}\rho(2{,}5V_{ave})^2 \pi R^2 , \quad (Е.26)$$

где C_T — коэффициент осевой нагрузки, равный 0,5.

Данная зависимость получена на основе аэроупругой модели. Использование в формуле (Е.26) комбинации $2{,}5V_{ave}$ и C_T = 0,5 дали результаты, сопоставимые с результатами по аэроупругим моделям.

Е.7 Расчетный случай нагрузки *E* «Максимальная скорость вращения ветроколеса»

В качестве нагрузки на лопасти рассматривается только центробежная сила, которую определяют по формуле:

$$F_{zb} = m_B R_{cog}\left(\frac{\pi n_{max}}{30}\right)^2 = m_B \omega_{r,max}^2 R_{cog} . \quad (Е.27)$$

Момент на валу определяется с учетом изгибающего момента и момента, вызванного центробежной силой из-за дисбаланса масс ветроколеса на расстоянии e_r (эксцентриситет) от центра вала, при отсутствии вращения по формуле:

$$M_{shaft} = M_{r\ mass} + M_{r\ imbalance} = m_r g L_{rb} + m_r e_r \omega_{n,max}^2 L_{rb} . \quad (Е.28)$$

Е.8 Расчетный случай нагрузки *F* «Короткое замыкание»

Этот расчетный случай нагрузки связан с током короткого замыкания в генераторе. В таблице Е.1 приведены коэффициенты для учета нагружения при КЗ в генераторе *G*.

Таблица Е.1

Генератор	Коэффициент *G*
Синхронный или асинхронный	2
Генератор на постоянных магнитах	2

Момент при КЗ определяют с учетом расчетного крутящего момента ветроколеса, умноженного на коэффициент *G* по формулам:

$$M_{x\text{-}shaft} = GQ_{design} , \quad (Е.29)$$

$$M_{x,B} = \frac{GQ_{design}}{B} + m_B g R_{cog} . \quad (Е.30)$$

Е.9 Расчетный случай нагрузки *G* «Нормальный останов»

Вращающий момент вала складывается из момента торможения и проектного вращающего момента ветроколеса:

$$M_{x\text{-}shaft} = M_{brake} + Q_{design} , \quad (Е.31)$$

где M_{brake} — тормозной момент на низкой скорости вращения вала. Он достигает максимального значения в момент, когда нагрузка равна номинальной.

Предполагается, что нагрузка на лопасти во время торможения определяется вращающим моментом вала и собственной массой лопастей, т. е.:

$$M_{x,B} = \frac{M_{x\text{-}shaft}}{B} + m_B g R_{cog} . \quad (Е.32)$$

Для конфигурации МВЭУ с мультипликатором и высокоскоростным тормозом вращающий момент вала, определенный по формуле (Е.31), должен быть скорректирован соответствующим динамическим коэффициентом. Рекомендуется принимать динамический коэффициент равный 2 при отсутствии точных значений.

Е.10 Расчетный случай нагрузки *H* «Экстремальная скорость ветра»

Для этого варианта нагружения возможно применение одной из двух формул в зависимости от конструкции МВЭУ: с пассивной или активной системой управления.

Для МВЭУ с активной системой управлений при больших ветрах происходит торможение ветроколеса. Для МВЭУ с пассивной системой управления происходит вывод ветроколеса из-под ветра.

Для МВЭУ с активной системой управления:

Изгибающий момент на конце лопасти определяют по формуле:

$$M_{yB} = C_d \frac{1}{2} \rho V_{e50}^2 A_{proj,B} \frac{1}{2} R \,, \tag{Е.33}$$

где C_d — коэффициент лобового сопротивления, принимаемый равным 1,5;

$A_{proj,B}$ — площадь лопасти.

Формула (Е.33) предполагает, что центр тяжести не меняется, а площадь лопасти определяют, когда лопасть перпендикулярна к ветру.

Осевую нагрузку вала при торможении вычисляют по формуле:

$$\Delta F_{x\text{-}shaft} = BC_d \frac{1}{2} \rho V_{e50}^2 A_{proj,B} \,. \tag{Е.34}$$

Для полностью развернутой по направлению ветра лопасти будет преобладать подъемная сила, а не сила трения. Изменения направления ветра приводят к изменению значения угла атаки, при котором будет наибольшая подъемная сила. В этом случае сила определяется максимальным коэффициентом подъемной силы, а не максимальным коэффициентом аэродинамического сопротивления.

Для ВЭУ с пассивной системой управления ветроколесо подвержено экстремальной скорости ветра с периодом повторяемости 50 лет, и ожидается, что при определенном положении ветроколеса на одной из лопастей значение C_l достигает максимального значения вследствие изменения направления ветра. Таким образом, изгибающий момент на вершине лопасти определяют по формуле:

$$M_{yB} = \int_0^R C_{l,max} \frac{r}{R} \frac{1}{2} \rho V_{e50}^2 C dr = C_{l,max} \frac{1}{6} \rho V_{e50}^2 A_{proj,B} R \,. \tag{Е.35}$$

Распределение подъемной силы следующим образом: на конце лопасти — $C_{l,max}$, в точке основания лопасти — 0. В дальнейшем этот коэффициент следует принять постоянным по длине хорды (лопасти). Рекомендуется принимать значение $C_{l,max}$ равное 2 при отсутствии точных данных.

Для вращающегося ветроколеса (незаторможенного ветроколеса) расчет осевой нагрузки основан на теории функционирования вертолетов. Коэффициент осевой нагрузки для вертолета основан на окружной скорости, а не на скорости ветра:

$$C_{T_H} = \frac{T}{\rho \pi R^2 (\omega_n R)^2} \,. \tag{Е.36}$$

В соответствии с *[23]* максимальное значение коэффициента осевой нагрузки для винтов вертолета приблизительно равно:

$$\frac{C_{T_H\,max}}{\sigma} = 0{,}17 \,, \tag{Е.37}$$

где σ — коэффициент прочности винта вертолета, который определяют по формуле:

$$\sigma = (Bc_{ave}/\pi R),$$

где c_{ave} — средняя хорда лопасти.

Максимального значения коэффициент осевой нагрузки достигает при равенстве отношения $V/(\omega_n R)$ (обратная величина коэффициента, характеризующая режим работы винта) нулю. Если отношение $V/(\omega_n R) = 0{,}5$, то коэффициент осевой нагрузки снижается примерно до 0,06 для горизонтального полета, но для переходных событий его значение остается вблизи 0,17. По этой причине постоянное значение коэффициента осевой нагрузки равно 0,17.

При преобразовании коэффициента осевой нагрузки для вертолета в коэффициент осевой нагрузки для МВЭУ получают следующее выражение:

$$C_T = 2C_{T_H}\lambda^2 \,. \tag{Е.38}$$

Объединяя уравнения (Е.37) и (Е.38), получают:

$$C_T = 0{,}34\sigma\lambda^2 \,. \tag{Е.39}$$

Используя уравнения (Е.39) и (Е.26), получают:

$$F_{x\text{-}shaft} = 0{,}34\sigma\lambda_{e50}^2 \frac{1}{2}\rho V_{e50}^2 A\,. \tag{Е.40}$$

где σ — коэффициент заполнения ветроколеса (BA_{proj}/A);

λ_{e50} — коэффициент, который характеризует режим работы ветроколеса при V_{e50} и который можно определить по формуле:

$$\lambda_{e50} = \frac{n_{max}\pi R}{30 V_{e50}}\,. \tag{Е.41}$$

Подставив λ_{e50} в уравнение (Е.40), получают:

$$F_{shaft} = 0{,}17 BA_{proj}\lambda_{e50}^2 \rho V_{e50}^2\,. \tag{Е.42}$$

Для двух вариантов (с пассивной и активной системами управления) вычисление нагружения башни F определяют путем суммирования нагрузок на башне и на гондоле по формуле:

$$F = C_f \frac{1}{2}\rho V_{e50}^2 A_{proj}\,, \tag{Е.43}$$

где C_f — коэффициент силы (мощности);

A_{proj} — площадь спроецированной ометаемой площади на плоскость, перпендикулярную направлению ветра.

Е.11 Расчетный случай нагрузки *I* «Максимальная нагрузка»

Для этого случая нагрузки МВЭУ неподвижна. Подъемная и/или тяговая силы должны быть определены с учетом форм и габаритов компонентов МВЭУ по следующей формуле:

$$F = C_f \frac{1}{2}\rho V_{e1}^2 A_{proj}\,, \tag{Е.44}$$

где V_{e1} — экстремальная скорость ветра с периодом повторяемости 1 год.

Нагрузки должны быть рассчитаны для всех компонентов МВЭУ, подвергнутых воздействию ветра.

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте

Таблица ДА

Обозначение ссылочного национального, межгосударственного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование ссылочного международного стандарта
ГОСТ Р ИСО/МЭК 17020—2012	IDT	ИСО/МЭК 17020:2012 «Оценка соответствия. Требования к работе различных типов органов инспекции»
ГОСТ Р МЭК 60034-2-1—2009	IDT	МЭК 60034-2-1:2007 «Машины электрические вращающиеся. Часть 2-1. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия по результатам испытаний (кроме машин для тягового транспорта)»
ГОСТ Р МЭК 60204-1—2007	IDT	МЭК 60204-1:2005 «Безопасность машин. Электрооборудование машин и механизмов. Часть 1. Общие требования»
ГОСТ ISO 9000—2011	IDT	ИСО 9000:2005 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь»
ГОСТ ИСО/МЭК 17025—2009	IDT	ИСО/МЭК 17025:2005 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий»
ГОСТ Р 50571.5.54—2011/ МЭК 60364-5-54:2002	IDT	МЭК 60364-5-54:2002 «Электрические установки зданий. Часть 5-54. Выбор и монтаж электрооборудования. Заземляющие устройства, защитные проводники и проводники уравнивания потенциалов»
ГОСТ Р 52776—2007	MOD	МЭК 60034-1:2004 «Вращающиеся электрические машины. Номинальные данные и характеристики»
ГОСТ Р 54257—2010	NEQ	ЕН 1990:2002 «Основные принципы строительного проектирования ИСО 2394:1998 «Основные принципы обеспечения надежности»
ГОСТ IEC 60034-5—2011	IDT	МЭК 60034-5:2006 «Вращающиеся электрические машины. Часть 5. Степени защиты, обеспечиваемые оболочками вращающихся электрических машин (код IP)»

Примечание — В настоящей таблице использованы следующие условные обозначения степени соответствия стандартов:
- IDT — идентичные стандарты;
- MOD — модифицированные стандарты;
- NEQ — неэквивалентные стандарты.

Библиография

[1]	ИСО 2394:1998 (ISO 2394:1998)	Основные принципы надежности конструкций (General principles on reliability for structures)
[2]	МЭК 60721-2-1(2002) [IEC 60721-2-1(2002)]	Классификация внешних условий. Часть 2. Природные внешние условия. Температура и влажность (Classification of environmental conditions. Part 2-1. Environmental conditions appearing in nature. Temperature and humidity)
[3]	МЭК 60038(2002) [IEC 60038(2002)]	Стандартные напряжения по МЭК (IEC standard voltages)
[4]	МЭК/ТС 61400-13(2001) [IEC/TS 61400-13(2001)]	Системы турбогенераторные ветровые. Часть 13. Измерение механических нагрузок (Wind turbine generator systems. Part 13. Measurement of mechanical loads)
[5]	МЭК 61400-12-1(2005) [IEC 61400-12-1(2005)]	Системы турбогенераторные ветровые. Часть 12-1. Измерения характеристик мощности ветровых турбин для производства электроэнергии (Wind turbines. Part 12-1. Power performance measurements of electricity producing wind turbines)
[6]	Рекомендации по стандартизации Р 50-605-81—94	Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэлектрические. Требования к испытаниям
[7]	Правила по стандартизации ПР 50.2.002—94	Порядок осуществления государственного метрологического надзора за выпуском, состоянием и применением средств измерений, аттестованными методиками выполнения измерений, эталонами и соблюдением метрологических правил и норм
[8]	МЭК/ТС 61400-23(2001) [IEC/TS 61400-23(2001)]	Системы турбогенераторные ветровые. Часть 23. Полномасштабные испытания конструкций лопастей ротора (Wind turbine generator systems. Part 23. Full-scale structural testing of rotor blades)
[9]	AGMA/AWEA 921-A97	Recommended Practices for Design and Specification of Gearboxes for wind Turbine Generator systems
[10]	МЭК 60034-8(2007) [IEC 60034-8(2007)]	Машины электрические вращающиеся. Часть 8. Маркировка выводов и направление вращения (Rotating electrical machines. Part 8. Terminal markings and direction of rotation)
[11]	МЭК 61643-11(2011) [IEC 61643-11(2011)]	Устройства защиты от перенапряжений низковольтные. Часть 11. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к низковольтным системам распределения электроэнергии. Требования и методы испытаний (Low-voltage surge protective devices. Part 11. Surge protective devices connected to low-voltage power systems — Requirements and test methods)
[12]	Expert group study on recommended practices for wind turbine testing, 9. Lightning protection for wind turbine installation, IEA, 1997	
[13]	IEC WT 01(2001)	Система IEC для испытания соответствия и сертификации ветровых турбин. Правила и методики (IEC System for Conformity Testing and Certification of Wind Turbines. Rules and procedures)
[14]	ECN-C-96-033, Verification of design loads for small wind turbines, F.J.L. Van Hulle et.al. Table 2.6 Safety Factors in IEC 1400-2 and Danish Code	
[15]	Mandell, J.F., Samborsky, D.D., and Cairns, D.S., Fatigue of composite materials and substructures for wind turbine blades, SAND REPORT, SAND2002-0771, Unlimited Release, Sandia National Laboratories, March 2002	
[16]	Higdon, Ohlsen, Stiles, Weese, and Riley, Mechanics of Materials, 3rd Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1976, pp. 572, 674—675	
[17]	Hertzberg, Richard W., Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, Fourth Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1996, pp. 508—509	

[18] Boerstra, G.K., Zwart, G.G.M., Proposal, Design Envelope Wood Expoxy Laminate as a Completion of NEN 6096, Paragraph 4.3.5.4, WindMaster Nederland, 1992, p. 11

[19] Forest Products Laboratory, 1999, Wood Handbook — Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, «Chapter 4 Material properties of Wood»

[20] Norton, Robert L., Machine Design — An Integrated Approach, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1996, Appendix E — Stress concentration factors, pp. 1005—1012

[21] Burton, T., Sharpe, D, Jenkins, N, and Bossanyi, E., Wind Energy Handbook, John Wiley and Sons, 2001

[22] NEN 6096:1991 nl Veiligheideisen voor windturbines

[23] Prouty, R.W., Helicopter Performance, Stability and Control, PWS Publishers, 1986

УДК 621.311.24:006.354 ОКС 27.180

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, малые ветроэнергетические установки, ветроколесо, технические требования, надежность

Редактор *Г.В. Зотова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Е.Р. Ароян*
Компьютерная верстка *И.В. Белюсенко*

Сдано в набор 09.11.2015. Подписано в печать 15.12.2015. Формат 60 × 84 $^{1}/_{8}$. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 7,91. Уч.-изд. л. 7,05. Тираж 29 экз. Зак. 4178.

Набрано в ИД «Юриспруденция», 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, 11.
www. jurisizdat. ru gost.e-ecolog.ru

Издано и отпечатано во
ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4
www.gostinfo.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru